

## ANALITIČKA KEMIJA II

- ↳ uvodno predavanje
- ↳ općenito - uzorkovanje; norme i standardi; intelektualno vlasništvo
- ↳ Boltzmannova razdioba
- ↳ Statistika - osnove
- ↳ **EKSTRAKCIJA, KROMATOGRAFIJA - OSNOVE**
- ↳ **ELEKTROANALITIČKE METODE - PREGLED**

nositelj: prof.dr.sc. P. Novak  
sastavila: dr.sc.V. Allegretti Živčić; šk.g. 2012/13.

### EKSTRAKCIJA, KROMATOGRAFIJA - OSNOVE

- ↳ ODVAJANJE SASTOJAKA (ANALITA)
  - taloženjem
  - **ekstrakcijom**
  - destilacijom

SEPARACIJSKE TEHNIKE I GLAVNE PRIMJENE		
tehnika	temelj	glavne primjene
tankosolojna kromatografija		kvalitativna analiza smjesa
plinska kromatografija	diferencijalne brzine kretanja analita kroz stacionarnu fazu gibanjem tekuće ili plinovite mobilne faze	kvalitativno i kvantitativno određivanje hlapljivih spojeva
tekućinska kromatografija		kvalitativno i kvantitativno određivanje nehlapljivih spojeva
elektroforeza	diferencijalno kretanje analita kroz puferirani medij	kvalitativno i kvantitativno određivanje organskih spojeva i biomolekula

## EKSTRAKCIJA

- ⇒ analitička separacijska tehnika
- ⇒ temelji se na razdiobi tvari između dva otapala koja se međusobno ne miješaju

**zakon razdiobe** → razdioba tvari između dvije faze koje se međusobno ne miješaju

- ⇒ ravnoteža:



- ⇒ idealan slučaj: ponašanje vrste A je konstantno i neovisno o ukupnoj količini A – tj. pri svakoj temperaturi:

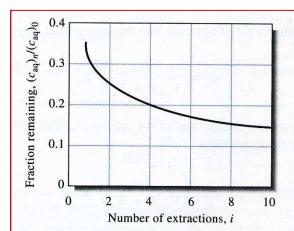
$$K = \frac{(a_A)_{org}}{(a_A)_{aq}} \approx \frac{[A]_{org}}{[A]_{aq}}$$

**K** = konstanta razdiobe (raspodjele; distribucije)

→ u jednostavnom ekstrakcijskom sustavu koncentracija vrste A koja zaostaje u vodenoj fazi nakon  $i$  ekstrakcija organskim otapalom iznosi:

$$[A]_i = \left( \frac{V_{aq}}{V_{org}K + V_{aq}} \right)^i [A]_0$$

→ višekratna ekstrakcija (preporuka: efikasnije od jedne ekstrakcije velikim volumenom)



→ povećana djelotvornost višekratnih ekstrakcija naglo opada nakon 5-6 dijelova dodanog otapala

Primjer:

Konstanta razdiobe joda između organskog otapala i vode iznosi 85. Koja koncentracija joda ostaje u vodenom sloju nakon ekstrakcije 50,0 ml  $1,00 \times 10^{-3}$  M  $I_2$  sa sljedećim količinama organskog otapala: a) 50,0 ml; b) 2 puta po 25,0 ml; c) 5 puta po 10,0 ml?

$$[A]_i = \left( \frac{V_{aq}}{V_{org}K + V_{aq}} \right)^i [A]_0$$

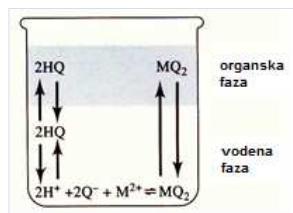
$$[I_2]_1 = \left( \frac{50,0}{(50,0 \times 85) + 50,0} \right)^1 \times 1,00 \times 10^{-3} = 1,16 \times 10^{-5} \text{ M}$$

$$[I_2]_2 = \left( \frac{50,0}{(50,0 \times 85) + 50,0} \right)^2 \times 1,00 \times 10^{-3} = 5,28 \times 10^{-7} \text{ M}$$

$$[I_2]_5 = \left( \frac{50,0}{(50,0 \times 85) + 50,0} \right)^5 \times 1,00 \times 10^{-3} = 5,29 \times 10^{-10} \text{ M}$$

analitička primjena – ekstrakcija anorganskih vrsta

- primjer: ekstrakcija metalnih iona kao kelata
  - ⇒ mnogi kelatni agensi su slabe kiseline te reagiraju s metalnim ionima
  - ⇒ nastaju neutralni kompleksni spojevi, topljni u organskim otapalima a skoro netopljni u vodi
  - ⇒ kelatni reagensi su često topljni u organskim otapalima a ograničeno topljni u vodi



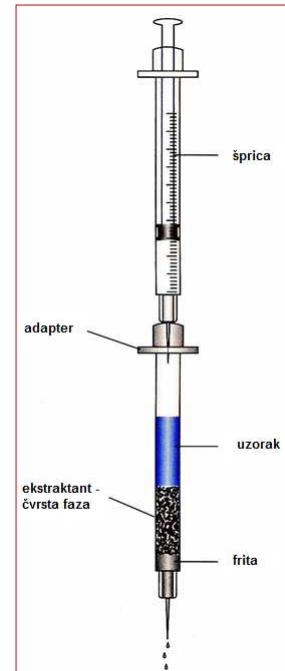
- ⇒ postoje ograničenja u tekućinsko-tekućinskoj ekstrakciji
- ⇒ odabir otapala koje se ne miješa s vodom (ne smije tvorit emulziju)
- ⇒ relativno velike količine otapala (problem zbrinjavanja otpada)
- ⇒ ručna izvedba – sporo i zamorno





### ekstrakcija na čvrstoj fazi (tekućinsko-krutinska ekstrakcija)

- ⇒ rabe se membrane ili male kolone s injekcijama
- ⇒ hidrofobni organski spoj je prevučen ili kemijski vezan na praškasti slikagel = čvrsta ekstrakcijska faza
- ⇒ organske molekule ekstrahiraju se iz složenog uzorka i vežu se na čvrstu fazu
- ⇒ isperu se sa čvrste faze drugim otapalom, npr. metanolom



## KROMATOGRAFIJA



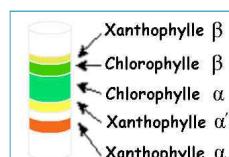
**Kromatografija** – tehnika kojom se odjeljuju sastojci smjese ovisno o njihovoj raspodjeli između dviju faza, od kojih je jedna nepokretna, dok se druga kreće u određenom smjeru (pokretna faza).

**Mihail Semenovič Cvet, 1906**

**Mihail Semenovič Cvet (1872-1919)** – ruski botaničar

→ objasnio načela kromatografije na stupcu

→ biljni pigmenti na koloni od praškaste glinice – nastale obojene vrpce → naziv “kromatografija”



(od grč. *khrōma*, boja i *graphein*, pisati, crtati)

(M. Tswett, Ber. Deutsh. Bot. 24 (1906) 384)

**definicija:**

metode odjeljivanja, pri čemu se smjese tvari **rastavljaju** na svoje komponente, razdiobom **između dvije faze** (koje se međusobno ne mijesaju)

**faze:**

**stacionarna (nepokretna)**  
**mobilna (pokretna, koja struji)**

**Nepokretna faza**

- čvrsta tvar, gel ili tekućina
- ispunjava usku cijev ili je nanesena na ravnoj plohi
- = **sorbens** (lat. *sorbere* – upijati)

**Pokretna faza**

- tekućina, plin ili fluid
- prolazi kroz ili uzduž nepokretnе faze u određenom smjeru
- = **eluens** (lat. *eluere* – ispirati; ispiranje = eluiranje)

**primjena:**

- ⇒ odjeljivanje
- ⇒ identifikacija
- ⇒ kvantitativna analiza sastojaka prisutnih u složenim smjesama

**podjela prema:**

- ⇒ *agregatnom stanju faza*
- ⇒ *fizičko-kemijskim svojstvima i procesima*  
 (koji dominiraju pri odvajanju)
- ⇒ *izvedbenoj tehnići*

podjela prema *agregatnom stanju faza:*

<i>stacionarna faza:</i>	<i>mobilna faza:</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• krutina</li> <li>• tekućina (tanki film otapala na krutom poroznom nosaču)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tekućina</li> <li>• plin</li> </ul>	
<i>mobilna faza</i>	<i>stacionarna faza</i>	<i>postupak</i>
tekućina ( <i>liquid</i> , L)	krutina ( <i>solid</i> , S)	<b>LSC</b>
tekućina ( <i>liquid</i> , L)	tekućina ( <i>liquid</i> , L)	<b>LLC</b>
plin ( <i>gas</i> , G)	krutina ( <i>solid</i> , S)	<b>GSC</b>
plin ( <i>gas</i> , G)	tekućina ( <i>liquid</i> , L)	<b>GLC</b>

podjela prema *fizičko-kemijskim svojstvima:*

<i>fiz.-kem. svojstvo</i>	<i>mobilna faza: plin</i> <i>(plinska krom.)</i>	<i>mobilna faza: tekućina</i> <i>(tekućinska krom.)</i>
vrelište	sve vrste <b>GC</b>	-
adsorpcija	<b>GSC</b>	<b>LSC</b>
topljivost	<b>GLC</b>	<b>LLC</b>
oblik molekule	<b>GSC</b> s molek. sitima	gelna kromatografija, afinitetna kromatografija
reverzibilna kem. reakcija	<b>GLC</b> uz tvorbu kompleksa	kromatografija ionske izmjene

podjela prema *izvedbenim tehnikama:*

kromatografija na stupcu		
tankoslojna kromatografija	<b>TLC</b>	<i>postupci</i>
papirna kromatografija	<b>PC</b>	⇒ <b>tekućinska:</b> kolona ravna ploha
plinska kromatografija	<b>GC</b>	⇒ <b>plinska:</b> kolona

**PLINSKA KROMATOGRAFIJA** (*Gas Chromatography, GC*)

- pokretna faza plin
- u koloni

**TEKUĆINSKA KROMATOGRAFIJA** (*Liquid Chromatography, LC*)

- pokretna faza tekućina
  - u koloni i na plohi
  - sitne čestice nepokretne faze uz visoki ulazni tlak pokretne faze
- ⇒ tekućinska kromatografija visoke djelotvornosti (nekad: visokih tlakova)  
*(High-Performance Liquid Chromatography, HPLC)*

**FLUIDNA KROMATOGRAFIJA PRI SUPERKRITIČNIM UVJETIMA***(Supercritical-Fluid Chromatography, SFC)*

- pokretna faza fluid (plin ili tekućina) iznad ili blizu kritične temperature i tlaka fluida
- u koloni

**KOLONSKA KROMATOGRAFIJA – KROMATOGRAFIJA ISPIRANJEM*****osnovni pojmovi:***

**eluiranje:** proces u kojemu mobilna faza ispirje analizirane sastojke sa stacionarne faze

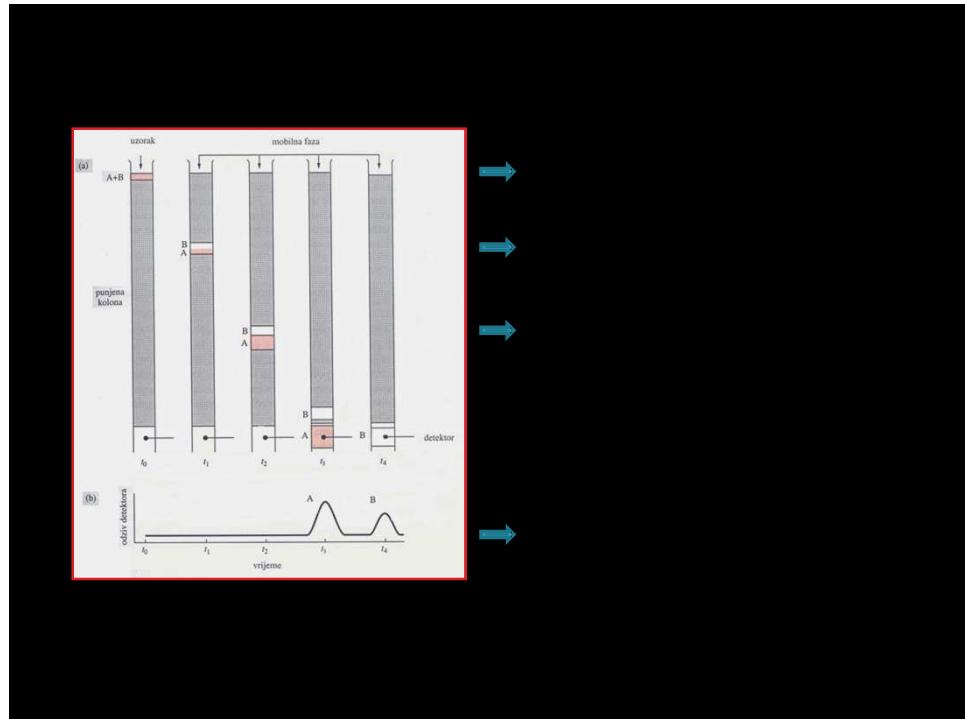
**eluens:** otapalo koje nosi sastojke smješte kroz stacionarnu fazu

**kromatogram:** ispis bilo koje funkcije analizirane tvari u ovisnosti o vremenu eluiranja ili o volumenu eluensa

sastojci uzorka kreću se samo u mobilnoj fazi

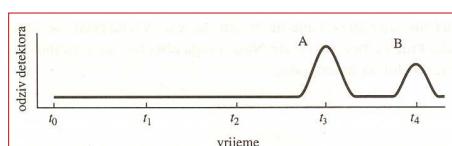
⇒ prosječna **brzina** kojom se sastojak kreće kroz kolonu ovisi o **vremenu** koje provede u mobilnoj fazi

– sastojci se odjeljuju zbog različitih brzina gibanja i duž kolone nastaju **vrpcе** ili **zone**



**Kromatogram** – grafički prikaz odziva detektora (funkcija koncentracije analita) u ovisnosti o vremenu ili o volumenu eluiranja

- položaj vrška („pika“)  $\Rightarrow$  kvalitativna analiza (identifikacija sastojka)
- visina ili površina vrška („pika“)  $\Rightarrow$  kvantitativna analiza (količina sastojka)



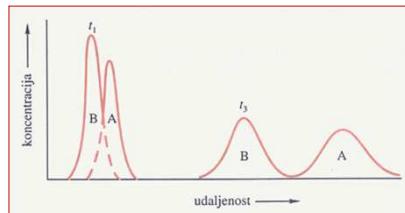
**Djelotvornost kolone** određuju:

- relativna brzina eluiranja sastojaka  $\Rightarrow$  klasična teorija
- širenje zona eluiranih sastojaka  $\Rightarrow$  kinetička teorija

## KLASIČNA TEORIJA KROMATOGRAFIJE

Klasična teorija kromatografije – odjeljivanje sastojaka ovisi o njihovim relativnim brzinama istjecanja iz kolone

### **konstanta razdjeljenja** (koeficijent raspodjele)



koncentracijski profil; razlučivanje  
kromatografska odjeljivanja temelje se  
na različitoj razdiobi sastojaka između  
mobilne i stacionarne faze:

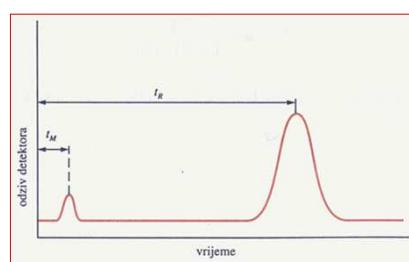
$$A_{\text{mobilna}} \Leftrightarrow A_{\text{stacionarna}}$$

Konstanta razdjeljenja,  $K$  – odnos  
koncentracija odjeljivanog  
sastojka u nepokretnoj i pokretnoj  
fazi za ravnotežno stanje

$$K = \frac{c_s}{c_m}$$

$K$  (konst. ravn.) = omjer razdiobe  
ili koeficijent razdiobe

- koncentracija sastojka u nepokretnoj fazi,  $c_s$
- koncentracija sastojka u pokretnoj fazi,  $c_m$



⇒ vrijeme zadržavanja ( $t_R$ ): vrijeme od unošenja uzorka u kolonu do pojave sastojka u detektoru smještenome na izlazu iz kromatografske kolone

⇒ mrtvo vrijeme ( $t_M$ ): vrijeme potrebno da sastojak koji se ne zadržava na koloni prođe kroz kolonu

⇒ prilagođeno vrijeme zadržavanja,  $t_R'$      $t_R' = t_R - t_M$

- u GC analogno  $V_R$ ,  $V_M$ ,  $V_R'$

⇒ **faktor kapaciteta ( $k'$ )**: opisuje brzinu kretanja analita u koloni ( $V_S$  i  $V_M$  = volumeni faza)

$$k'_{A} = \frac{K_A V_S}{V_M} = \frac{t_R - t_M}{t_M}$$

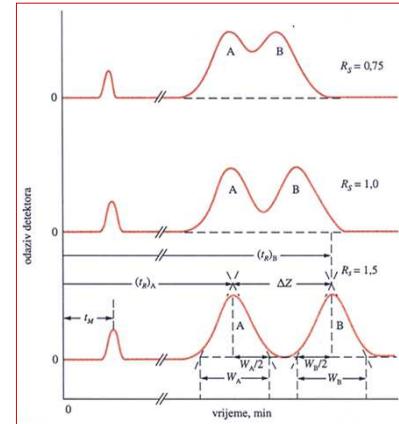
⇒ **koeficijent selektivnosti ( $\alpha$ )**: pokazuje moć odjeljivanja sastojaka na koloni (uvijek  $> 1$ )

$$\alpha = \frac{K_B}{K_A}$$

⇒ djelotvornost kromatografske kolone može se izraziti pomoću dvije srođne veličine ( $L$  = duljina punila kolone):

- ⇒ **visina tavana,  $H$**
- ⇒ **broj teorijskih tavana,  $N$**
- ⇒  $N = L / H$

⇒ **razlučivanje kolone,  $R_s$** : mjeri kojom se izražava sposobnost odjeljivanja dva analita na koloni



#### VAŽNE EKSPERIMENTALNE KROMATOGRAFSKE VELIČINE I ODNOSI

Naziv	Oznaka za eksperimentalnu veličinu	Izvedeno iz
Vrijeme kretanja nezadržavanog spoja	$t_M$	Kromatogram (slika 26–11)
Vrijeme zadržavanja, sastojci A i B	$(t_R)_A, (t_R)_B$	Kromatogram (slika 26–11)
Ispравljeno vrijeme zadržavanja, sastojak A	$(t'_R)_A$	$(t'_R)_A = (t_R)_A - t_M$
Širina pikova, sastojci A i B	$W_A, W_B$	Kromatogram (slika 26–11) mjerjenje duljine
Duljina punila kolone	$L$	mjerjenje protoka
Brzina protoka	$F$	Podaci iz pripreme punila
Volumen stacionarne faze	$V_S$	Podaci iz analize i pripreme
Koncentracija sastojka u mobilnoj i stacionarnoj fazi	$c_M, c_S$	

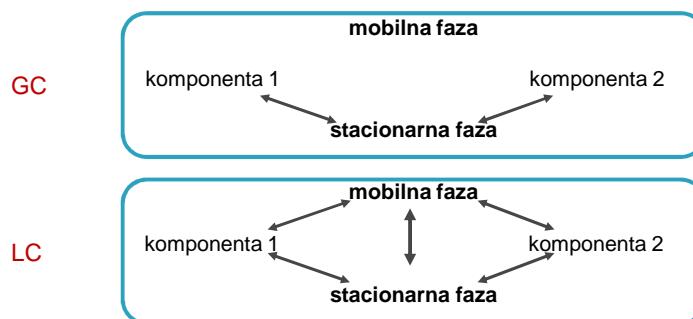
VAŽNE IZRAČUNATE VELIČINE I ODNOSI		
Naziv	Izračunavanje izvedenih veličina	Veza s ostalim veličinama
Linearna brzina mobilne faze	$u = L/t_M$	
Volumen mobilne faze	$V_M = t_M F$	
Faktor kapaciteta	$k' = (t_R - t_M) / t_M$	$k' = \frac{KV_S}{V_M}$
Koeficijent raspodjele	$K = \frac{k' V_M}{V_S}$	$K = \frac{c_S}{c_M}$
Koeficijent selektivnosti	$\alpha = \frac{(t_R)_B - t_M}{(t_R)_A - t_M}$	$\alpha = \frac{k'_B}{k'_A} = \frac{K_B}{K_A}$
Razlučivanje	$R_S = \frac{2[(t_R)_B - (t_R)_A]}{W_A + W_B}$	$R_S = \frac{\sqrt{N}}{4} \left( \frac{\alpha - 1}{\alpha} \right) \left( \frac{k'_B}{1 + k'_B} \right)$
Broj tavana	$N = 16 \left( \frac{t_R}{W} \right)^2$	$N = 16 R_S^2 \left( \frac{\alpha}{\alpha - 1} \right)^2 \left( \frac{1 + k'_B}{k'_B} \right)^2$
Visina tavana	$H = L/N$	
Vrijeme zadržavanja	$(t_R)_B = \frac{16 R_S^2 H}{u} \left( \frac{\alpha}{\alpha - 1} \right)^2 \frac{(1 + k'_B)^3}{(k'_B)^2}$	

### PLINSKA KROMATOGRAFIJA, GC

- ⇒ **mobilna faza:** plinovita (**plin nosač**)
- ⇒ **uzorak smjese se ispari** bez raspada (zbog prijenosa plinom)
- ⇒ **eluiranje:** protok inertne plinovite mobilne faze
  - ⇒ međudjelovanje molekula plina nosača i uzorkovih para, kao i plina nosača i stacionarne tekuće faze je zanemarljivo (zbog niske gustoće plina) ⇒ jedina funkcija plina nosača je **prijenos** analita kroz kolonu

⇒ dva tipa plinske kromatografije: **GSC** i **GLC**

⇒ usporedba GC i LC:

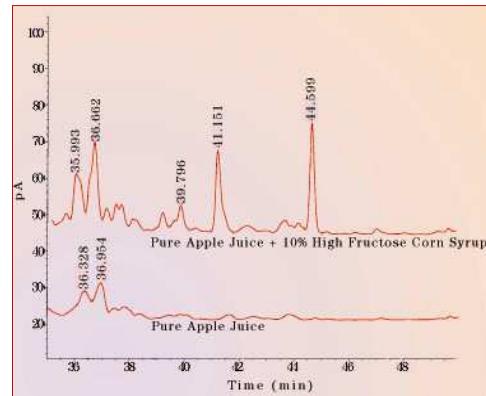


**plinovi nosači:**

- ⇒ **helij** – uz detektore s toplinskom vodljivošću
  - ⇒ **dušik** – uz detektor s plamenom ionizacijom (jeftiniji od He)
  - ⇒ **vodik** – bolje odjeljivanje (osobito uz kapilarne stupce)  
zbog niske viskoznosti prikladan za dugačke stupce
- OPASNOST OD EKSPLOZIJE!**

**GC**

primjer:  
jabučni sok se "onečišćuje" dodatkom  
tržišno dostupnih sladila koja su po  
uglikohidratnom sastavu slična  
jabučnom soku



analiza čistog jabučnog soka i soka kojemu je  
dodano 10 % fruktoze žitnog sirupa

<http://www.chem.agilent.com/cag/peak/peak2-97/article1.html>

**TEKUĆINSKA KROMATOGRAFIJA VISOKE DJELOTVORNOSTI, HPLC**

⇒ (high pressure liquid chromatography → raniji naziv)  
 ⇒ **High Performance Liquid Chromatography**

**HPLC** ⇒ **mobilna faza:** tekuća  
**stacionarna faza:** punila vrlo finih zrna  
**tlak:** nekoliko miljuna Pa (do  $4 \times 10^7$  Pa – 400 bara)  
 ⇒ tlačna pumpa (sisaljka)

**tehnika normalnih faza**

- nepokretna faza polarna (silikagel)
- pokretna faza nepolarna (heksan, diklorometan, kloroform..)

**tehnika obrnutih faza**

- nepokretna faza nepolarna (silikagel s C8 ili C18 lancima)
- pokretna faza polarna (voda, acetonitril, metanol..)

**detektori:**

- ⇒ za skupna svojstva (mjere promjene fizikalnih veličina)
- ⇒ za specifična svojstva (mjere pojedinačna svojstva)

**vrste:**

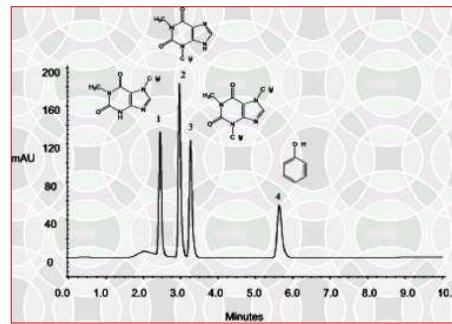
- ⇒ diferencijalni refraktometar
- ⇒ UV-detektor
- ⇒ fluorimetar
- ⇒ IR-detektor
- ⇒ elektrokemijski detektor
- ⇒ konduktometar (vodljivost)
- ⇒ maseni spektrometar

**HPLC**

primjer: purinski alkaloidi

Column: SepaxBio-C18, 4.6x150mm, 5 mm  
 Eluent: 0.10 M Phosphate buffer, pH 3.1  
 Flow rate: 0.75 mL/min  
 Detection: UV 254 nm  
 Injection: 5 mL  
 Temperature: Ambient (23°C)  
 Compounds:

1. Theobromine (1 mM)
2. Theophylline (1 mM)
3. Caffeine (1 mM)
4. Phenol (7 mM)



<http://www.sepax-tech.com/sepaxbioc18.html>

### TANKOSLOJNA KROMATOGRAFIJA (TLC)

(planarna, plošna kromatografija)

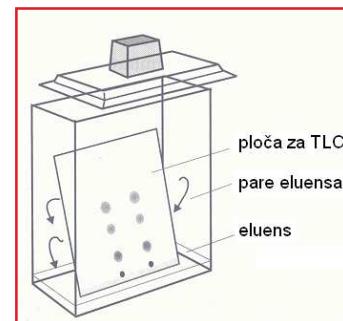
pravokutne ploče → staklo, plastika, aluminij  
 sloj → slikagel (uz moguće dodatke); 100-200 µm =  
 stacionarna faza

uzorak → nanosi se oko 1 cm od donjeg ruba  
 ploče

volumen → nekoliko nL do nekoliko µL  
 mrlja → promjer 1-3 mm

mobilna faza → neko otapalo (eluens)

nakon završetka putovanja otapala (nekoliko cm)  
 ploča se suši (otapalo upari)



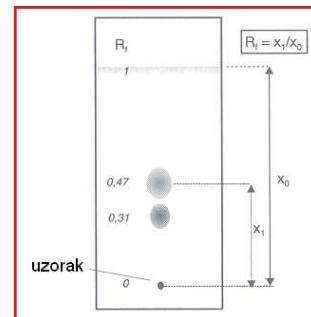
→ ploče

→ obojene mrlje (spojevi) → izravna detekcija  
→ bezbojni spojevi → razvijanje ploče:

→ na tržištu postoje ploče s dodanom cinkovom soli → obasjavanjem živinom lampom pojavljuju se tamne mrlje na fluorescentnoj pozadini

→ zagrijavanje ploče nakon prskanja sumpornom kiselinom → karbonizacijom spojeva mrlje postaju vidljive (nije prikladno za kvantitativnu analizu)

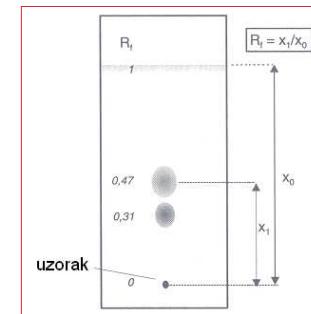
→ prskanje ploče reagensima – općenitim (fosfomolibdenska kiselina) ili specifičnim (nihidrin u alkoholu za aminokiseline) – opisane su stotine takvih reagenasa



→ komponente su definirane s vrijednošću  $R_f$

→  $R_f$  = faktor zadržavanja (retencijski faktor) – veličina migracije u odnosu na otapalo

$$R_f = \frac{\text{udaljenost koju je prešao sastojak}}{\text{udaljenost koju je prešla fronta otapala}} = \frac{x}{x_0}$$



→ ostali izrazi:

$$N = 16 \frac{x^2}{w^2}$$

$x$  = duljina puta  
 $w$  = promjer mrlje

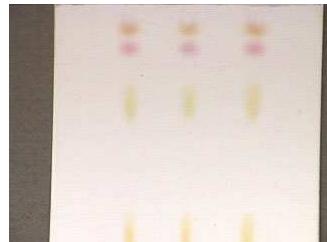
$$H = \frac{x_0}{N}$$

$$R = 2 \frac{x_2 - x_1}{w_1 + w_2}$$

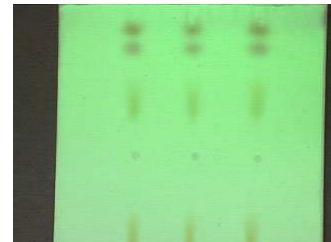
$$R_f = \frac{x}{x_0} = \frac{\bar{u}}{\bar{u}_0} = \frac{t_0}{t} = \frac{1}{k+1}$$

$$k = \frac{1}{R_f} - 1$$

$k$  = retencijski faktor  
 $u$  = migracijske brzine  
 $t$  = migracijsko vrijeme

**TLC**

*tržišna TLC ploča pod normalnim osvjetljenjem*



*ista TLC ploča osvijetljena UV-lampom*

**PAPIRNA KROMATOGRAFIJA**

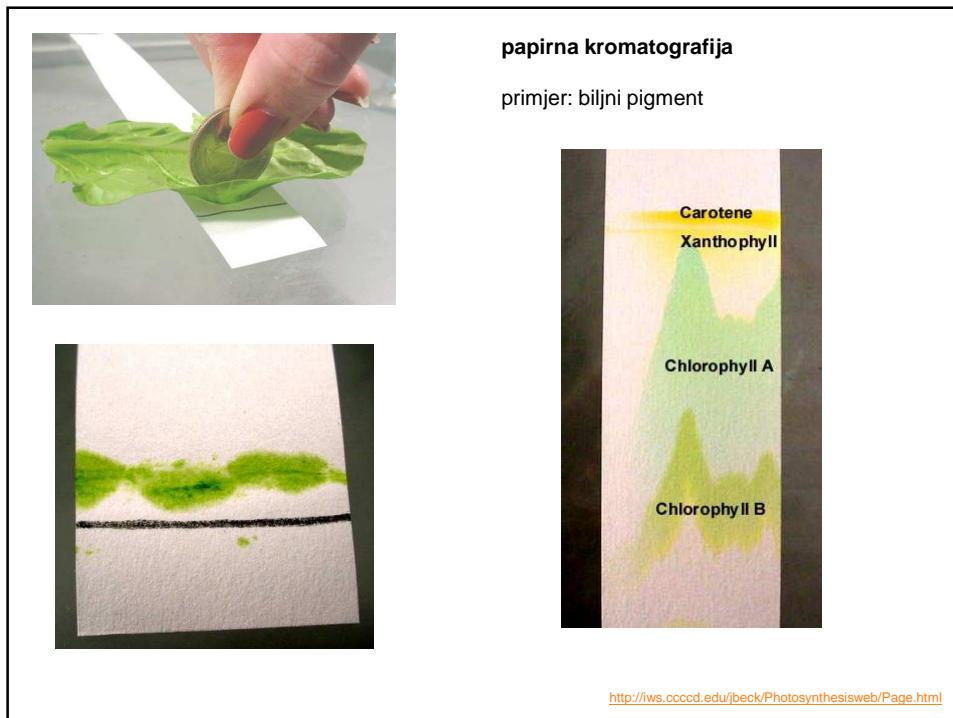
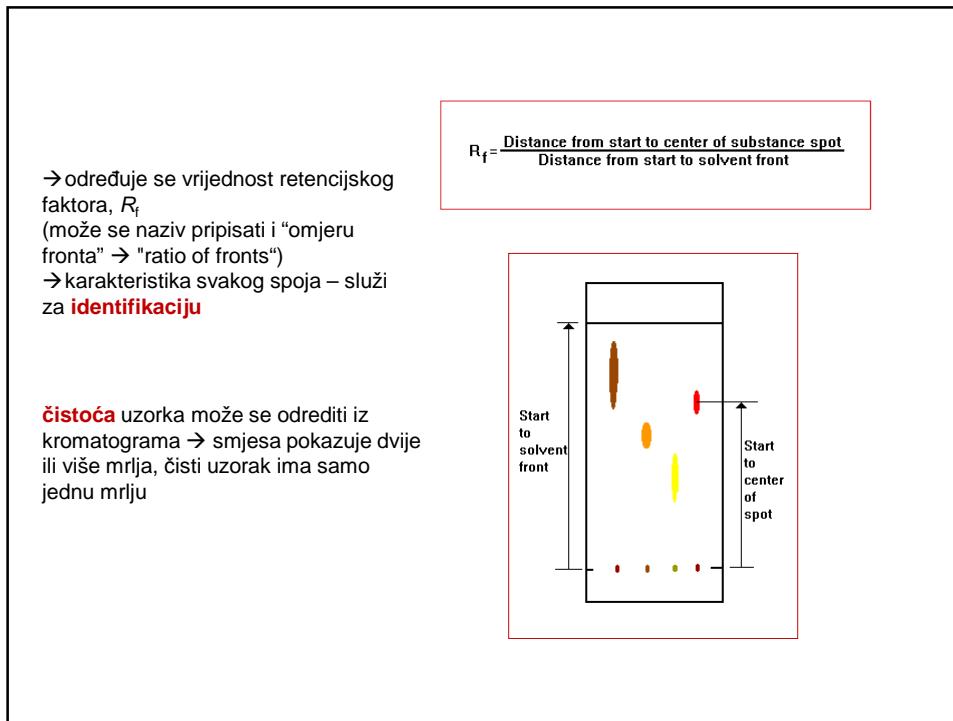
- čistoća supstancija
- identifikacija supstancija
  
- relativno brza
- male količine materijala



→ isti princip kao tankoslojna kromatografija

→ stacionarna faza:  
visokokvalitetni filter papir

→ mobilna faza: otopina  
"razvijača"



1. Neka smjesa spojeva stavljena je u Erlenmayerovu tirkicu u kojoj je bilo 6 mL silikagela i 40 mL otapala s otopljenih 100 mg nehlapljivog spoja. Nakon miješanja smjesa je ostavljena stajati neko vrijeme, te je iz smjesa izvučen alikvot od 10 mL koji je potom uparen do suhogra. Ostatak je izvagan i masa je iznosila 12 mg.

Izračunajte adsorpcijski koeficijent,  $K = C_s/C_m$ , spoja u ovom pokusu.

- u ravnotežnim uvjetima eluens sadrži:

$$12 \times 40 / 10 = 48 \text{ mg spoja}$$

- u stacionarnoj fazi je stoga:

$$100 - 48 = 52 \text{ mg spoja}$$

- $K$  predstavlja omjer masa u 1 mL svake od faza u ravnoteži, te je:

$$K = (52 / 6) / (48 / 40) = 7,2$$

2. Izračunajte separacijski faktor (ili faktor selektivnosti) između dva spoja, 1 i 2, čiji retencijski volumeni iznose 6 odnosno 7 mL. Mrvi volumen kolone je 1 mL.

Pokažite da je taj faktor jednak omjeru distribucijskih koeficijenata  $K_2/K_1$  tih spojeva (pretpostavka:  $t_{R(1)} < t_{R(2)}$ ).

- separacijski faktor (ili faktor selektivnosti) se obično računa iz retencijskih vremena.

- $V_R$  i  $t_R$  su povezani protokom mobilne faze D:

$$V_R = D \times t_R$$

- zato je:

$$\alpha = (t_{R(2)} - t_M) / (t_{R(1)} - t_M) = (V_{R(2)} - V_M) / (V_{R(1)} - V_M)$$

$$\rightarrow \alpha = 1,2$$

3. Sljedeći podatci odgovaraju koloni za tekućinsku kromatografiju:

duljina punila	24,7 cm
brzina protoka	0,313 mL/min
$V_M$	1,37 mL
$V_S$	0,164 mL

Na kromatogramu smjese sa sastojcima A, B, C i D mogu se odčitati sljedeći podatci:

	vrijeme zadržavanja, min	širina osnovice pikta, min
nezadržavani	3,1	-
A	5,4	0,41
B	13,3	1,07
C	14,1	1,16
D	21,6	1,72

Izračunajte:

- (a) broj tavana za svaki pik
- (b) srednju vrijednost standardnog odstupanja za N
- (c) visinu tavana za kolonu.

$$N = 16 \left( \frac{t_R}{W} \right)^2$$

a)  
 $N_A = 2775$   
 $N_B = 2472$   
 $N_C = 2364$   
 $N_D = 2523$

b)  $N = 2534 \pm 174 = 2,5(\pm 0,2) \times 10^3$  tavana

$$H = L/N$$

c)  
 $H = 0,0097 \text{ cm}$

4. Pomoću podataka iz prethodnog zadatka izračunajte za A, B, C i D:
- faktor kapaciteta,
  - koeficijent razdiobe.

$$k' = (t_R - t_M) / t_M$$

$$K = \frac{k' V_M}{V_S}$$

}

		A	B	C	D
(a)	$k'$	0,74	3,3	3,5	6,0
(b)	$K$	6,2	28	29	50

5. Iz kromatograma smjese butilnih alkohola (korekcije osjetljivosti detektora dobivene su u odvojenim pokusima s poznatim količinama čistih alkohola) dobiveni su sljedeći podatci o površinama.

alkohol	površina pika, cm <sup>2</sup>	faktor odziva detektora	reducirana površina, cm <sup>2</sup>
<i>n</i> -butil	2.74	0.603	4.54
<i>i</i> -butil	7.61	0.530	14.36
<i>s</i> -butil	3.19	0.667	4.78
<i>t</i> -butil	1.66	0.681	2.44
			$\Sigma = 26.12$



Odredite sastav analizirane smjese.

(reducirana površina = površina pika / faktor odziva detektora)

**rješenje:**

$$\begin{aligned} \% \text{ n-Bu} &= (4.54 / 26.12) \times 100 = 17.4 \% \\ \% \text{ i-Bu} &= (14.36 / 26.12) \times 100 = 55.0 \% \\ \% \text{ s-Bu} &= (4.78 / 26.12) \times 100 = 18.0 \% \\ \% \text{ t-Bu} &= (2.44 / 26.12) \times 100 = 9.0 \% \\ \Sigma &= 100.0 \% \end{aligned}$$

6. Relativne površine pikova dobivenih iz plinskog kromatograma smjese metil acetata, metil propionata i metil n-butirata iznosile su 17.6, 44.7, odnosno 31.1. Izračunajte postotni sastav smjese navedena tri spoja, ako su relativni odzivi detektora iznosili 0.65, 0.83, odnosno 0.92.

rel. površine	odziv det.	red. površina
17.6	0.65	27.08
44.7	0.83	53.86
31.1	0.92	33.80

$$\Sigma = 114.74$$

**rješenje:**

$$\begin{aligned} \text{metil acetat} &= 27.08 / 114.74 = 23.60 \% \\ \text{metil propionat} &= 53.86 / 114.74 = 46.94 \% \\ \text{metil n-butirat} &= 33.81 / 114.74 = 29.46 \% \\ \Sigma &= 100.00 \% \end{aligned}$$

7. Smjesa spojeva A i B putuje od ishodišta i tvori mrlje sljedećih karakteristika:

$x_A = 27 \text{ mm}$	$w_A = 2,0 \text{ mm}$
$x_B = 33 \text{ mm}$	$w_B = 2,5 \text{ mm}$

$$\left. \begin{array}{l} x = \text{duljina puta} \\ w = \text{promjer mrlje} \end{array} \right\}$$

Fronta mobilne faze iznosi 60 mm od ishodišne linije.

- a) Izračunajte faktor zadržavanja  $R_f$ , djelotvornost  $N$  i visinu tavana  $H$  za svaki od spojeva.
- b) Izračunajte faktor razlučivanja između dva spoja A i B.
- c) Utvrđite odnos između faktora selektivnosti i  $R_f$  za dva spoja. Izračunajte njegovu numeričku vrijednost.

$$R_f = \frac{x}{x_0}$$

**rješenje:**

$$\text{a)} R_{f(A)} = 27 / 60 = 0,45; R_{f(B)} = 33 / 60 = 0,55$$

$$N = 16 \frac{x^2}{w^2}$$

$$N_A = 16 \times 27^2 / 2^2 = 2916; N_B = 16 \times 33^2 / 2,5^2 = 2788$$

$$H = \frac{x_0}{N}$$

$$H_A = x_A / N_A = 9,26 \times 10^{-4} \text{ cm}; H_B = x_B / N_B = 1,18 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

$$R = 2 \frac{x_2 - x_1}{w_1 + w_2}$$

$$\text{b)} R = 2 (33 - 27) / (2 + 2,5) = 2,67$$

$$\alpha = \frac{k_2}{k_1}$$

$$\text{c)} \alpha = (R_{f(B)} / R_{f(A)}) \times (1 - R_{f(A)}) / (1 - R_{f(B)}) = 1,49$$

**8.** Koji je redoslijed eluiranja smjesa sljedećih kiselina iz HPLC kolone čija je stacionarna faza tipa C18 dok je mobilna faza formijatni pufer  $c = 200 \text{ mM}$ , pH 9.

Smjesa:

1. linoleinska kiselina	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{CO}_2\text{H}$
2. arahidna kiselina	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{18}\text{CO}_2\text{H}$
3. oleinska kiselina	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{CO}_2\text{H}$

**rješenje:**

- pri pH 9 kiseline su u obliku svog odgovarajućeg karboksilatnog iona
- polarna vodena faza snažno ih privlači
- hidrofobni dijelovi (ugljikovodični lanac) određuje kontakt sa stacionarnom fazom
  - polarnost tog lanca opada u nizu: 1 > 3 > 2
  - redoslijed eluiranja spojeva je stoga: 1, 3, 2

**Dodatni zadaci i pitanja**

**9.** Za određivanje metanola plinskom kromatografijom u uzorcima metanol-voda, učinjeni su kromatogrami četiri standardne smjese koje su sadržavale 20.0, 40.0, 60.0 i 80.0 % v/v metanola. Odgovarajući metanolni i vodenih pikovi na filter papiru škarama su izrezani, te su im određene mase  $m_m$  i  $m_v$ . Pomoću sljedećih podataka izračunajte postotni sadržaj metanola u otopini A.

$c (\text{CH}_3\text{OH})$ , % v/v	$m_m$ , g	$m_v$ , g
20.0	0.0430	0.1955
40.0	0.0692	0.1485
60.0	0.1098	0.1190
80.0	0.1107	0.0700
A	0.1124	0.1124

rezultat:  
 $w = 64 \% \text{ CH}_3\text{OH}$

**10.** Plinsko-tekućinskom kromatografijom (GLC) analizirana je smjesa *n*-pentana, *n*-heksana, *n*-heptana i *n*-oktana, uz primjenu detektora termičke vodljivosti. Analiza se temelji na oksidaciji eluiranih ugljikovodika u CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O, te propuštanju CO<sub>2</sub> kroz detektor nakon uklanjanja H<sub>2</sub>O. Dobiveni su sljedeći podatci:

spoj	površina, relativne jedinice
<i>n</i> -pentan	10.0
<i>n</i> -heksan	24.0
<i>n</i> -heptan	42.0
<i>n</i> -oktan	64.0

Izračunajte sastav smjese u:  
 a) molnim postotcima;  
 b) masenim postotcima.

**rješenje:**

	molni %	maseni %
<i>n</i> -pentan	7.1	10
<i>n</i> -heksan	17.1	20
<i>n</i> -hepan	30.1	30
<i>n</i> -oktan	45.7	40

**11.** Definirajte pojmove:

- eluiranje;
- stacionarna faza;
- vrijeme zadržavanja.

**12.** Objasnite pojmove:

- kromatogram;
- eluat;
- eluens;
- stacionarna faza;
- koeficijent raspodjele.

**13.** Navedite tekućinske kolonske kromatografske metode, vrste pripadnih stacionarnih faza i ravnoteža.

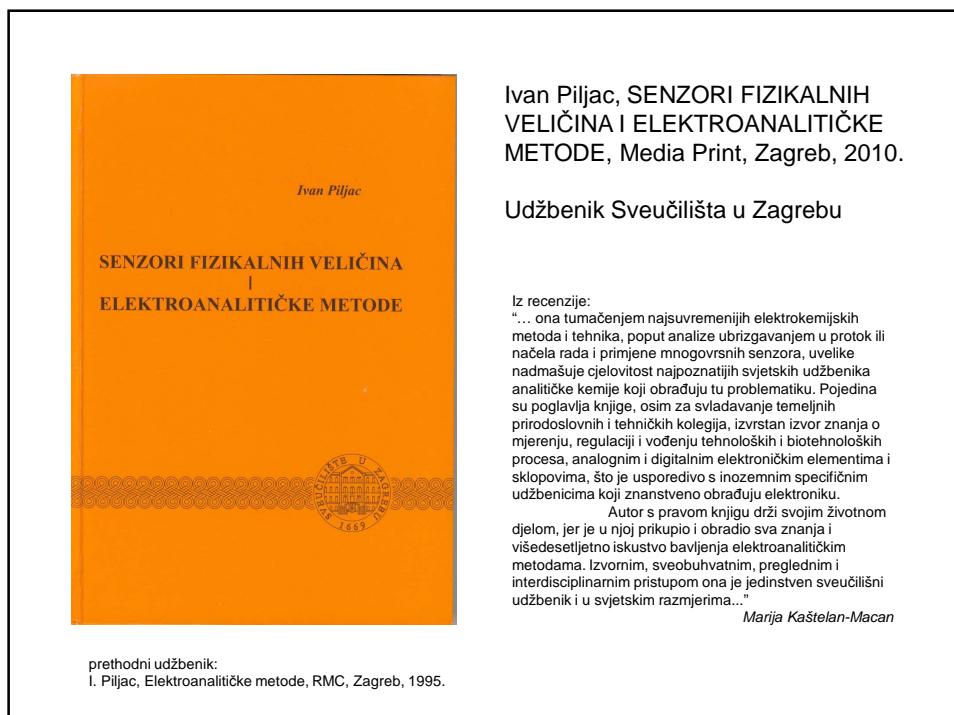
**14.** Na kojim se parametrima temelji kvalitativna, a na kojima kvantitativna kromatografska analiza?

**15.** Koeficijenti raspodjele dvije tvari A i B u kromatografskoj koloni iznose 180, odnosno 225. Koja od dvije tvari će se prva eluirati iz kolone?

<b>ELEKTROANALITIČKE METODE - PREGLED</b>	
<b>ANALITIČKI SIGNAL</b>	<b>ANALITIČKA METODA TEMELJENA NA TOM SIGNALU</b>
električni potencijal	potociometrija, kronopotociometrija
električni naboј	kulometrija
električna struja	polarografija, amperometrija,
električni otpor	konduktometrija

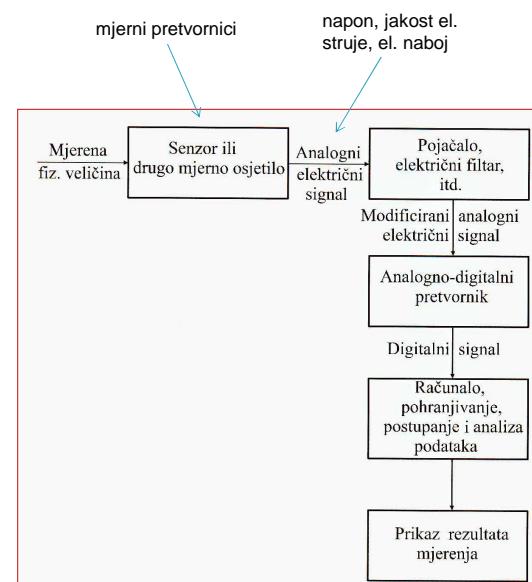
<b>ANALITIČKE TEHNIKE I GLAVNE PRIMJENE</b>		
<b>tehnika</b>	<b>mjereno svojstvo</b>	<b>glavne primjene</b>
elektrokemijska analiza	Električna svojstva analita u otopini.	Kvalitativna i kvantitativna analiza sastojaka od razine glavnog do tragova.



- čovjek i njegova okolina = materija + energija
- stanje i promjene materije i energije → različita svojstva
- svojstva materije i energije koja se mogu mjeriti → mjerljiva svojstva ili fizičke veličine
  - ⇒ na pr. masa, volumen, temperatura, koncentracija, el. naboј, el. napon, frekvencija...
- fizička veličina → mjerjenje → kvantifikacija (jedinice; SI-sustav)
  - ⇒ zahtjevi u mjerjenju sve veći
  - ⇒ standardizacija u kontroli kvalitete procesa i proizvoda
  - ⇒ onečišćenje hrane teškim metalima i patogenim bakterijama → globalni kemijski i biokemijski terorizam
  - ⇒ biomedicina → pojedinačna kontrola analita
  - ⇒ motrenje stanja okoliša
  - ⇒ napredak: kraj 20. st. → povećanje osjetljivosti i pouzdanosti mjerjenja → razvoj novih materijala, minijaturnih elektroničkih sklopova (čip), računalna revolucija
  - ⇒ predviđa: razvoj minijaturnih, inteligentnih, prenosivih mjernih naprava za motrenje stanja okoliša i mjerjenje parametara ljudskog zdravlja u realnom vremenu

načelno → vrijednost fizičke veličine mjeri se usporedbom sa standardom koji sadrži istu fizičku veličinu

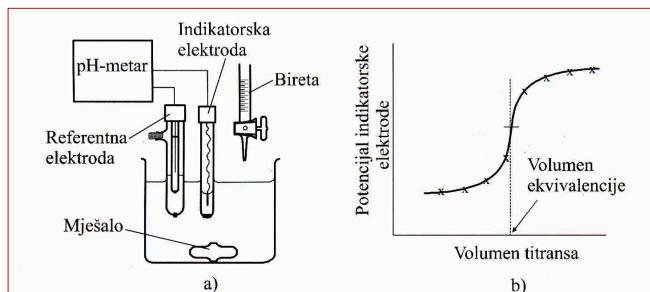
mjerena fizička veličina pretvara se u električnu fizičku veličinu → mjeri pretvornici (elektrode, senzori i drugi mjeri osjetnici)



## POTENCIOMETRIJA

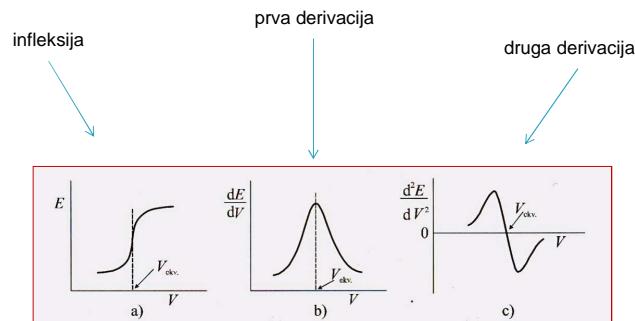
- mjeri se razlika potencijala između elektroda elektrokemijske ćelije uz ravnotežne uvjete
- razlika potencijala mjeri se pomoću potenciometara i voltmetara (pH-metri, plon-metri)
- dvije elektrode: referentna → potencijal ne ovisi o aktivitetima vrsta u ćeliji  
indikatorska → potencijal ovisi o aktivitetu (koncentraciji) jedne ili više vrsta u ćeliji
  - ⇒ indikatorske elektrode → razlika potencijala na dodirnoj površini elektroda-otopina
  - ⇒ kovinske elektrode – redoks reakcija
  - ⇒ selektivne (membranske elektrode) – reakcija prijelaza iona (ionska izmjena, adsorpcija, ekstrakcija na međusloju membrana-otopina i dr.)
  - ⇒ staklena elektroda
  - ⇒ ion-selektivna elektroda sa čvrstom membranom
  - ⇒ ion-selektivna elektroda s tekućom membranom
  - ⇒ univerzalna selektivna elektroda
  - ⇒ elektroda za plinove
  - ⇒ enzimske potenciometrijske elektrode (bio-senzori)

potenciometrijska titracija → u elektrokemijsku se ćeliju dodaje titrans – on reagira s određivanom tvari u ćeliji i mijenja aktivitet molekulske vrste a time i potencijal indikatorske elektrode (postoji automatski titrator)



**Slika 3.33.** Naprava za potenciometrijsku titraciju (a) i oblik promjene potencijala indikatorske elektrode u ovisnosti o volumenu titranta (b)

### Određivanje točke ekvivalencije (završne točke)



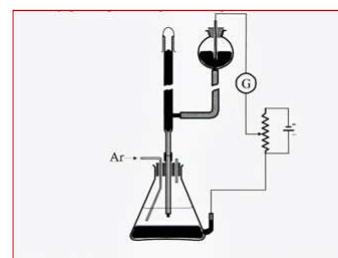
Slika 3.34. Prikazi potenciometrijske krivulje i načini određivanja volumena ekvivalencija

### Vrste titracija

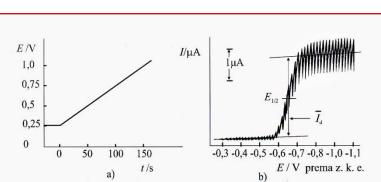
- ⇒ kiselinsko-bazne
- ⇒ kiselinsko-bazne u nevodnim medijima
- ⇒ taložne
- ⇒ kompleksometrijske
- ⇒ redoks

### POLAROGRAFIJA

- klasična polarografija (dc-polarografija) → 1922. god; Jaroslav Heyrovský (Čehoslovačka; 1890-1967.)  
radna elektroda → kapajuća živina  
elektroda  
referentna elektroda → zasićena kalomelova elektroda; živa
- pobudni signal → električni napon
- mjerena fizikalna veličina → električna struja čelije
- mjerena struja čelije kao funkcija narinutog napona ima karakterističan sigmoidni oblik ("S" oblik)
- krivulja struja-napon → polarografski val



Slika 4.1. Shema načela klasične dvoelektrodne polarografije



Slika 4.4. Polarografski val. Signal pobude, tj. linearno rastući napon kojim je polarografski val izazvan (a) i rezultirajući polarografski val kao signal odziva (b).

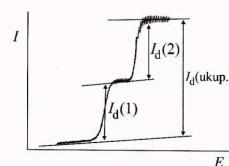


1959. – Nobelova nagrada za otkriće i razvoj polarografskih analitičkih metoda – uručio švedski kralj Gustav Adolf VI

- ⇒ ako se između kapajuće i referentne elektrode narine dovoljno velik napon, on izaziva trenutnu redukciju ili oksidaciju elektroaktivnih čestica na površini elektrode
- ⇒ tada je struja elektrode, tj. struja kroz čeliju odnosno vanjski strujni krug, određena brzinom difuzije elektroaktivnih čestica iz otopine do površine elektrode → difuzijska struja,  $I_d$
- ⇒ difuzijska struja je neovisna o potencijalu ako je on dovoljno velik da prouzroči trenutnu redukciju ili oksidaciju svih elektroaktivnih čestica pridošlih na površinu elektrode

primjena:

- ⇒ određivanje sastava i konstanata stabilnosti kompleksnih vrsta
- ⇒ određivanje smjese više elektroaktivnih tvari



Slika 4.11. Polarogrami dvaju elektroreduktanda kojima se formalni elektrodni potencijali znatno razlikuju

## VOLTAMETRIJA

- ⇒ signal pobude → električni napon
- ⇒ signal odziva → električna struja kao funkcija narinutog napona
- ⇒ voltametrija = skraćenica volt-amper-metrija
- ⇒ napon se linearno mijenja kao funkcija vremena

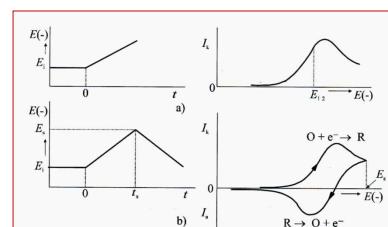
⇒ potencijal radne elektrode → znatno pozitivniji od formalnog elektrodnog redoks sustava elektroaktivne vrste  
→ kroz čeliju protječe samo osnovna struja

⇒ negativiranjem potencijala elektrode raste brzina elektrodne reakcije redukcije

⇒ blizu formalnog potencijala brzina znatno naraste → počinje teći mjerljiva struja čelije → uzlazni dio krivulje odziva

⇒ uz radnu elektrodu dolazi do različitog koncentracijskog profila čestica – kad se iscrpi elektroreduktand ( $O$ ) iz otopine smanjuje se struja odziva

⇒ ciklička voltametrija:  
→ signal pobude mijenja smjer  
→ signal odziva → karakterističan oblik s katodnim i anodnim vrhom



Slika 5.1. Signali pobude i odziva voltametrije (a) i cikličke voltametrije (b)

primjena:

- ⇒ istraživanje elektrokemijskih procesa (mekhanizmi reakcija)
- ⇒ analiza pomoću elektrokemijskih senzora, npr.
- ⇒ u medicini *in vivo* praćenje koncentracije nekih molekulske vrste u organizmu
- ⇒ istraživanje adsorpcije te nastanka i reakcija nekih oksidativnih slojeva na površinama metala

## ELEKTROGRAVIMETRIJA

- ⇒ jedna od najstarijih elektroanalitičkih metoda (dulje od 130 god.)
- ⇒ primjena: kvantitativno određivanje metala u legurama i rudama
- ⇒ temelj: kvantitativno taloženje produkta elektrodne reakcije na radnoj elektrodi čelije
- ⇒ količina određivane tvari utvrđuje se mjerjenjem mase istaložene tvari
- ⇒ radne elektrode velikih površina
- ⇒ otopina se miješa → posjepuje prijenos elektroaktivnih čestica na površinu radne elektrode
- ⇒ vrijeme trajanja: od nekoliko minuta do nekoliko sati
- ⇒ tok elektrodne reakcije na radnoj elektrodi provodi se uz regulaciju potencijala ili uz regulaciju jakosti struje radne elektrode
- ⇒ većina postupaka → proces redukcije iona metala iz otopine i taloženje na površini radne elektrode; rijetko oksidacija
- ⇒ radne elektrode: platinska (od tantala, srebra, bakra, mjeđi... metala koji se taloži)

Tablica 6.1. Pregled važnijih elektrogravimetrijskih određivanja

Ion	Elektrolit	Mjeri se masa izlučenog	Može se odijeliti od
Ag <sup>+</sup>	alkalijski cijanidi	Ag	Cu, Bi, Pb, Cd, Zn i drugih metala
Bi <sup>3+</sup>	HCl + oksalna kis.	Bi	Sn, Pb, Cd, Zn
Cd <sup>2+</sup>	alkalijski cijanidi	Cd	Zn
Cu <sup>2+</sup>	HNO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Cu	Bi, Sb, Pb, Sn, Ni, Cd, Zn
Ni <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> Cl	Ni	Mn, Cr, Al
Pb <sup>2+</sup>	HNO <sub>3</sub>	PbO <sub>2</sub>	Cd, Sn, Ni, Zn, Mn, Al, Fe
Sb <sup>3+</sup>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sb	Pb, Sn
Sn <sup>2+</sup>	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Sn	Cd, Zn, Mn, Fe
Zn <sup>2+</sup>	NaOH	Zn	

## KULOMETRIJA

- ⇒ elektroanalitička metoda u kojoj se količina (koncentracija) određivane tvari utvrđuje mjerjenjem električnog naboja potrebnog za kvantitativnu promjenu oksidacijskog stanja određivane supstancije (oksidacija ili redukcija)
- ⇒ **izravna** kulometrijska analiza → el. naboј s radne elektrode se izravno prenosi na čestice određivane tvari
- ⇒ **neizravna** kulometrijska analiza → druga molekulska vrsta sudjeluje u elektrodnoj reakciji a produkt elektrodne reakcije reagira s određivanom tvari → kulometrijska titracija
- ⇒ elektrodna reakcija → regulacija potencijala radne elektrode ili regulacija jakosti struje
- ⇒ elektrodna reakcija mora teći uz 100 %-tno iskorištenje struje

⇒ temeljna zakonitost: Faradayev zakon

$$Q = zFn = zF \frac{m}{M}$$

- $n$  = količina (mol)
- $m$  = masa (g)
- $Q$  = količina naboja (C; Coulomb)
- $z$  = broj elektrona po čestici elektroaktivne tvari
- $F$  = Faradayeva konstanta (96500 C/mol)
- $M$  = molarna masa



22.09.1791. – 25.08.1867.  
engl. fizičar i kemičar  
elektromagnetizam i  
elektrokemija



14. 07.1736. – 23. 08.1806.  
franc. fizičar

Tablica 7.I. Pregled važnijih kulometrijskih određivanja uz regulaciju potencijala radne elektrode

Određivana tvar	Radna elektroda	Elektrolit	Elektrodna reakcija
Bi	Hg	H-tartarat	$\text{Bi}^{3+} + 3\text{e}^- + \text{Hg} \rightarrow \text{Bi}(\text{Hg})$
Br	Pt	HAc + NaAc	$2\text{Br}^- \rightarrow \text{Br}_2 + 2\text{e}^-$
Cd	Hg	KCl	$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- + \text{Hg} \rightarrow \text{Cd}(\text{Hg})$
Cr	Pt	$\text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{Cr}(\text{VI}) + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}^{3+}$
Cu	Hg	NH <sub>3</sub>	$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- + \text{Hg} \rightarrow \text{Cd}(\text{Hg})$
Fe	Pt	$\text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{Fe}(\text{III}) + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{II})$
Hg	Hg ili Pt	HNO <sub>3</sub>	$\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Hg}$
I	Pt	$\text{H}_2\text{SO}_4$	$2\text{I}^- \rightarrow \text{I}_2$
Pb	Hg	KCl	$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- + \text{Hg} \rightarrow \text{Pb}(\text{Hg})$
Pu	Pt	$\text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{Pu}(\text{III}) \rightarrow \text{Pu}(\text{IV}) + \text{e}^-$
U	Hg	$\text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{U}(\text{VI}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{U}(\text{IV})$
Te	Hg	NaOH	$\text{Te}^{2-} \rightarrow \text{Te} + 2\text{e}^-$
Askorbinska kiselina	Pt	Ftalatni pufer, pH 6	Oksidacija, $z = 2$
DDT	Hg		Redukcija, $z = 2$
Aromatski ugljikovodici	Hg ili Pt	TBAP u DMF <sup>1</sup>	$\text{Ar} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ar}^-$
Aromatski nitro spojevi	Hg	LiCl u DMSO <sup>2</sup>	$\text{ArNO}_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{ArNO}_2^-$
Li	Hg	TBAP u $\text{CH}_3\text{CN}$ <sup>3</sup>	$\text{Li}(\text{I}) + \text{e}^- \rightarrow \text{Li}$

<sup>1</sup> Tetrabutilamonij-perklorat u dimetilformamidu

<sup>2</sup> Dimetilsulfoksid

<sup>3</sup> Tetrabutilamonij-perklorat u acetonitrilu

## KONDUKTOMETRIJA

- ⇒ mjeri se **električna vodljivost** ⇒ brzina prijenosa električnog naboja
- ⇒ **ioni** ⇒ slobodni pokretljivi nositelji električnog naboja u otopinama i talinama
- ⇒ **električna vodljivost elektrolitnih otopina** ⇒ **koncentracija i pokretljivost iona** pod utjecajem električnog polja ⇒ **svi prisutni ioni u otopini sudjeluju u električnoj vodljivosti** ⇒ konduktometrija nije selektivna metoda
- ⇒ **izravno** konduktometrijsko određivanje koncentracije ⇒ ograničena primjena
- ⇒ **konduktometrijska titracija** ⇒ šira primjena (određivanje točke ekvivalencije) → razrijeđene otopine – kiselo-bazne, taložne, kompleksometrijske titracije

### osnovni princip:

- ⇒ dvije metalne elektrode na koje je iz vanjskog izvora doveden električni napon uronjene u elektrolitnu otopinu
  - između elektroda uspostavlja se električno polje
  - putovanje (migracija) iona prema suprotno nabijenim elektrodama = električna struja kroz otopinu
- ⇒ jakost električne struje ( $I$ ) kroz otopinu ovisi o narinutom naponu ( $E$ ) i o električnom otporu ( $R$ ) otopine (Ohmov zakon):  $I = E / R$
- ⇒ **električna vodljivost** otopine ( $G$ ) = recipročna vrijednost električnog otpora:  $G = \frac{1}{R} = \frac{I}{E}$   
jedinica = Siemens ⇒  $S = \Omega^{-1}$

električna vodljivost otopine u konduktometrijskoj ćeliji ovisi o:

- koncentraciji iona,
- pokretljivosti iona,
- presjeku stupca otopine između elektroda (tok električne struje),
- razmaku između elektroda ćelije:

$$G = \kappa \frac{A}{l}$$

**električna provodnost ili električna konduktivnost** =  $\kappa$  (kappa, grč.)

$A$  = plošina presjeka otopine kroz koji se odvija tok struje

$l$  = razmak između elektroda ćelije

$I/A \Rightarrow$  određuje se eksperimentalno = **konstanta ćelije,  $C$**  (mjerenjem vodljivosti otopine točno poznate električne provodnosti – najčešće otopina KCl – kontrolirana temperatura)

$$\kappa = G \cdot C$$

jedinica (SI)  $\Rightarrow S \ m^{-1} (S \ m^{-1} = \Omega^{-1} \ m^{-1}) \Rightarrow$  najčešće  $S \ cm^{-1}$

**molarna provodnost elektrolita ( $A$ )** povezuje električnu provodnost i koncentraciju otopine:

$$A = \frac{\kappa}{c}$$

$c$  = koncentracija elektrolita koja se izražava u ekvivalentnim jedinkama po električnom naboju (jedinka je dio iona koji ima jedinični nabojni broj)