

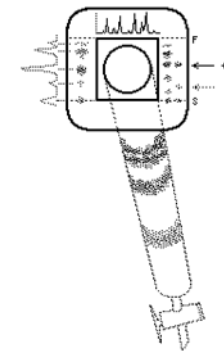
KJ2050 Analytisk kjemi, GK

(Analyse ved kromatografisk separasjon)

1. Innledning (og noe terminologi)
2. Noe generell teori
 - A. Retensjonsparametere
 - B. Sonespredning
 - C. Sonespredningsmekanismer *(fysiske årsaker til sonespredning)*
- 3. Korte innføringer til spesifikke teknikker**
 - A. Væskekromatografi (*Liquid Chromatography, LC*)
 - a) Innledning
 - b) Instrumentering
 - B. Gasskromatografi (*Gas Chromatography, GC*)**
 - a) GSC vs. GLC
 - b) Instrumentering
4. Kromatografi i analyser

3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (Gas Chromatography, GC)



Den mobile fasen, MF, er en gass.

Den stasjonære fasen, SF, er
en væske – fordelt utover overflaten av et fast bærematerial (GLC),
eller
et fast (porøst) adsorpsjonsmiddel (GSC);



1950-tallet (?)

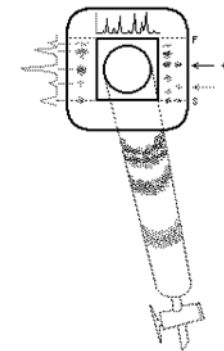


2010-tallet (?)

Google pictures (Nov. 2013)

3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (Gas Chromatography, GC)



Den mobile fasen, MF, er en gass.

Den stasjonære fasen, SF, er

en væske – fordelt utover overflaten av et fast bærematerial (GLC),

eller

et fast (porøst) adsorpsjonsmiddel (GSC).

Viktig forskjell i forhold til væskekromatografi (LC) :

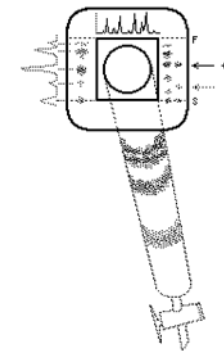
MF'en i GC ("bæregassen"):

... er ut av stand til å solvatisere analytter – kan ikke "hjelp" dem med å være i MF'en / i gassfasen !

... kan ikke gi intermolekylære stabiliserende vekselvirkninger, (i motsetning til væsker, f.eks. i SF'en (i GC eller LC) , eller i MF ved LC).

3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (Gas Chromatography, GC)



3. B. a) Gass-faststoff- og Gass-væske-kromatografi (hhv. GSC & GLC):

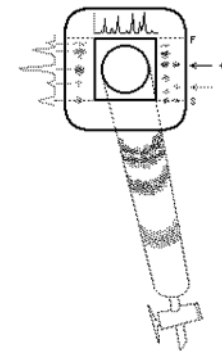
I **GSC** (Gass-faststoff kromatografi) er retensjonen vanligvis sterk !

Dette p.g.a. sterke intermolekulære krefter / vekselvirkninger mellom analytter og SF'en (og ingen tilsvarende mellom analyttene og MF).

Analyttene blir ikke, som i LSC, utsatt for sterk konkurranse om adsorpsjonssetene fra MF-molekyler, og blir heller ikke, ved "overflytting" til MF, "kompensert" ved energi-gevinsten fra solvatiseringen med MF-molekylene (som det skjer ved LSC, i motsetning til GSC).

GSC er derfor bare anvendbar på stoffer som har et **høyt damptrykk i utgangspunkt**, har dermed et begrenset , men viktig anvendelsesområde der:
for permanente gasser , løsningsmidler og VOC's (Volatile Organic Compounds).

GSC er komplementær til GLC, som har i minste laget med retensjon for akkurat disse typer analytter.



3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (Gas Chromatography, GC)

3. B. a) Gass-faststoff- og Gass-væske-kromatografi (hhv. GSC & GLC):

Prinsipp for ***gass(-væske-)kromatografi***, GC (GLC) (GC "by default"):

Fordeling av prøvekomponentene mellom to homogene faser.

SF = væske - MF = gass.

Retensjonen er avhengig av analyttenes "løselighet" i *gassfasen*, som er bestemt :

- primært damptrykket av prøvekomponentene ("kokepunkt" av prøven) over SF;
- litt mindre av adsorpsjon (i GSC)
- enda litt mindre av løseligheten i SF-væskefilmen (i GLC)
= damptrykk fin-justert av interaksjoner med SF - "likt løser likt" for SF
- ± uavhengig av bæregassens natur (MF).

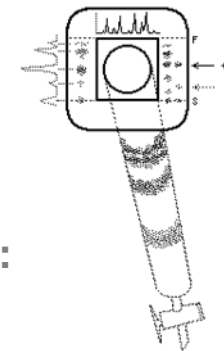
Hovedfaktoren ved praktisk gasskromatografi:

TEMPERATUREN

da den bestemmer damptrykket av prøven .

3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (Gas Chromatography, GC)



3.B. a). Gass-faststoff- og Gass-væske-kromatografi (hhv. GSC & GLC):

Hovedfaktoren ved praktisk gasskromatografi:

TEMPERATUREN

da den bestemmer damptrykket av prøven :

Forutsetninger for vellykket GLC: **prøven** må ...

- være (relativt) **flyktig**,
- være (relativt) **stabil**
(=overleve injektor- og/eller kolonnetemperaturer opp til 200-300C i noen sekunder og/eller minutter)
- ha en viss **løselighet** i stasjonær-fase-væsken.
- Helst ikke inneholde ikke-flyktige komponenter.

NB.1 : Bærematerialet, som trengs for å "immobilisere" SF'en (holde på plass), bør ikke alt for "være aktivt" selv (ikke adsorbere analyttene).

NB.2 : Forskjell i løselighet som ulike analytter har i ulike SF'er kan utnyttes til å "finpusse" på selektiviteten/ separasjonen (/oppløsningen) .

3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (Gas Chromatography, GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :

Gasskromatografen - oversikt

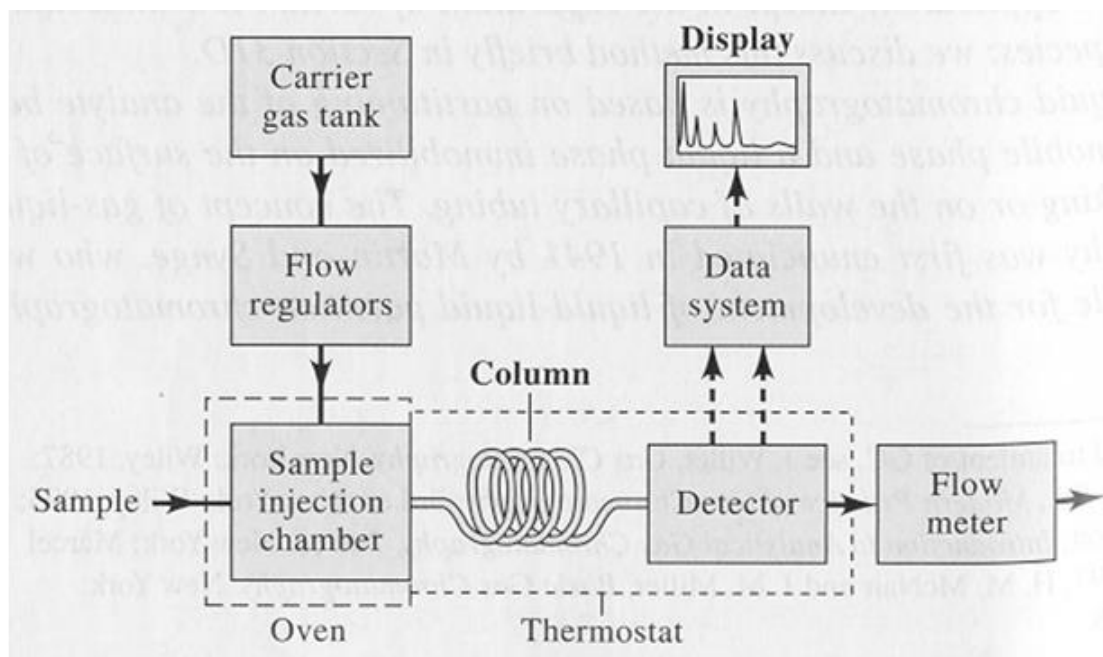
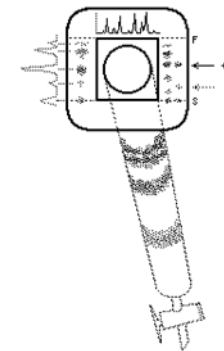
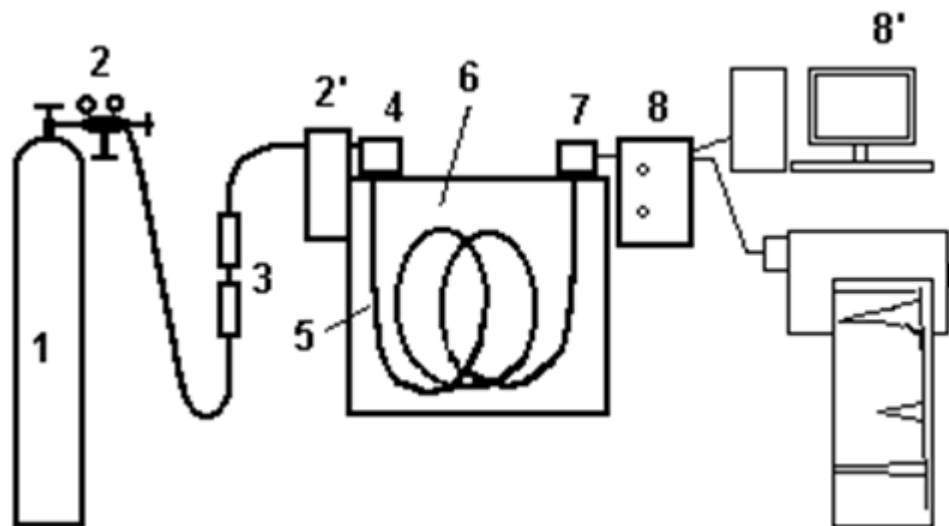


Figure 31-1 Block diagram of a typical gas chromatograph.

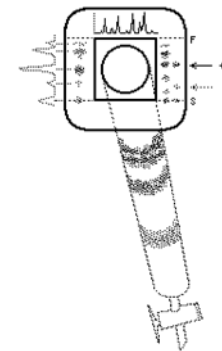
3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (Gas Chromatography, GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :



- | | |
|--------------------|---------------------------------------|
| 1 Bæregass | 6 GC-ovn, kolonne-
temperativering |
| 2 Gassregulering | 7 Detektor |
| 3 Evt. Gassrensing | 8 Data-lagring/
analyse/utskrift |
| 4 Injektor | |
| 5 Kolonnen | |



Detektor ↓ ↓ Injektor



Kolonneovn ↑ med "kapillær-
GC kolonne"

3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :

3. B. b. 1 Bæregass - den mobile fasen

- Bæregassen transporterer analyttene gjennom kolonnen, forbi SF'en.
- Ingen kjemiske vekselvirkninger mellom prøver og MF (ingen solvatisering el.l.).
- Valg av bæregass har ingen innflytelse på analytt-selektivitetene (k , α) i GC.

Vanligste bæregass :

H₂, He, N₂ ;

(sjelden: Ar, CH₄, (CO₂ SFC))

Valg av gass bestemmer :

- Størst effektivitet (lavest H): N₂
- Høyere effektivitet ved høyere gasshastigheter (raskere analyser): He og H₂

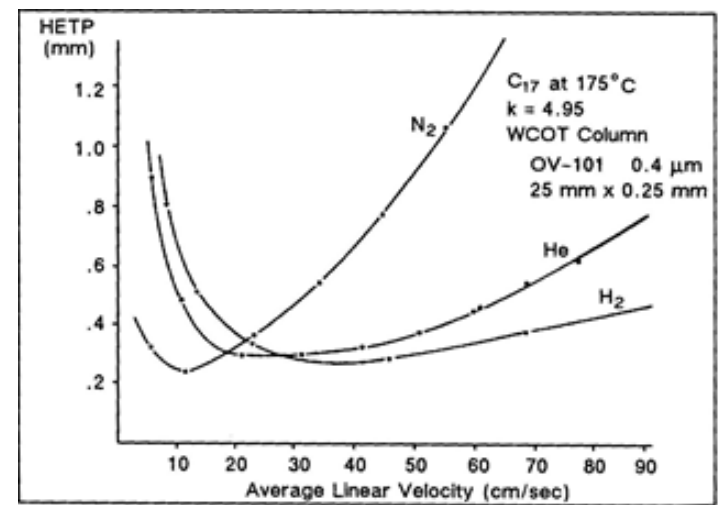
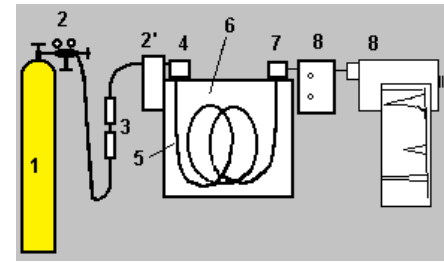


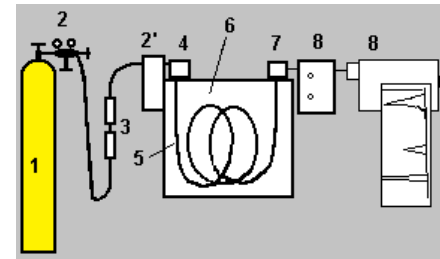
Figure 1-7. Efficiency curves for a 25 m x 0.25 mm id WCOT column with 0.4 μ m of OV-101.

3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :

3. B. b.1. Bæregass - den mobile fasen



For å gjøre t_R reproduserbare).

→ Gass-trykk og mengde må reguleres / kontrolleres -
reproduserbart og nøyaktig

N.B. 1: Gass er et kompressibelt fluid :

ved "steady state": masse-strøm inn = masse-strøm ut (i g/min el. Mol/min),
men : *volumetrisk* strøm inn er ulik (er mindre enn) volumetrisk strøm ut ,
fordi trykket er lavere, og gassvolumet større, ved utgangen enn ved inngangen
--> volumøkning fra injektor til detektor.

N.B. 2: Bæregass inn i kromatografen skal være "renest mulig".

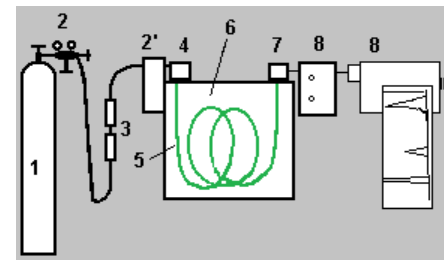
- unngå SF-dekomponering (kjemisk reaksjon med forurensing i gassen i varmen, særlig O_2),
- unngå forurensinger, som gir spøkelsestopper, eller ekstra detektor-støy.

3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :

3.B.b. 5. Kolonnen (omtaler her bare GLC, ikke GSC)



(i) *Den stasjonære fasen*):

Må ha væske(-lignende) egenskaper, bl.a.,

- være amorf,
- tillate høye diffusjonskonstanter,
- kunne oppløse analyttene.

Må i tillegg ha:

- ekstremt lavt damptrykk – høyt kokepunkt,
For å 'holde seg fysisk på plass' - ikke tørkes opp ('fordampes/blåses bort'),
- høy termisk stabilitet.
for å overleve kjemisk uendret de ganske høye temperaturene, i lengre perioder.

3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

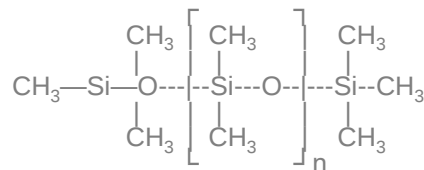
3. B. Gasskromatografi (GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :

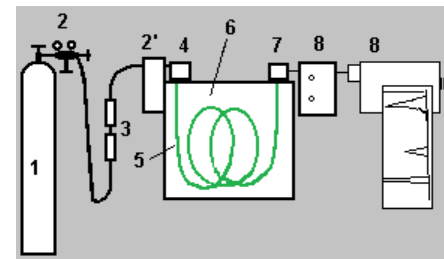
3.B.b. 5. Kolonnen (omtaler her bare GLC, ikke GSC)

(i) Den stasjonære fasen):

Polysiloksaner ("silikon-polymerer") :



PDMS, poly(dimetylsiloksan).

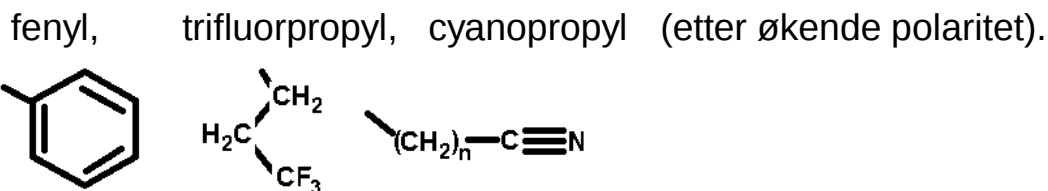


"Silikoner" er populære i GLC: Store variasjons- og tilpasnings-muligheter for GC: ved å variere

- typer substituenten på silikon-atomene, og
- deres mengde-messige fordeling.

CH_3 (som vist i PDMS ovenfor) kan (delvis eller helt) erstattes med andre substituenten.

Typiske "erstattere" er:



én klassisk, meget populær u-polar silikon SF in GLC er :

95%metyl-5%fenyl-siloksan

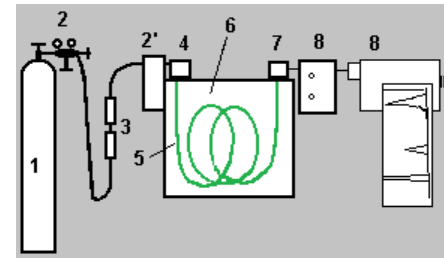
(bare marginalt mer polar enn PDMS): kjent som bl.a. DB-5ms, FV-5ms, etc. eller SE52, HP-5, etc.

3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :

3.B.b. 5. Kolonnen (omtaler her bare GLC, ikke GSC)



(i) *Den stasjonære fasen*:

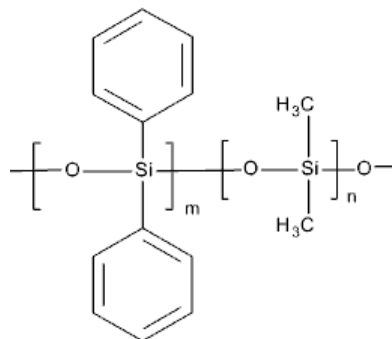
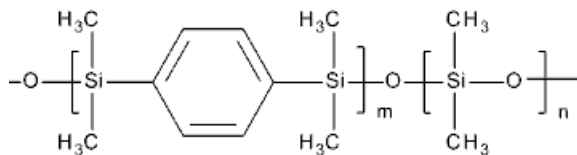
én klassisk, meget populær u-polar silikon SF in GLC er :

95%metyl-5%fenyl-siloksane (bare marginalt mer polar enn PDMS):

kjent som DB-5ms, FV-5ms, etc.

eller

SE52, HP-5, etc.



Andre kjemisk forskjellige stasjonære faser finnes også, bl.a. (mest kjent/brukt):

- **Polyetylenglykoler (PEG, "Carbowax")**.



3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

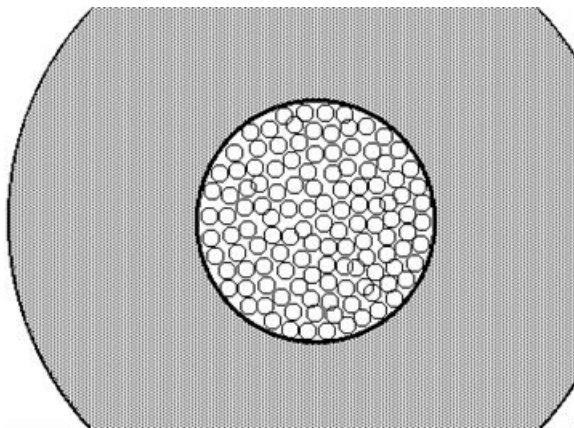
3. B. Gasskromatografi (GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :

3.B.b. 5. Kolonnen (omtaler her bare GLC, ikke GSC)

(ii) Kolonnetyper (de viktigste 2):

- pakkede kolonner

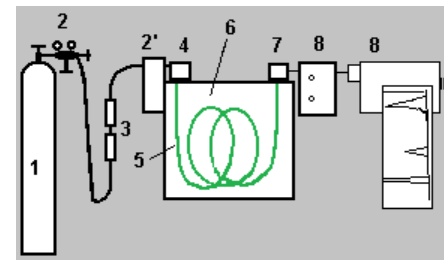
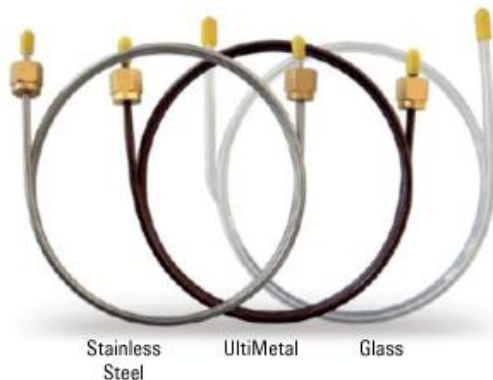


(NB.: Skjematiske tegning,
ikke helt riktig rel. størrelsesforhold !)

SF-væske er påført porøse bærematerial-partikler: (0,1 - 0,25 mm dia.),
som er pakket i et (kveilet) rør
(glass, metall; 1 - 5 m lang,
2 - 6 mm i.d.)

Rel. mye stasjonær fase fordelt på hele partikkeloverflaten
(typisk **1- 15 % w/w** i forhold til bærematerial)
→ rel. stor prøve-mengde-kapasitet
(opptil μg)

Brukbar effektivitet ($N \approx 2000-5000$)



3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

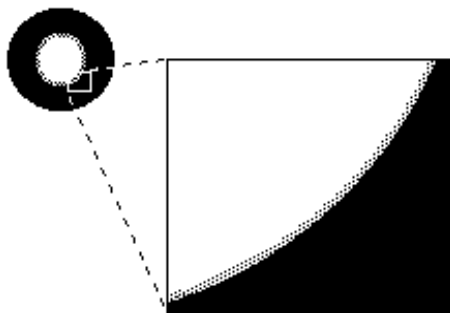
3. B. Gasskromatografi (GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :

3.B.b. 5. Kolonnen (omtaler her bare GLC, ikke GSC)

(ii) Kolonnetyper (de viktigste 2):

- Vegg-belagte kapillærkolonner – (eng.: WCOT columns = Wall-Coated Open-Tubular columns, "capillary GC columns")



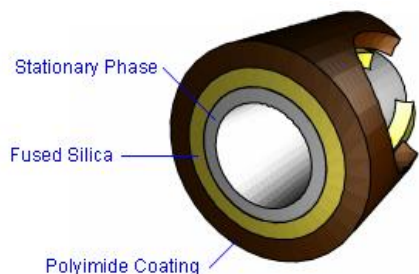
(NB.: Skjematiske tegninger, ikke helt riktige rel. størrelsesforhold !)

Åpne kapillærrør
(0,1 - 0,5 mm i.d., 10 - 60 m lang, rør av "fused silica" (silika))

... innvendig belagt med tynn **SF-film** direkte på kolonneveggen.
(typisk ca. 0,1 - 1 µm)

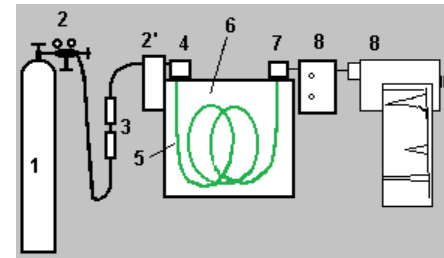
Små dimensjoner (særlig SF-mengden)
→ tåler bare meget små prøvemengder (ng).

Men: meget bra effektivitet (50000-150 000.)



IUPAC: En Kolonne med (normalt) liten diameter, ... der SF-væsken er lagt på den sort sett uforandrede glatte (eng.: "essentially unmodified, smooth") indre kolonneveggen, ...og der det finnes en åpen uhindret vei for den mobile fasen.

(en kombinasjon av IUPACs definisjoner for "Open-Tubular Column" og "Wall-Coated Open-Tubular Column".)



3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :

3.B.b. 5. Kolonnen (omtaler her bare GLC, ikke GSC)

(ii) Kolonnetyper (de viktigste 2):

Sammenligning av GLC på

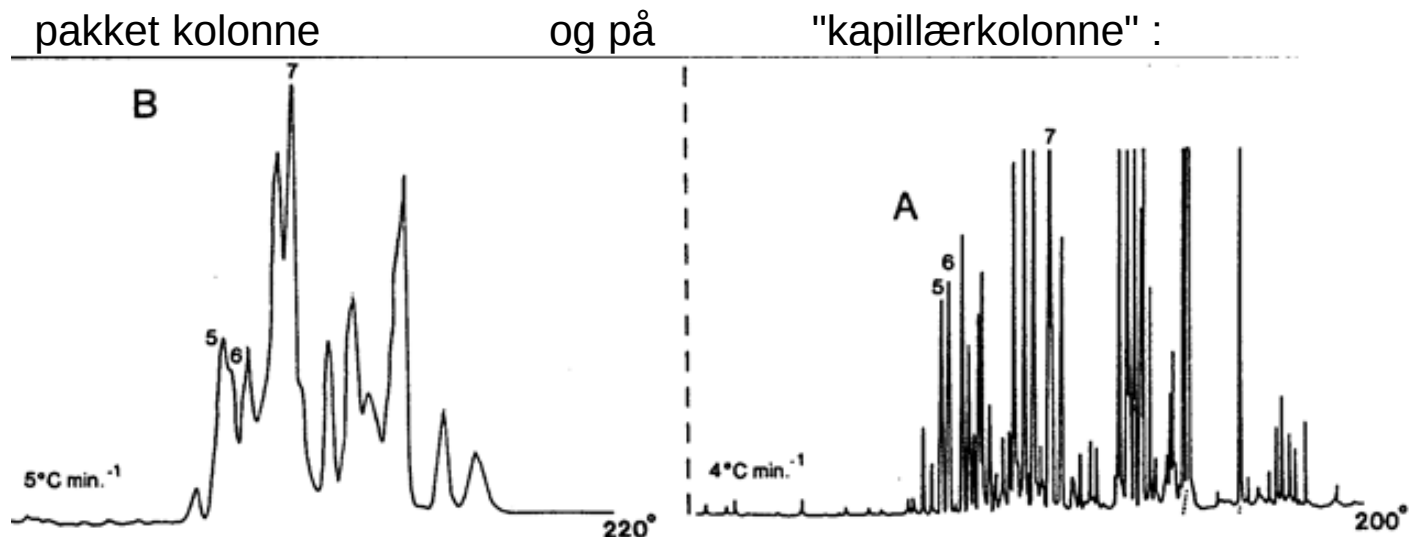
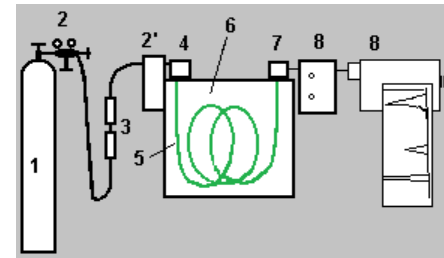


FIGURE 1.3. Chromatograms of Calmus oil on (A) a 50 m $\times$ 0.3 mm i.d. OV-1 glass open tubular column and (B) a 4 m $\times$ 3 mm i.d. column packed with 5% OV-1 on 60/80 mesh Gaschrom Q. Both runs were independently optimized. (Reproduced with permission from ref. 6. Copyright Dr. Alfred Huethig Publishers.)

For begge kolonnetyper

samme prøve (en eterisk olje: 'Calamus'-olje) og samme stasjonær fase (upolar polydimetylsiloksan).

I dag brukes mest kapillærkolonner av typen WCOT-kolonne ved GLC

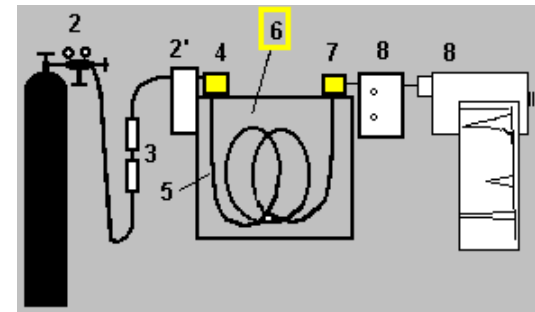


3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :

3.B.b. 6. Kolonne-temperatur (-kontroll)



...Er den viktigste faktoren som bestemmer retensjonstiden :
gjennom Analyttens **damptrykk** ('kokepunkt') - i forhold til kolonnens temperatur:

Dette kontrolleres v.h.a.

Kolonneovn-temperaturen:

***Må kontrolleres og reguleres nøyaktig og presis !!
for å få **reproduserbare** (retensjons-) resultater.***

Generelt :

Økt kolonnetemperatur - redusert retensjonstid

"Tommelfingeren påstår": for 30°C økning i T_{kol} : ca. halvering av k (og t'_R)

Temperaturkontroll av GC-kolonner - vanligvis :

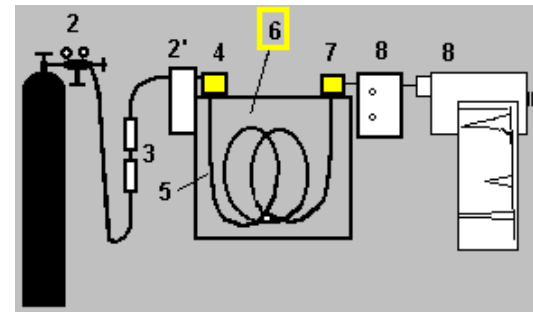
Ved spesial-"**varmluftovn**", med kraftig vifte og varmetråder;
nøyaktig kontrollerbar temperatur / temperatur-programmering.

3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :

3.B.b. 6. Kolonne-temperatur (-kontroll)



Kontrollere retensjonen ved å kontrollere/regulere temperaturen:

To driftsmåter

- *isotermisk* :

Analyse ved **konstant** kolonnetemperatur.

- Enkelt i drift
- Høyest mulig effektivitet for enkle prøver, enkelt-komponenter
- Toppbredder i kromatogrammet øker (~lineært) med retensjonstiden
- Erfaring : t_R for homologer øker ~eksponensielt (eks. *n*-alkaner) .

- *Temperatur-programmert* :

Starter analysen ved rel. lav temperatur, som så økes etter hvert.

Fordel og anvendelse:

- Prøvekomponenter med sterkt forskjellig flyktighet (retensjon) kan separeres i én analyse.
- Først elueres de lettest-flyktige analyttene, deretter de mer og mer tungtflyktige – etter som temperaturen øker.
- Toppbredder (innenfor et lineært temp-program) holder seg ca. konstant.
- Erfaring : t_R for homologer øker ~ lineært med C-antall (eks. *n*-alkaner).

Temperatur-programmering krever nøyaktig (!) temperatur-styring og –kontroll.

3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :

3.B.b. 6. Kolonne-temperatur (-kontroll)

Kontrollere retensjonen ved å kontrollere/regulere temperaturen:

To driftsmåter

Sammenligning: isotermisk og temperaturprogrammert analyse

- isotermisk : ved 45°C

ved 145°C

- Temperatur-programmert :

ved 30° C → 180° C

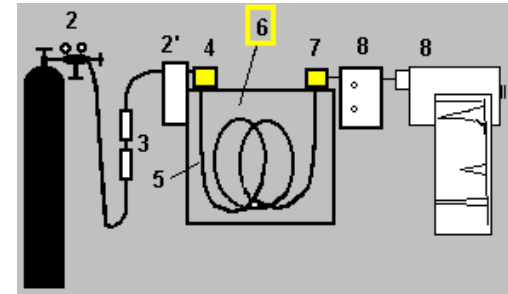
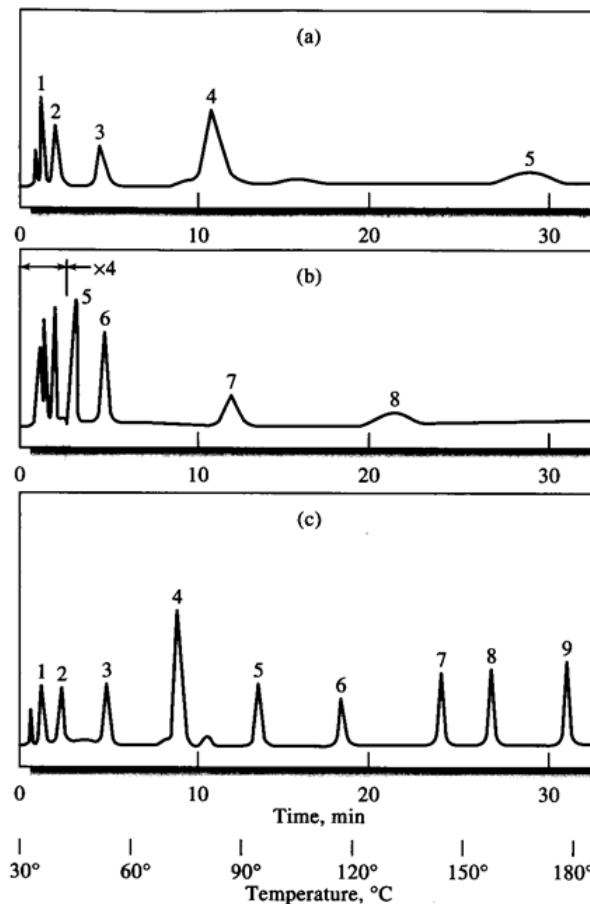


Figure 31-7 Effect of temperature on gas chromatograms. (a) Isothermal at 45°C; (b) isothermal at 145°C; (c) programmed at 30°C to 180°C. (From W. E. Harris and H. W. Habgood, *Programmed Temperature Gas Chromatography*, p. 10. New York: Wiley, 1966. Reprinted with permission of the author.)

3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

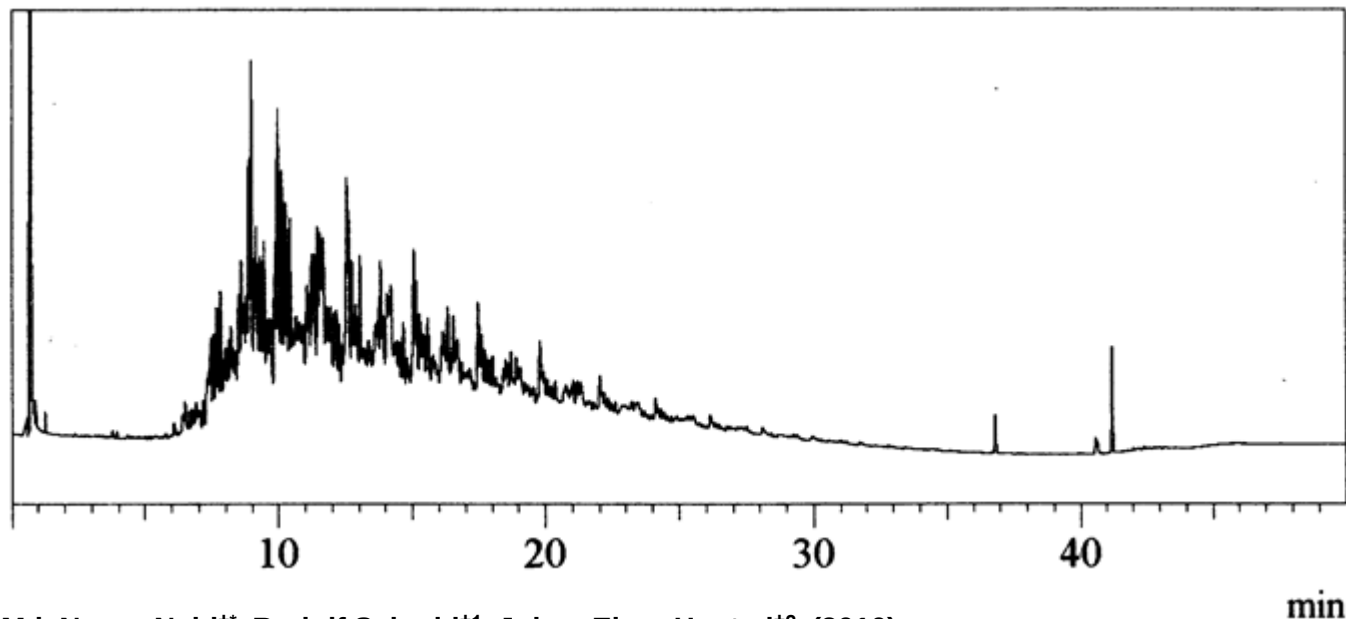
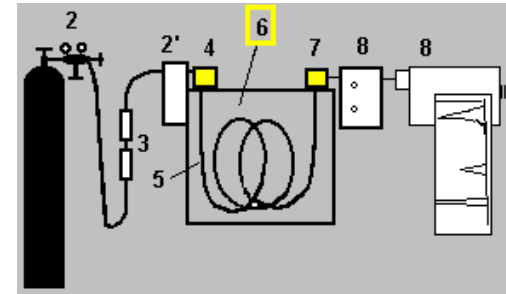
3. B. Gasskromatografi (GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :

3.B.b. 6. Kolonne-temperatur (-kontroll)

Eksempel for en GLC-analyse : "Standard-analyse" :

Diesel-olje



Md. Nurun Nabi^{†*}, Rudolf Schmid^{†1}, Johan Einar Hustad^{†2} (2010)

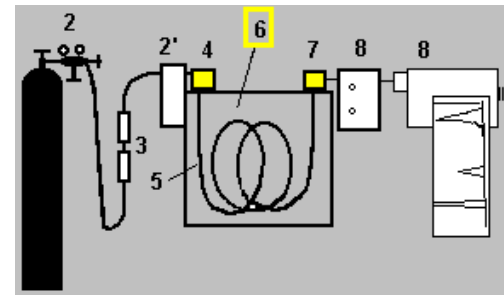
Kolonne: 0,25 μ m DB-5 liquid phase, 30m length, 0,32 mm i.d. WCOT column (J&W Scientific),
ovn: start at 50°C (for 0 min), increasing at 5°C/min to 275°C and was held there for 5 min,
injektor: split/splitless injector (280°C) used,
detektor: FID at 300°C,
bæregass: hydrogen, at 0,7 bar (constant pressure)
injeksjon: 1 μ L, auto-sampler injection, fast, in split mode (1:20 split),
prøve: "European Diesel fuel", diesel olje, 0,1 % i diklormetan.

3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :

3.B.b. 6. Kolonne-temperatur (-kontroll)

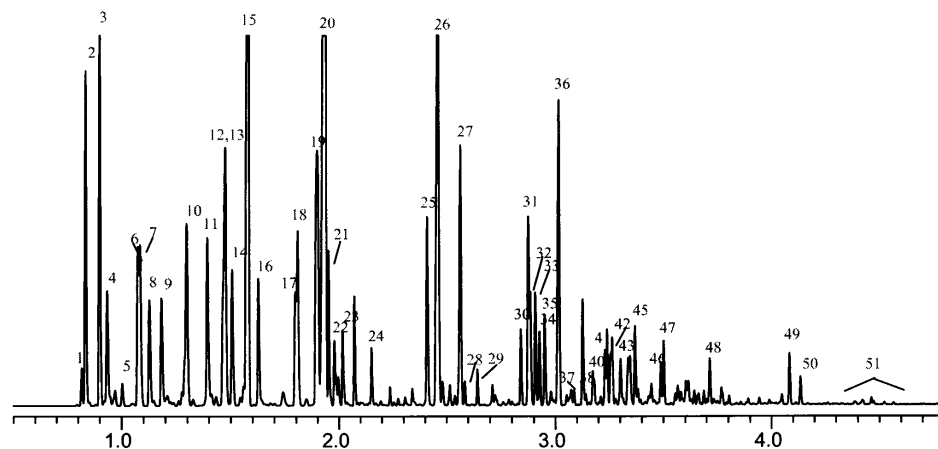


Eksempel for en GLC-analyse :

*Moderat versjon av
"Fast GC"-analyse :*

*Temperaturprogrammert på
upolar SF i WCOT-kolonne*

Unleaded Gasoline Equity-1



column: Equity-1, 15 m x 0.10 mm I.D., 0.1 μ m (28039-U)
oven: 40 $^{\circ}$ C (1 min.), 45 $^{\circ}$ C/min. to 150 $^{\circ}$ C (2 min.)
inj.: 175 $^{\circ}$ C
det.: FID, 175 $^{\circ}$ C
carrier gas: hydrogen, 45 cm/sec, constant
injection: 0.1 μ L, 300:1 split
liner: 2 mm I.D., straight
sample: unleaded gasoline (refinery standard), neat

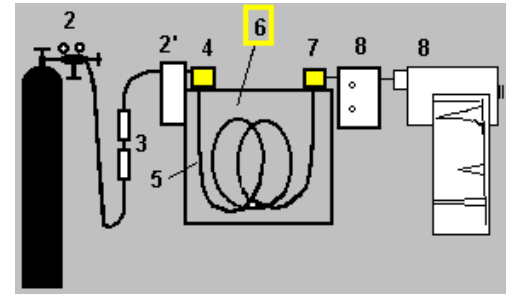
sigma-aldrich.com

3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :

3.B.b. 6. Kolonne-temperatur (-kontroll)



Temperatur-kontroll *utenom* kolonnen: :

I hovedsak ...

Injektor-temperatur (4) og detektortemperatur (7)

velges som regel

- uavhengig av kolonne-temperaturen og
- noe *høyere* enn i kolonna

for

- å få *raskest mulig fordampning av prøven i injektoren (4)*
- å unngå kondensering /"utfrysing" av prøven på vei gjennom *detektoren (7)* (forsinkelser, tap av effektivitet, tap av signal (stoff)).

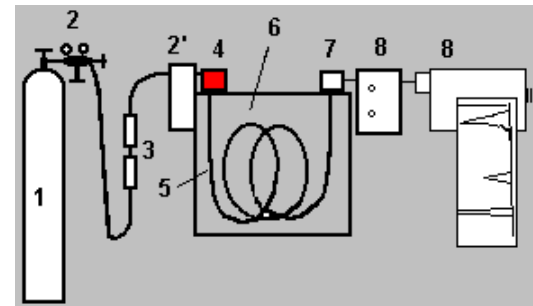
3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :

3.B.b. 4. Prøveapplisering / GC-injektor

(...som blander prøven inn i MF før kolonna)



Mest brukt: fordampningsinjektoren :

- Tar imot prøven (oppløsning, væske, (spesialdesign for faststoff))
- overfører den til dampform (hvis nødvendig)
- blander den med bæregass
- overfører den til kolonna.

Viktig:

- Nøyaktig og/eller repeterbar dosering
I praksis problemer med nøyaktighet av prøvemengden (p.g.a. diskriminering)
– det satses derfor på god repeterbarhet ("Autosampler"), og individuell kalibrering av analyttene.
- Rask overføring som gir smale konsentrerte analytt-soner i starten.
Krever normalt rask fordampning og overføring til kolonnen (begrenset fortykning).
Rask fordampning krever høy temperatur (dilemma: hurtighet mot skånsomhet).
- Kvantitativ overføring (uten dekomponering, diskriminering).

Injeksjon er ofte den største feilkilden/usikkerhet ved GC-analyser.

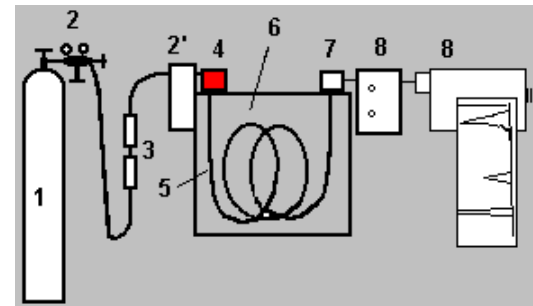
3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :

3.B.b. 4. Prøveapplisering / GC-injektor

(...som blander prøven inn i MF før kolonna)



Applisering ved mikrolitersprøyter,

- typisk 0,2 – 2 μL væske,
- som regel som en oppløsning (fortynnet).

Obs.: **Kapillærkolonner** overbelastes hvis mer enn 0,1-1 μg analytter påføres.

→ krever spesielle injeksjonsteknikker
(f.eks. sterk prøvefortynning og/eller splitt-injeksjon).

Jfr.: Pakkede kolonner tåler derimot gjerne 1-100 μg analytt.)

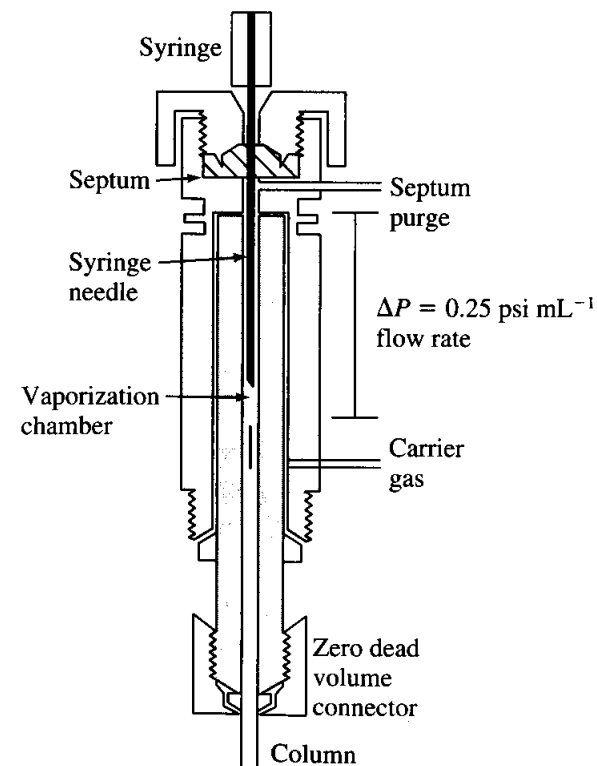


Fig. fra læreboken (SWHC8 (2004))

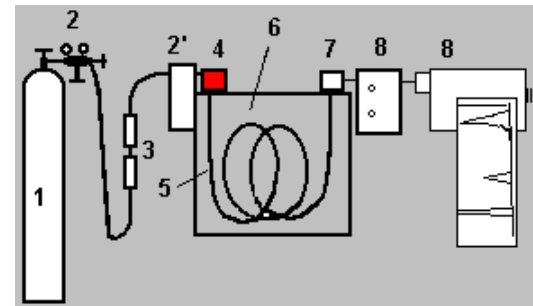
3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :

3.B.b. 4. Prøveapplisering / GC-injektor

(Blander prøven inn i MF før kolonna)



Injeksjon kan skje manuelt, men Automat-injektorer ("*autosamplers*") av i dag er *bedre*:

- mer presis,
- mer pålitelig og
- har "lengre driftstid".

Autosampler er roboter som velger og håndterer prøve og appliserer med sprøyte - gjør det samme som man ellers gjør manuelt

- bare under computer-kontroll
- og
- bedre.

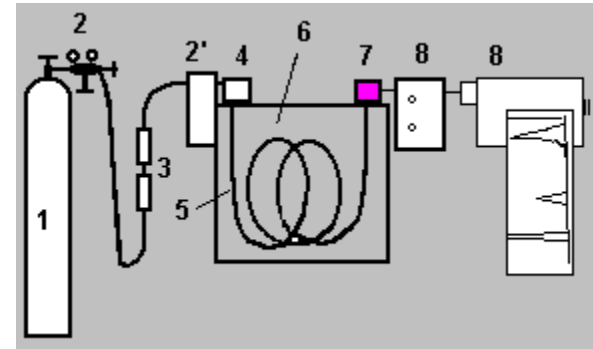


3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :

3.B.b. 7. Detektor



Skal måle konsentrasjonen (eller masse-strømmen) av analytter i mobilfasen ved kolonneutgangen

→ registrerer detektorsignal som funksjon av tid = kromatogrammet.

Det måles en fysikalsk egenskap som har sammenheng (helst kvantitativ) med analyttens konsentrasjon.

Mest brukt i GC :

Flammeioniseringsdetektor, **FID**

Måler (endringer i) ledningsevne i en hydrogen-flamme, når organiske analytter forbrennes etter at de ble eluert fra GC-kolonna.

Flere andre detektorer brukes en god del ved GC : bl.a.

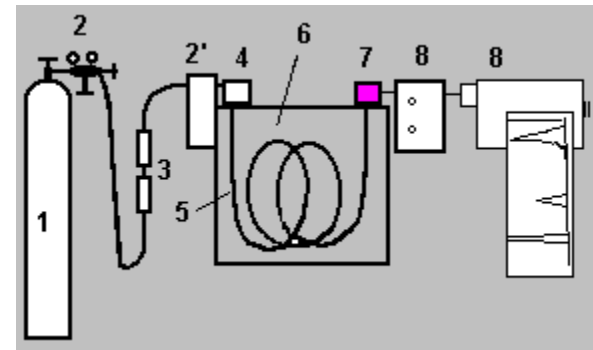
- varmetråds-detektoren (TCD, universell),
 - elektronaffinitets-detektoren (ECD, selektiv),
 - massespektrometeret (MS, for GC/MS, universell *eller* selektiv, avh. av bruksmåten).
- etc.

3. Korte innføringer til spesifikke teknikker

3. B. Gasskromatografi (GC)

3.B. b) Instrumentering for gasskromatografi :

3.B.b. 7. Detektor



Mest brukt i GC :

Flammeioniseringsdetektor, **FID**

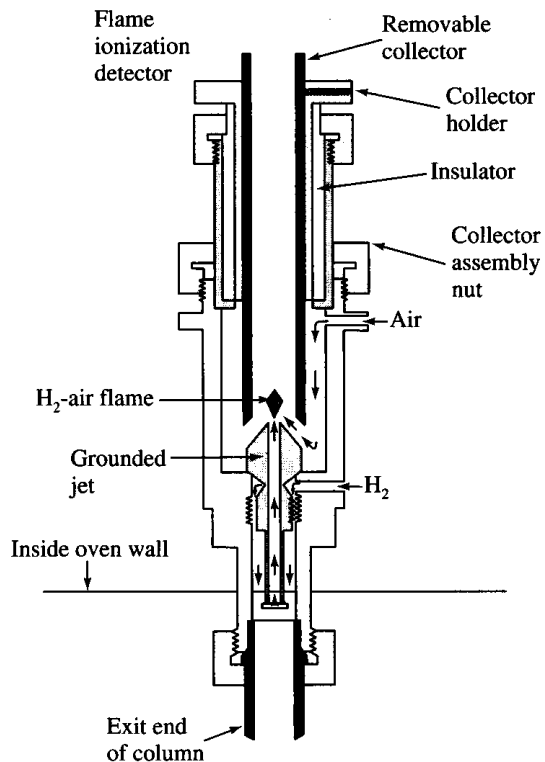


Fig. fra læreboken (SWHC8 (2004))

I flammeioniseringsdetektor FID: Eluentene sendes inn i en hydrogenflamme, Flammen brenner normalt uten dannelselse av ioner/elektroner (ikke elektrisk ledende). Organiske stoffer derimot danner (litt) ladede mellomprodukter ved forbrenning . Disse detekteres som en svak strøm (pA) i et elektrisk felt (flammespiss - kollektor).

TABLE 31-1

Gas Chromatographic Detectors

Type	Applicable Samples	Typical Detection Limit
Flame ionization	Hydrocarbons	0.2 pg/s
Thermal conductivity	Universal detector	500 pg/mL
Electron capture	Halogenated compounds	5 fg/s
Mass spectrometer	Tunable for any species	0.25–100 pg
Thermionic	Nitrogen and phosphorous compounds	0.1 pg/s (P) 1 pg/s (N)
Electrolytic conductivity (Hall)	Compounds containing halogens, sulfur, or nitrogen	0.5 pg Cl/s 2 pg S/s 4 pg N/s
Photoionization	Compounds ionized by UV radiation	2 pg C/s
Fourier transform IR	Organic compounds	0.2 to 40 ng

Fra læreboken (SWHC8 (2004))