

# Plynová chromatografie

## C5060 Metody chemického výzkumu

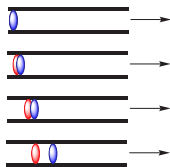
Jaromír Literák

Ústav chemie PŘF MU

6. 11. 2020

# Plynová chromatografie

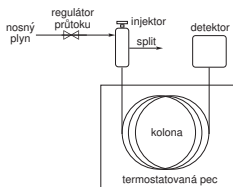
**Chromatografie** je skupina separačních metod, jejichž společným znakem je rozdělování molekul složek směsi mezi stacionární a mobilní fázi. Dělení je založeno na rozdílné rychlosti pohybu jednotlivých látek s mobilní fází v důsledku odlišné distribuce látek mezi mobilní a stacionární fázi.



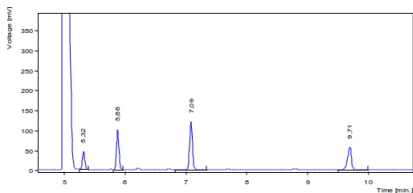
**Plynová chromatografie** (GC – Gas Chromatography) je omezena tenzí par analyzovaných látek a jejich stabilitou za vyšších teplot (při teplotách do 400–450 °C). Odhaduje se, že lze pomocí GC analyzovat 10–20 % všech známých látek.

# Plynový chromatograf

Nosný plyn = mobilní fáze; Split = dělič toku; GLC = gas-liquid chromatography; GSC = gas-solid chromatography

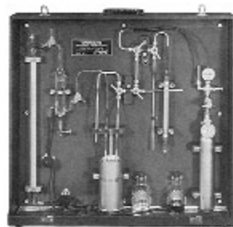
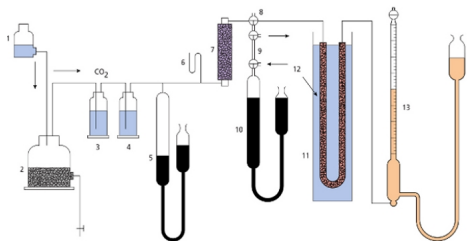


V počátcích plynové chromatografy s **náplňovými kolonami**, v současnosti dominují **kapilární kolony**.



# Plynový chromatograf

První patentovaný plynový chromatograf sestavil v Brně v roce 1952 **prof. Jaroslav Janák** (1924–2020).



# Jaroslav Janák



# Retenční charakteristiky látky

**Retenční čas  $t_r$**  – celkový čas, který analyt stráví v chromatografické koloně.

**Mrtvý čas kolony  $t_m$**  –  $t_r$  látky, která není v koloně zadržována a pohybuje se stejnou rychlostí jako mobilní fáze.

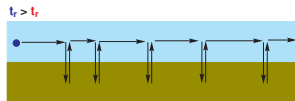
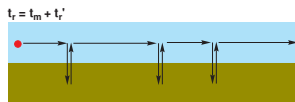
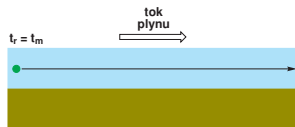
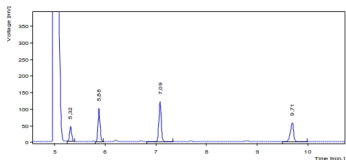
**Redukovaný retenční čas  $t'_r$**

$$t_r = t_m + t'_r$$

**Kapacitní poměr  $k$**

$$k_i = \frac{n_{stac}}{n_{mob}} = \frac{t'_r}{t_m}$$

kde  $n_{stac}$  a  $n_{mob}$  jsou rovnovážná látková množství látky ve stacionární a mobilní fázi.



# Rozlišení

Kapacitní poměr  $k$  je přímo úměrný **distribuční konstantě**  $K_D$  látky mezi danou stacionární a mobilní fází.

$$K_D = \frac{C_{stac}}{C_{mob}} = \frac{n_{stac}}{n_{mob}} \times \frac{V_{mob}}{V_{stac}} = k \times \frac{V_{mob}}{V_{stac}}$$

kde  $C_{stac}$  a  $C_{mob}$  jsou rovnovážné koncentrace dané látky ve stacionární a mobilní fázi,  $V_{stac}$  a  $V_{mob}$  jsou objemy mobilní a stacionární fáze.

## Rozlišení ( $R$ ):

$$R = 2 \times \left( \frac{t_{r2} - t_{r1}}{w_{b1} + w_{b2}} \right) = 1,18 \times \left( \frac{t_{r2} - t_{r1}}{w_{h1} + w_{h2}} \right)$$

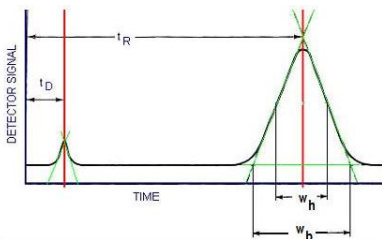
kde

$t_r$  – retenční čas píku

$w_h$  – šířka píku v polovině jeho výšky (v jednotkách času)

$w_b$  – šířka píku u základny (v jednotkách času)

# Rozlišení



Rozlišení je funkcí termodynamických i kinetických faktorů, závisí na **počtu teoretických pater  $N$**  a **separačním faktoru  $\alpha$**  (kapacitním poměru).

**Separační faktor  $\alpha$**  pro látky  $i$  a  $j$ :

$$\alpha = \frac{k_i}{k_j}$$

$$k_i > k_j$$



# Vyjádření účinnosti separace

## Počet teoretických pater kolony ( $N$ ):

$$N = 5,545 \times \left( \frac{t_r}{w_h} \right)^2$$

kde  $t_r$  je retenční čas píku a  $w_h$  – šířka píku v polovině jeho výšky (v jednotkách času).

Počet teoretických pater je ovlivněn retencí látek,  $N$  je vyšší pro dříve eluující látky. Závisí také na teplotě. Pro výpočet  $N$  se užívají látky s  $k > 5$ .

## Výškový ekvivalent teoretického patra ( $H$ nebo také $HETP$ ):

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

kde

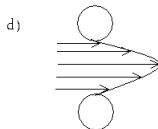
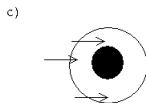
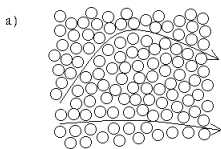
$L$  – délka kolony

$N$  – počet teoretických pater

# Mechanismy rozšiřování zón analytu na chromatografické koloně.

Hlavní mechanismy rozšiřování zón analytu na chromatografické koloně.

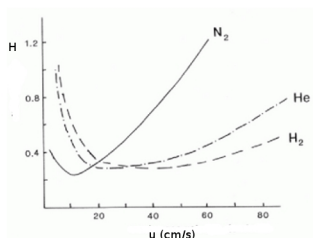
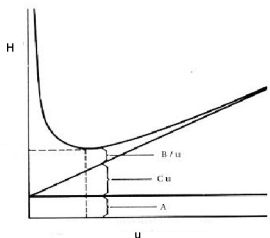
- Vířivá difúze
- Podélná molekulární difúze
- Odpor proti přenosu hmoty ve stacionární fázi
- Odpor proti přenosu hmoty v mobilní fázi



# van Deemterova rovnice

$$H = A + \frac{B}{u} + C \times u$$

kde  $u$  zastupuje lineární rychlost pohybu mobilní fáze, konstanta  $A$  zastupuje vířivou difúzi,  $B$  podélnou difúzi a  $C$  odpor proti přenosu hmoty jak ve stacionární tak i mobilní fázi.

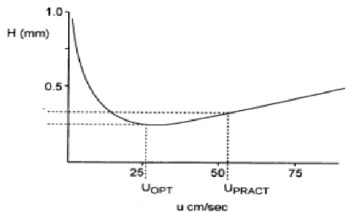


V kapilárních kolonách je málo významná vířivá difúze → **Golayova rovnice**.

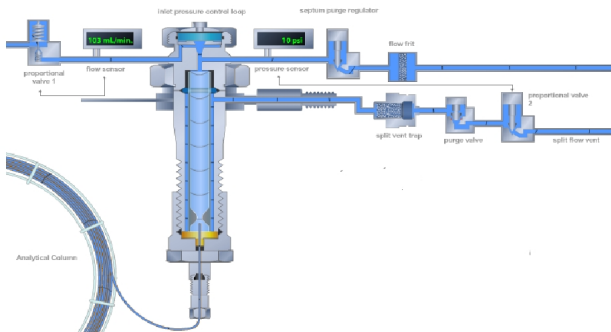
# van Deemterova rovnice

- **Optimální rychlost průtoku mobilní fáze  $u_{opt}$**  odpovídá minimu na křivce van Deemterovy závoslosti a zaručuje maximální rozlišení.
- **Praktická optimální rychlost průtoku mobilní fáze  $u_{pract}$**  – kompromis mezi optimálním rozlišením a rychlostí analýzy.

$$u_{pract} = 1,5 - 2,0 \times u_{opt}$$



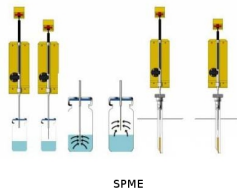
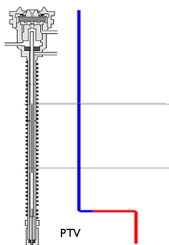
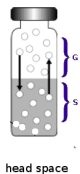
# Plynový chromatograf – Inlet



- Nástřik se splitem / bez splitu
- Nástřik na kolonu

# Plynový chromatograf – Inlet

- Head Space analýza
- PTV – Programmed Temperature Vaporising
- SPME – Solid Phase Micro Extraction



# Plynový chromatograf – Split

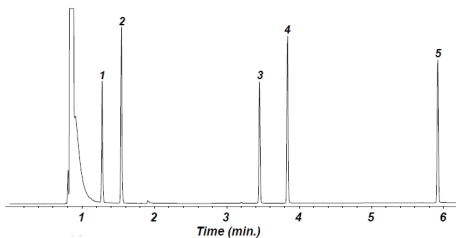
- **Nástřik bez splitu (splitless)** – stopová analýza. Split aktivován určitou dobu po nástřiku.
- **Nástřik se splitem** – vhodné pro koncentrované vzorky.
- **Splitovací poměr** – poměr toku splitovacím ventilem a kolonou.

Doporučené splitovací poměry:

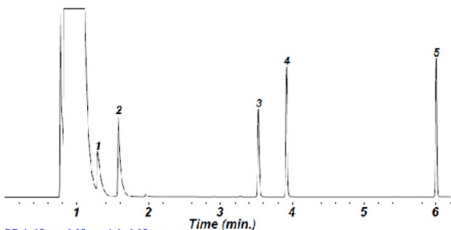
Vnitřní průměr kolony / mm	Splitovací poměr
0,10	1:50–1:75
0,19–0,25	1:10–1:20
0,32	1:8–1:15
0,53	1:2–1:5

# Vliv splitovacího poměru

## 50:1 Split Ratio



## 5:1 Split Ratio

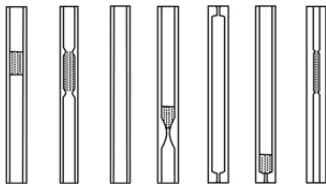


DB-1, 15 m x 0.25 mm i.d., 0.25  $\mu$ m  
60°C for 1 min, 60-180°C at 20°/min; Helium at 30 cm/sec  
1. n-heptane 2. toluene 3. n-decane 4. n-butylbenzene 5. n-tridecane



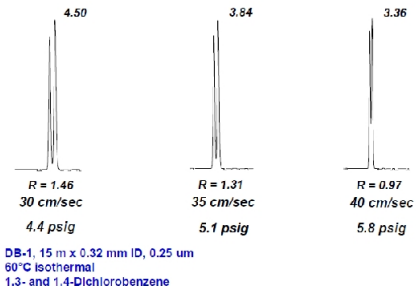
# Plynový chromatograf – Inlet

- **Objem nástřiku** – Obvykle 1–3  $\mu\text{l}$ , zplyněný vzorek by měl zaplnit max. 75 % objemu lineru (backflash problém!). Neexistuje přímá úměra mezi nastříkovaným objemem a plochou píku.
- **Teplota inletu** – Dostatečná pro evaporaci vzorku, obvykle 200–300 °C.
- **Typ lineru** – Podle způsobu nástřiku.



# Nosný plyn

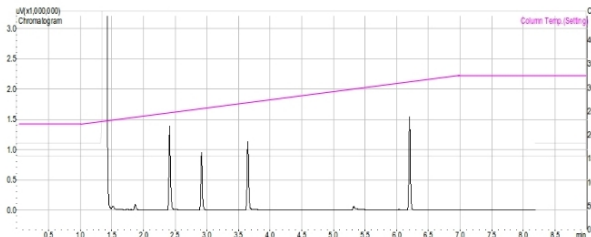
- Výrazný vliv má **typ nosného plynu** a jeho **průtok**.



Nosný plyn	Výhody	Nevýhody
Vodík	Levný, účinné dělení	Explozivní
Dusík	Levný	Horší dělení látek
Helium	Účinné dělení, nehořlavý	Drahý

# Teplotní program pece

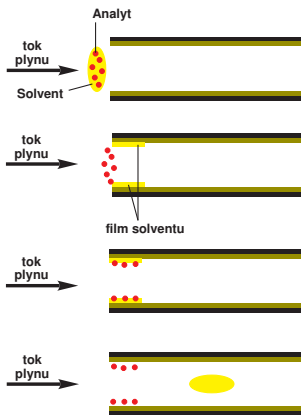
- Podstatný faktor ovlivňující kvalitu rozdělení látek a délku analýzy.
- **Teplotní gradient** je užitečný při dělení látek výrazně se lišících těkavostí nebo silou specifických interakcí se stacionární fází.



- Separaci látek lze zlepšit **zvýšením rozdílu v  $t_r$**  (změna teploty a  $K_D$ ) a také **zúžením píků** (změna rozměrů kolony, rychlost průtoku nosného plynu).

# Refokusování vzorku

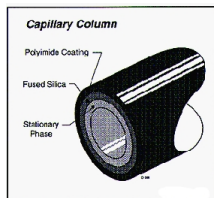
- Technika užívaná ke **zúžení šířky píků**, obzvláště při **splitless** nástřiku a těžkých analytech.
- Počáteční teplota kolony je o **10 °C** nižší, než **teplota varu rozpouštědla**.
- Podobného efektu dosáhneme, pokud je počáteční teplota kolony min. o **150 °C** nižší, než **teplota varu analytů**.



# Stacionární fáze

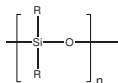
## Kapilární GC kolony

Vnitřní průměr / mm	Označení
0,10	Minibore
0,19–0,25	Narrow
0,32	Wide
0,45	High speed megabore
0,53	Megabore

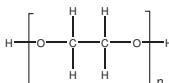


## Složení stacionární fáze

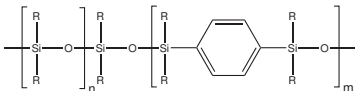
- **Zesíťované** (crosslinked) a **vázané** (bonded) stacionární fáze
- **Low bleed** columns



Polysiloxany



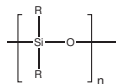
Polyethylenglykol (PEG)

Siaryleny  
(low bleed "MS" columns)

# Povaha stacionární fáze

## Základní druhy interakce analytu se stacionární fází:

- Disperzní síly (van der Waalsovy síly)
- Interakce dipólů molekul
- Vodíkové vazby



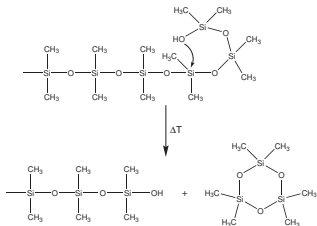
Polysiloxany

R	Druh interakce		
	Disperzní	Dipolární	Vodíkové můstky
Methyl	Silné	Žádné	Žádné
Fenyl	Silné	Slabé	Slabé
Kyanopropyl	Silné	Velmi silné	Slabé
Trifluormethyl	Silné	Dobré	Slabé
PEG	Silné	Silné	Dobré

- S tloušťkou vrstvy stacionární fáze roste kapacita a účinnost dělení.

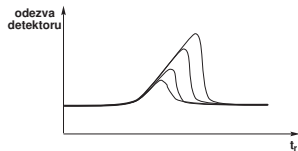
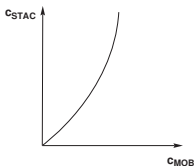
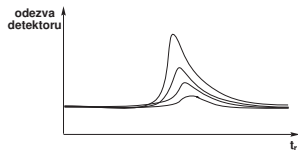
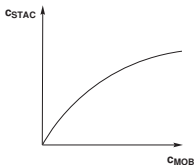
# Povaha stacionární fáze

- Běžně se užívají **nepolární stacionární fáze**, u nichž převládají disperzní interakce – pořadí eluce látek odpovídá jejich těkavosti (tenzi par). Tyto fáze jsou také chemicky stabilnější.
- V případě obtížného dělení látek volíme mobilní fázi podle zásady *similia similibus solvuntur*.
- Chemické poškození stacionární fáze:**
  - Kyslík
  - Silné anorganické kyseliny (HCl, HBr, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>), báze (NH<sub>3</sub>) a organické kyseliny (CF<sub>3</sub>COOH)
- Tepelné poškození stacionární fáze**
- Poškozený řetězec polysiloxany může **depolymerovat**:



# Povaha stacionární fáze

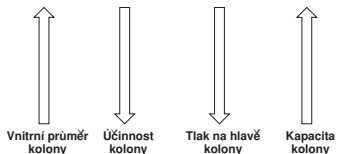
- GC v tomto uspořádání je příkladem **rozdělovací chromatografie**, každá látka je charakterizována **distribuční konstantou** mezi mobilní a stacionární fází  $K_D$ .
- V případě, že  $K_D$  **nezávisí na koncentraci**, je **distribuční isoterma lineární** a pík má ideální **zvonovitý tvar**.
- **Nelineární isotermy:**



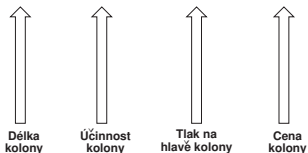


# Vliv délky a vnitřního průměru kolony

Vliv **vnitřního průměru** kolony:

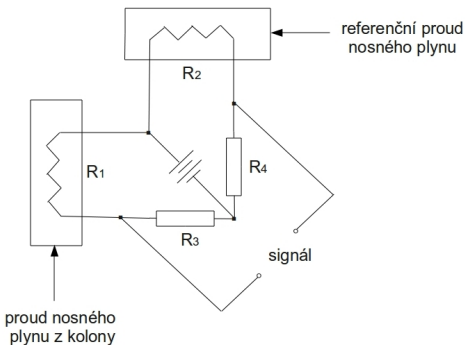


Vliv **délky** kolony:



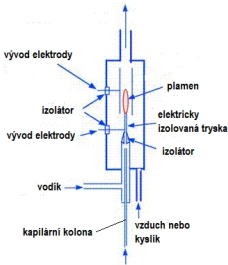
# Teplotně vodivostní detektor

**Teplotně vodivostní detektor (TCD, katharometr)** – Detektor obsahuje zahříváné odporové vlákno, které se ochlazuje protékajícím plynem, čímž se mění jeho elektrický odpor. V praxi se vedle sebe zapojují dva TCD detektory, do jedné z měrných cel se přivádí čistý nosný plyn, do druhé plyn vycházející z kolony. Relativně málo citlivý typ detektoru.



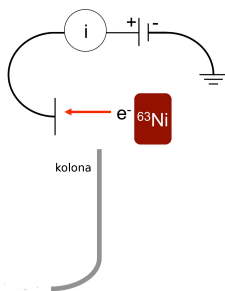
# Plamenově ionizační detektor

**Plamenově ionizační detektor (FID)** – Plyn z chromatografické kolony je zaváděn do kyslíko-vodíkového plamene, kde probíhají během hoření ionizační reakce vedoucí ke vzniku iontů, které se detekují na polarizovaných elektrodách. Proudové pozadí je mezi  $10^{-13}$  a  $10^{-14}$  A, zatímco proud generovaný po spálení analytů je v rozmezí  $10^{-12}$ – $10^{-6}$  A. FID poskytuje odezvu téměř na všechny organické látky, pro uhlovodíky je odezva úměrná počtu uhlíkových atomů v molekule. Odezvu nedává většina anorganických plynů a par a některé organické látky (formaldehyd,  $\text{CCl}_4$ ).



# Detektor elektronového záchytu

**Detektor elektronového záchytu (ECD)** – Selektivní detektor vysoce citlivý na elektronegativní atomy a skupiny, zejména na halogeny. Nosný plyn (dusík) je vlivem  $\beta$  záření v detektoru ionizován, čímž vzniká konstantní proud. Zdrojem  $\beta$  záření jsou  $^3\text{H}$  nebo  $^{63}\text{Ni}$ . Elektronegativní atomy v analytu zachycují pomalé elektrony, čímž dochází ke snížení ionizačního proudu.

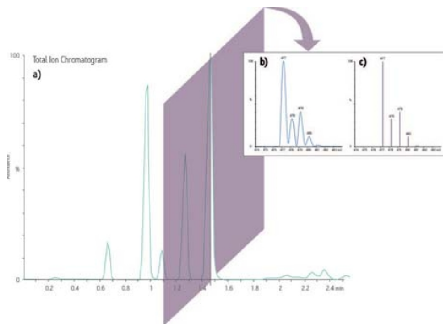


# Hmotnostní detektor

Jako detektor v plynové chromatografii může sloužit **hmotnostní spektrometr (MS)**, který poskytuje vedle chromatogramu hmotnostní spektra analytů. Existuje několik typů MS, používají se také jejich kombinace (MS/MS).

Hmotnost iontů vyjadřována jako  $m/z$ .

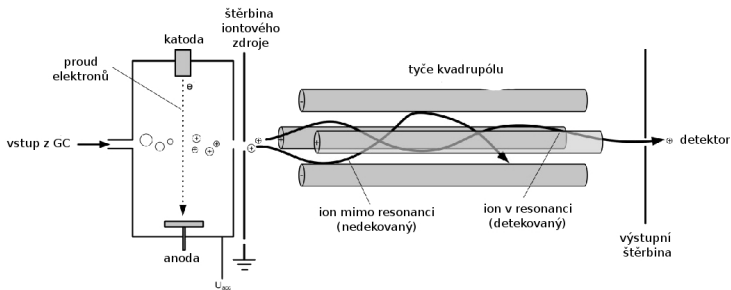
- Sektorový hmotnostní spektrometr
- TOF (Time of flight)
- Kvadrupólový hmotnostní spektrometr
- Iontová past
- Orbitrap
- Iontová cyklotronová resonance



# Hmotnostní detektor

- Většina GC-MS technik využívá **elektronovou ionizaci** nebo **chemickou ionizaci**.
- Průtok mobilní fáze omezen požadavkem na vysoké vakuum v MS.

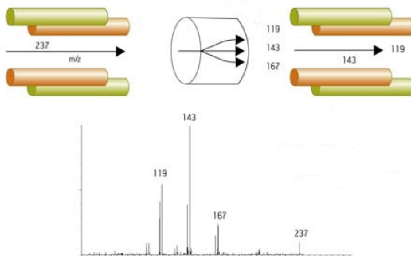
př.: hmotnostní spektrometr s kvadrupólovým hmotnostním filtrem a elektronovou ionizací:



# Hmotnostní detektor

- MS jako detektor může pracovat v režimu **scanu** – měří hmotnostní spektrum v zadaném rozmezí hmot, nebo jsou sledovány pouze **vybrané ionty** (SIM/SIR).
- Spektrometry s vysokým rozlišením umožňují stanovit sumární vzorec.
- Možnost MS/MS.

př.: hmotnostní spektrometr s dvěma kvadrupólovými hmotnostními filtry:



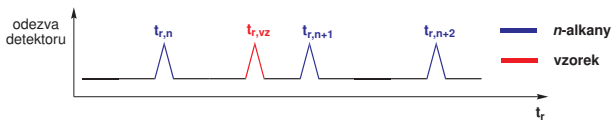
# Kvalitativní analýza – retenční indexy

Při kvalitativní analýze se identifikace analytu provádí na základě srovnání retenčních dat analytu a standardu. Za stejných experimentálních podmínek je charakteristikou látky její **retenční čas**  $t_r$ , respektive **retenční objem**  $V_r$ , což je objem mobilní fáze, který musí projít kolonou, aby se příslušný analyt dostal od počátku ke konci chromatografické kolony.

Univerzálnější charakteristikou je **kapacitní poměr** dané látky.

## Retenční indexy (Kováčovské indexy)

Přepočítání retenčního času (objemu) neznámé látky na index, jehož hodnota **nezávisí na chromatografickém systému** a lze jej tabelovat a srovnávat. Retenční chování vztahujeme na řadu  $n$ -alkanů:





# Kvalitativní analýza – retenční indexy

Retenční index referenčních  $n$ -alkanů se vypočítá jako stonásobek počtu uhlíku v molekule daného  $n$ -alkanu; např. retenční index propanu je 300. Při **isotermní analýze** získáme retenční index látky nacházející se mezi dvěma nejbližšími homology  $n$ -alkanů o počtu atomů uhlíku  $n$  a  $(n+1)$ :

$$RI = 100 \times n + 100 \times \frac{\log(t'_{r,vz}) - \log(t'_{r,n})}{\log(t'_{r,n+1}) - \log(t'_{r,n})}$$

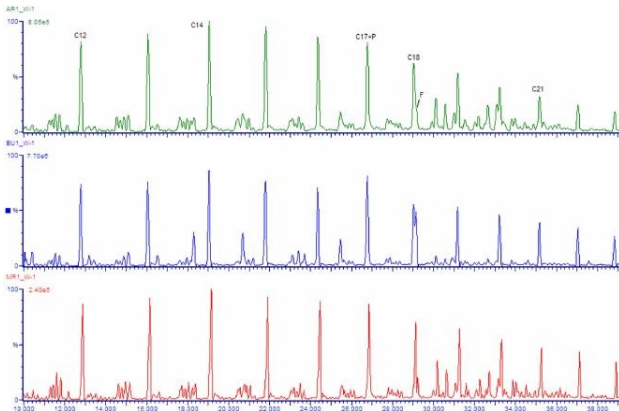
kde  $t'_r$  jsou příslušné redukované retenční časy a  $n$  je počet atomů uhlíku v molekule lehčího  $n$ -alkanu.

Při **analýze s teplotním programem** získáme retenční index vzorku z rovnice:

$$RI = 100 \times n + 100 \times \frac{t'_{r,vz} - t'_{r,n}}{t'_{r,n+1} - t'_{r,n}}$$

# Fingerprinting

Užitečné v případě, kdy nesledujeme určení identity neznámé látky, ale jde nám o určení identity a původu směsi látek. Typickým příkladem jsou směsi uhlovodíků ropného původu. Uplatní se metoda otisku palce, „fingerprint“, kdy se srovnává **profilové složení** vzorku s referenčními směsmi, podle kterého se dá usoudit na původ vzorku.



# Kvantitativní analýza

Plocha pod píkem látky je přímo úměrná množství látky. Koeficient úměry (response factor) se liší pro různé látky.

- **Metoda vnitřní normalizace.**
- **Metoda standardního přidavku** – ke vzorku se přidává známé množství stanovované látky. Z plochy analytu ve vzorku s a bez přidavku lze vypočítat koncentraci.
- **Absolutní kalibrace** – pro přesnost je kritický objem nástřiku. Kalibrační přímka:

$$A_i = k_i \times c_i + b$$

kde  $A_i$  je plocha signálu analytu  $i$ ,  $c_i$  je koncentrace analytu  $i$ ,  $k_i$  je response factor a  $b$  konstanta.

# Kvantitativní analýza

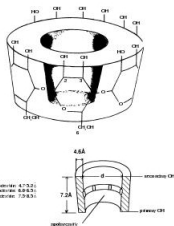
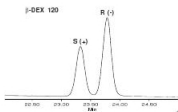
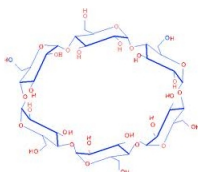
- **Metoda vnitřního standardu** – ke vzorku se přidává známé množství vnitřního standardu. Kalibrační přímka:

$$\frac{A_i}{A_{istd}} = k_i \times \frac{c_i}{c_{istd}} + b$$

kde  $A_i$  je plocha signálu analytu  $i$ ,  $A_{istd}$  je plocha signálu vnitřního standardu,  $c_i$  je koncentrace analytu  $i$ ,  $c_{istd}$  je koncentrace vnitřního standardu,  $k_i$  je response factor a  $b$  konstanta.

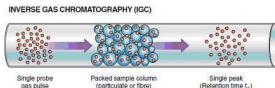
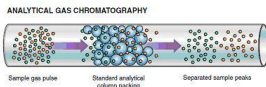
# Separace enantiomerů

- Stacionární fáze modifikovaná chirálními látkami (deriváty cyklodextrinů).
- Důležitá je **entropická stránka** interakce mezi analytem a stacionární fází → nejlépe isothermní separace, optimalizace teploty.



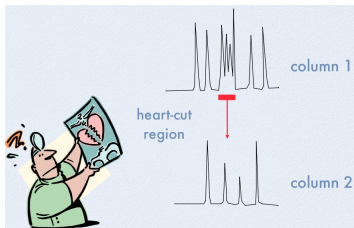
# Inverzní chromatografie

- Obvykle varianta GSC – adsorpční chromatografie.
- Podobné instrumentální provedení jako analytická GC, cílem však není rozdělit směs látek, ale na základě retenčních charakteristik známé látky vnesené do proudu nosného plynu **charakterizovat povrch stacionární fáze**.
- Detektorem TCD, FID, ECD, MS.
- Charakterizace povrchů materiálů, charakterizace polymorfů krystalických látek. Identifikace kyselých, bazických nebo polárních skupin na povrchu.



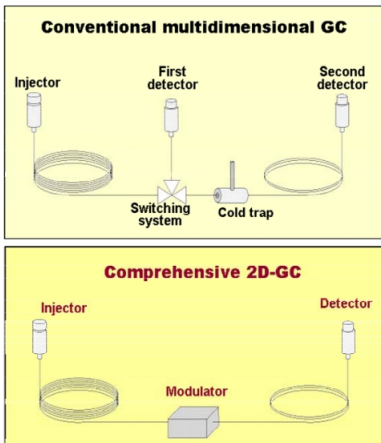
# Dvoudimenzionální GC

- Současné kapilární kolony mají okolo 100.000 teoretických pater a jsou blízko hranic svých možností.
  - Dvoudimenzionální GC – **obracení průtoku** mobilní fáze nebo **využití dvou kolon**.
  - Zvýšení **kapacity** – počtu látek ve směsi, které chromatograf je schopen rozdělit. Teoreticky je celková kapacita součinem kapacit v jedné a druhé dimenzi.
- 
- Potřeba separace složitých směsí (přírodní látky, environmentální vzorky, petrochemické produkty).
  - Možnost výrazně zlepšit separaci látek s využitím dvou běžných chromatografických kolon s odlišnými fázemi.
  - **Heartcutting** (cut and transfer)



# Dvoudimenzionální GC

**Comprehensive 2D GC** – každý z píků v jedné dimenzi je přenesen samostatně na druhou kolonu.

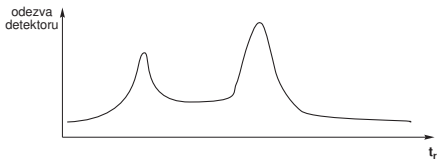




# Derivatizace

**Derivatizace** – úprava vlastností látek tak, aby je bylo možné stanovit pomocí GC. Problematické jsou:

- Nízká volatilita sloučenin (skupiny  $-OH$ ,  $-NH-$ ,  $-SH$ ,  $-COOH$ ).
- Vysoká volatilita.
- Deformovaný tvar píku, špatná separace látek, nízká citlivost detektoru.
- Adsorpce látek na aktivních površích uvnitř chromatografu.
- Nízká tepelná stabilita.



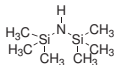
Někdy je potřeba také deaktivovat povrchy uvnitř chromatografu, např. liner a skleněnou vatu v lineru.

# Derivatizace

**Silylace** – zavedení  $-\text{SiR}_3$  skupiny na nukleofilní atomy.



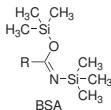
Silylační činidla jsou citlivá na vlhkost. Příklad silylačních činidel:



HMDSA



TMSC



BSA



TMSI

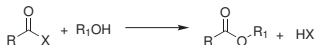
Zbytky silylačních činidel mohou poškodit některé typy stacionárních fází (PEG). Vzorek také může obsahovat  $\text{R}_3\text{Si-O-SiR}_3$  (produkt hydrolyzy silylačního činidla).

Silylace Si-OH skupin na povrchy skla – jeho **deaktivace**.

# Derivatizace

**Acylace** – zavedení  $-C(O)R$  skupiny na nukleofilní atomy. Produkty acylace jsou obvykle odojnější vůči hydrolyze než produkty silylace. Deriváty obsahující zbytek halogenované kyseliny zvyšují citlivost ECD detektoru.

Reakce s anhydridy nebo halogenidy kyselin – reakcí vzniká kyselina, kterou je potřeba před stanovením odstranit.



**Alkylace** – zavedení alkylové skupiny na nukleofilní atomy, nejčastěji methylace.

Methylační činidla:

