

Pórusos anyagok MSc

László Krisztina (463)18-93
klaszlo@mail.bme.hu
F ép. I. lépcsőház 1. emelet 135

1

Követelmények: 2+0+0 v
Egyéni felkészülés
Házi feladat: esszé 33 %
Kiselőadás 33 %
Vizsga 33 %
Aktivitás

Info:

[http://oktatas.ch.bme.hu/oktatas/konyvek/fizkem/porusos anyagok](http://oktatas.ch.bme.hu/oktatas/konyvek/fizkem/porusos_anyagok)

2

Tematika

1. A pórusos rendszerek osztályozása
2. A pórusos rendszerek morfológiai vizsgálatára szolgáló módszerek és modellek
3. Kinetikai megfontolások
4. Pórusos rendszerek

KIINDULÁS: Felületek fizikai kémiája elektronikus jegyzet anyaga

3

2017-18. 1. félév menetrend

Minden kontakt aktivitás időpontja: hétfő 8:15-9:45-ig, H ép. mfszt.

november 5.	Esszébeadás
november 19.	Kiselőadások I.
november 26.	Kiselőadások II.
december 4.	Workshop

4

Hallgatói témák (egyénenként)

Témalista kiírása: szept. 24.

**Kb. 10 oldalas esszé (2500 leütés/oldal) + irodalomjegyzék
+ mellékelt irodalmak**

tartalom és forma (korrekt hivatkozás)

alap: 2000 után született review/kv fejezet + későbbi cikkek

feldolgozást segítő kérdések (5 db)

15 perces előadás

Elektronikus beadás:

Nov. 5: Nev_essze: esszé + irodalomjegyzék + irodalmak

Nov. 26: Nev_Kiseloadas

Nov. 26/27: Nev_Kerdesek

5

Kiselőadás témák

Adszorpciós gáztárolás

Pórusos anyagok az üzemanyagcellákban

A talaj, mint pórusos rendszer

A csont. Mesterséges csontpótló anyagok

Szupermakropórusos polimerek

Pórusos anyagok a szuperkondenzátorokban

Pórusos anyagok az építőiparban

Pórusos anyagok az úrkutatásban

Reakciók „confined” körülmények között

Gyulavári Anna

Singer Zsuzsa

Gömbös Patrik

Varga Réka

Draskóczi Ádám

Orbán Balázs

Weingart Csaba

Lontay Dávid

25000 +/- 5% karakterből (szóközökkel együtt)

álló összefoglaló (ehhez tetszőleges mennyiségű

táblázat és ábra adható), pontos hivatkozásokkal

és irodalomjegyzékekkel

6

Mi az a pórus ?

Mi lehet az előnyük? Miért?

Mi lehet a hátrányuk? Miért?

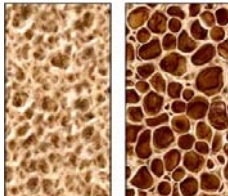
Hogyan lehet a hátrányokat kiküszöbölni?

Hogyan tudnánk őket jellemezni?

7

Pórusos anyagok

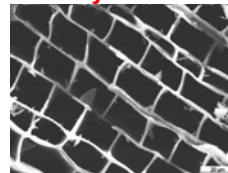
Csont



Tégla



Növényi szár



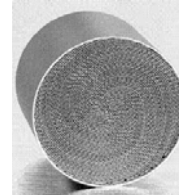
Méhsejt



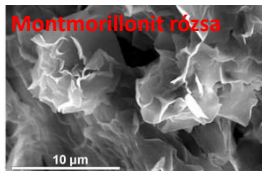
Riolittufa (horzsakó, habkő)



Membrán-spirál



Montmorillonit rózsá



Talaj



Szivacs





Példák környezeti alkalmazásokra

Energy and Environmental Applications	Adsorbents and technology
CH ₄ storage for on-board vehicular storage	Super-activated carbon and activated carbon fibers; Near or meeting DOE target storage capacity
H ₂ storage for on-board vehicular storage	Carbon nanotubes possible candidate
N ₂ /CH ₄ separation for natural gas upgrading	Clinoptilolite, Sr-ETS-4 by kinetic separation
Sulfur removal from transportation fuels (gasoline, diesel and jet fuels)	π -complexation sorbents such as Cu(I)Y, AgY
CO removal from H ₂ to <10 ppm for fuel cell applications	π -complexation sorbents such as CuCl/ γ -Al ₂ O ₃ , CuY, and AgY; silica molecules sieve membranes
NO _x removal	Fe-Mn-Ti oxides, Fe-Mn-Zr oxides, Cu-Mn oxides
Removal of dienes from olefins (to <1 ppm)	π -complexation sorbents such as Cu(I)Y, AgY

Lu¹⁰ et al

Nempórusos vs. pórusos



Nempórusos

- kicsi fajlagos felület
- kicsi pórustérfogat



Pórusos

- nagy
- nagy

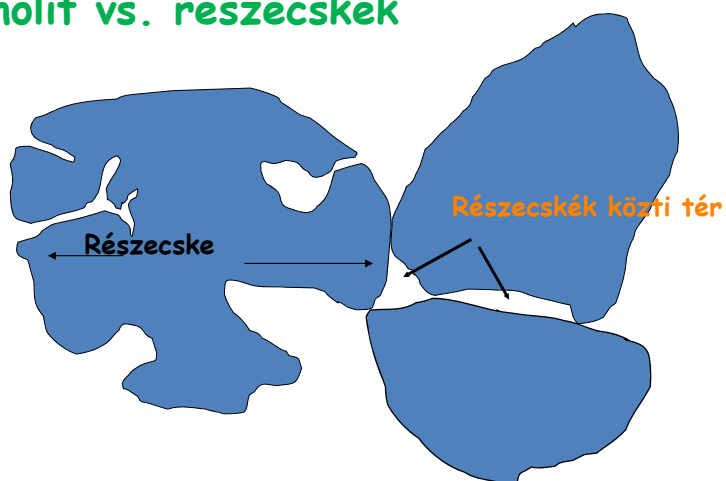
A pórusos anyagok igen nagy belső porozitással és ennek következtében fajl. felülettel rendelkeznek → különleges funkciók

F. Rouquerol, J. Rouquerol, K. S. W. Sing, Adsorption by Powders and Porous Solids, Academic Press, 1-25, 1999

11

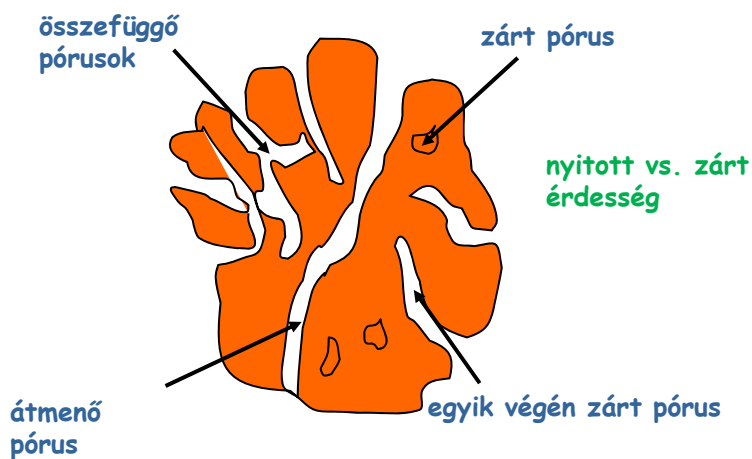
Pórusmorfológia

1. Monolit vs. részecskék



12

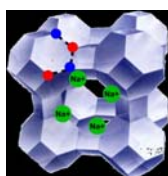
2. Nyitott vagy zárt



F. Rouquerol, J. Rouquerol, K. S. W. Sing, Adsorption by Powders and Porous Solids, Academic Press, 1-25, 1999

13

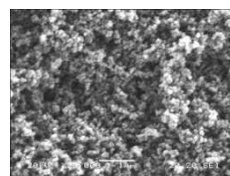
Összefüggő/független pórusok



zeolit



SBA-15



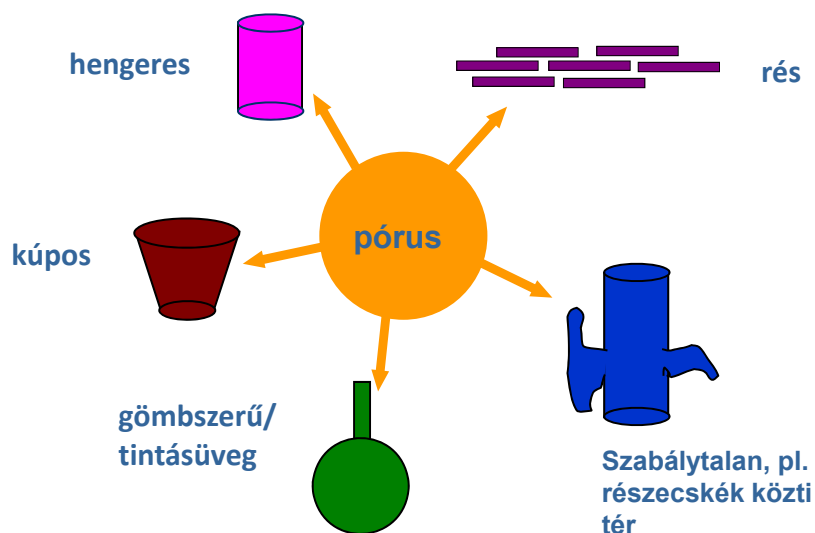
aerogél



Hierarchikus

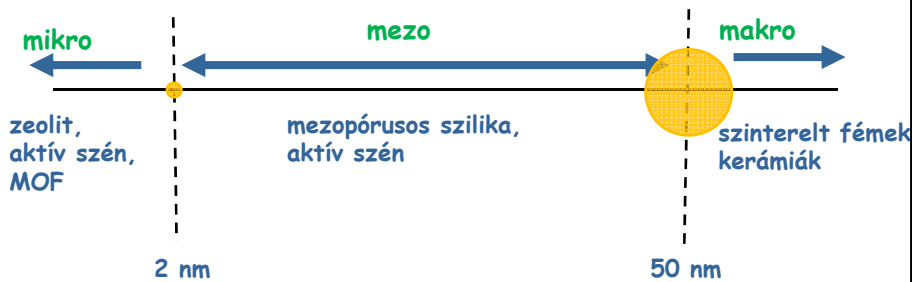
14

3. A pórusok alakja



F. Rouquerol, J. Rouquerol, K. S. W. Sing, *Adsorption by Powders and Porous Solids*, Academic Press, 1-25, 1999

4. A pórusok mérete



IUPAC-osztályozás méret szerint (1984):

- mikropórus $d < 2 \text{ nm}$
további „alosztályok”: ultra- ill. szuper-mikropórus
- mezopórus $2 \text{ nm} < d < 50 \text{ nm}$
- makropórus $d > 50 \text{ nm}$
további „alosztály”: szuper-makropórus

Sing, K. S. W. et al. *Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems*. *Pure & Appl. Chem.* 57, 603-619 (1985).
16

Morfológiai jellemzők

Fajlagos felület, m^2/g $S = \text{felület}/\text{tömeg}, m^2/g$

porozitás (%)
 $\varepsilon = \text{pórusok térfogata}/\text{teljes térfogat}$

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_p + V_{szil}} = \frac{\rho_{abszolút} - \rho_{látszólagos}}{\rho_{abszolút}}$$

Pórus alak, méret és eloszlás

Pórustérfogat, cm^3/g
 $V_{tot} = \text{teljes pórustérfogat}/\text{tömeg}$

17

Nagy felület

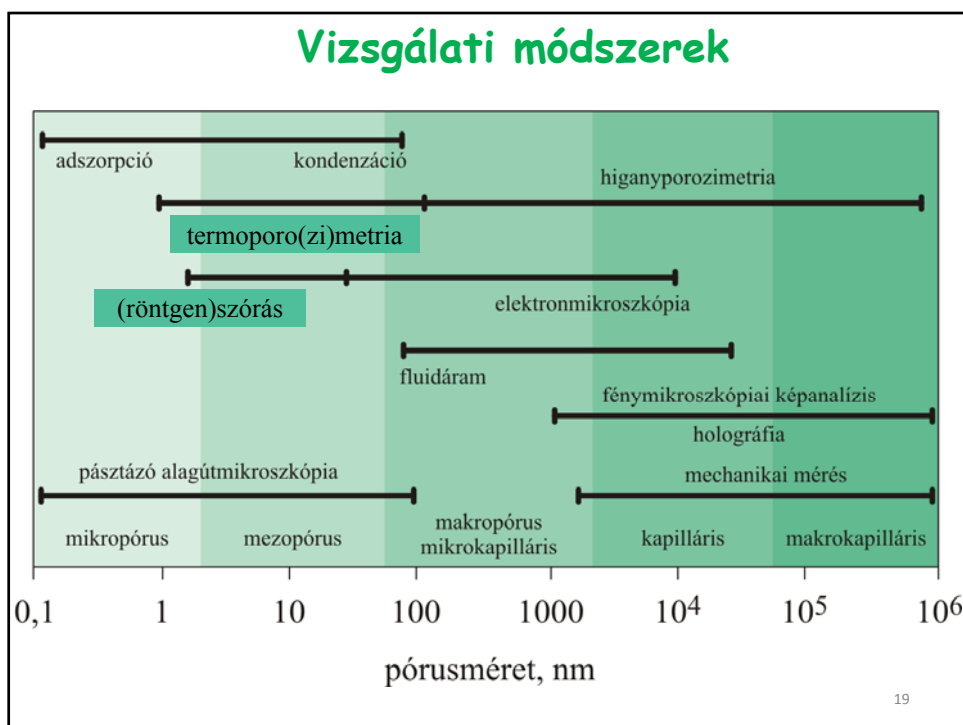
„God created space, and the devil created surface”

Wolfgang Pauli

Felületi és tömbfázisbeli részecskék aránya
 felület/térfogat arány

$$\gamma = \left(\frac{\partial G}{\partial A_s} \right)_{p,T}$$

18



Különböző pórusos anyagok összehasonlítása

	Polymeric	Carbon	Glass	Alumino-silicate	Oxides	Metal
Pore size	Meso-macro	Micro-meso	Meso-macro	Micro-meso	Micro-meso	Meso-macro
Surface area / Porosity	Low >0.6	High 0.3-0.6	Low 0.3-0.6	High 0.3-0.7	Medium 0.3-0.6	Low 0.1-0.7
Permeability	Low-medium	Low-medium	High	Low	Low-medium	High
Strength	Medium	Low	Strong	Weak	Weak-medium	Strong
Thermal stability	Low	High	Good	Medium-high	Medium-high	High
Chemical stability	Low-medium	High	High	High	Very high	High
Costs	Low	High	High	Low-medium	Medium	Medium
Life	Short	Long	Long	Medium-long	Long	Long

Kölcsönhatás a felülettel

sík

$$\epsilon_D(r) = -C/r^6$$

polarizálhatóság

$$\epsilon_R(r) = B/r^m$$

$$\epsilon(r) = B/r^{12} - C/r^6$$

$$\phi_i(z) = \sum_j \epsilon_{i,j}(r_{i,j})$$

pórus

$w/d = 3,25$ $w/d = 2,12$ $w/d = 2,00$

(a) $w/d = 3,00$
packing density = 79%

(b) $w/d = 1,71$
packing density = 44%

packing density vs. pore width (molecular diameter)

21

A telítési gőznyomás függ a pórusmérettől

$$\ln \frac{p}{p_0} = - \frac{2\gamma^{LV} V_m^L}{r_k RT} \cos \theta$$

Kelvin egyenlet

tenziógörbe

$T = \text{állandó}$

22

● Pl. N₂ ~0,35 nm

Az adszorpció mechanizmusa pórusos rendszerekben

A mikropórusokban térfogatkitöltés: $\Theta = W/W_0$
Tágabb pórusokban rétegképződés: $\Theta = N/N_0$

23

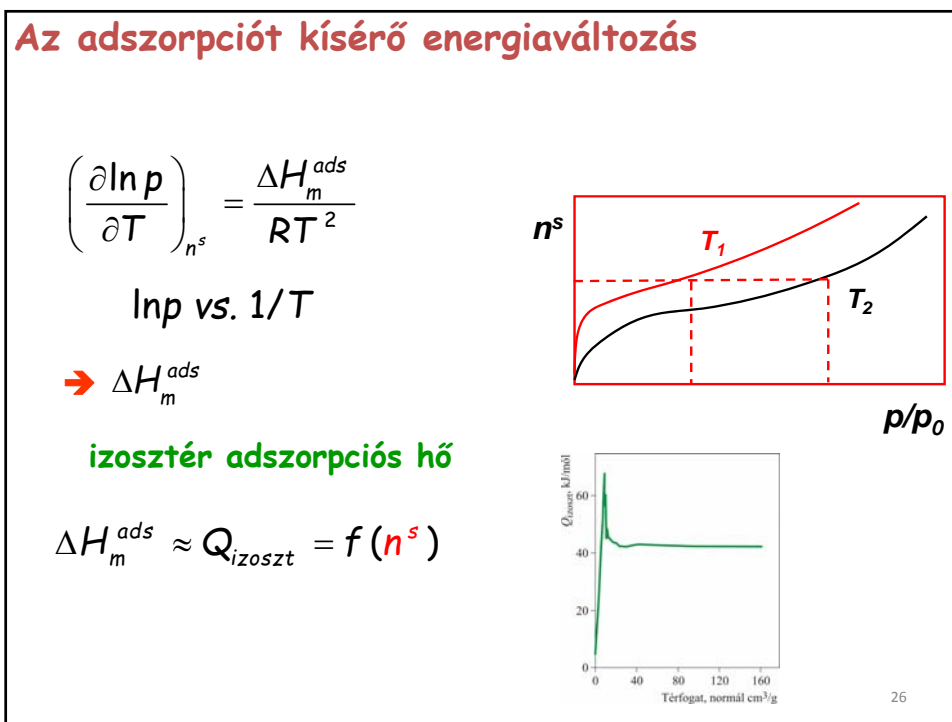
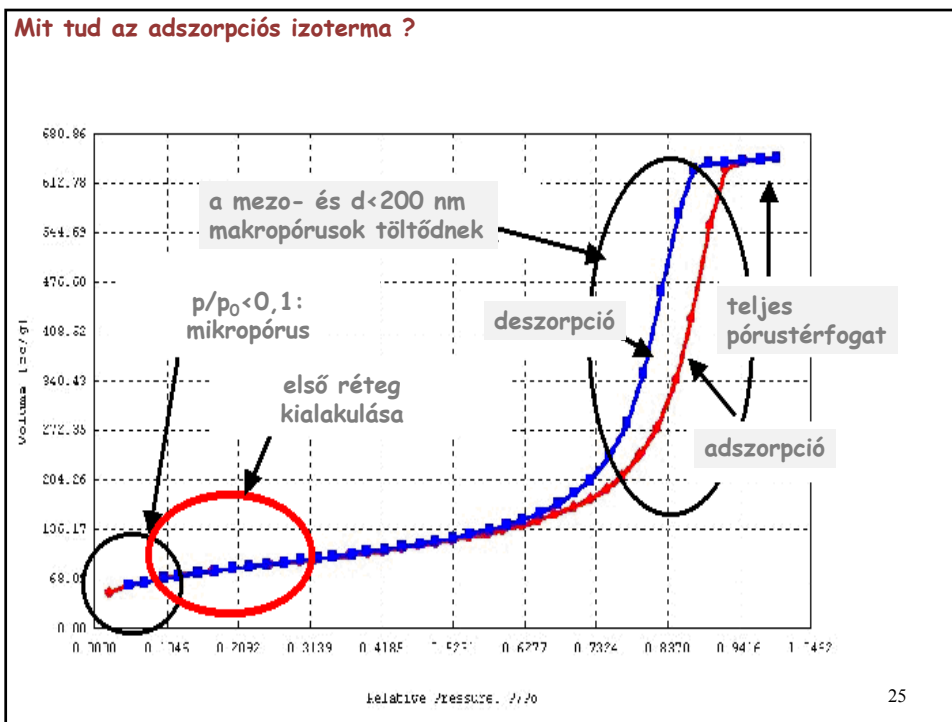
Egyensúlyi/statikus vizsgálati módszerek 1

- csak nyitott pórusok
- 0,4 nm – 50 nm
- egyszerű
- jól bevált, elterjedt

$$S = n_m \cdot N_A \cdot a_i$$

$$\ln \frac{p}{p_0} = - \frac{2\gamma^L V_m^L}{r_x RT} \cos \theta$$

24



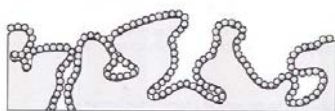
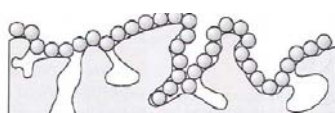
Adszorpciós modellek

p/p_0	Mechanizmus	Modell
10^{-7} -0,02	Mikropórus-kitöltődés	GCMC, HK, SF, DA, DR, MP
0,01- 0,3	A monoréteg kialakulása	DR
0,05- 0,3	Kialakult monoréteg	BET, LM
> 0,1	Többrétegű adszorpció	t-Plot (de-Boer, FHH), α -Plot
> 0,35	Kapillárkondenzáció	BJH, DH, DFT

BET: Brunauer, Emmett & Teller, BJH: Barrett, Joyner & Halenda, DA: Dubinin-Astakhov, DFT: sűrűségfüggvény elmélet, DH: Dollimore-Heal, DR: Dubinin-Radushkevich, GCMC: Grand Canonical Monte Carlo, HK: Horváth-Kawazoe, LM: Langmuir, MP: mikropórus-módszer, SF: Saito-Foley

27

A molekula tulajdonságainak szerepe (méret, polaritás)



Vapour	Temperature (°C)	Customary value	A_m (Å ²) Range of values
Nitrogen	-195	16	13-20
Argon	-195	14	13-17
Krypton	-195	20	17-22
Xenon	-195	25	18-27
Oxygen	-183	14	14-18
Ethane	-195	21	20-24
Benzene	25	40	30-50

Vízgőz	RT	0,125 nm ²
CO ₂	0	0,17 nm ²

$$v \sim T^{1/2}$$

- N₂: permanens kvadrupólmomentum

Kr 77 K $p_0=2,63$ torr

$$S_{\min, N_2} = 0.5 \text{ m}^2$$

$$S_{\min, Kr} = 0.05 \text{ m}^2$$

A hőmérséklet szerepe

$$k = A e^{-\frac{E_{adsz}}{RT}}$$

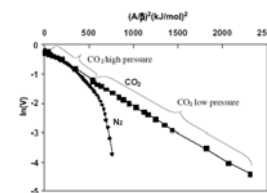
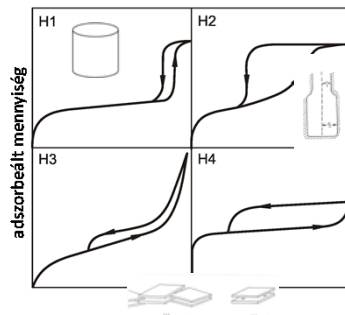
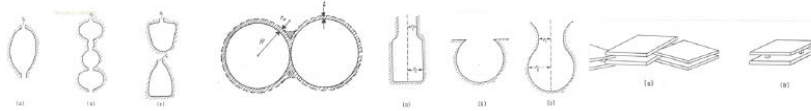


Fig. 1. Characteristic curve obtained from N₂ (77 K) and CO₂ (273 K, low and high pressure) adsorption data corresponding to a chemically activated carbon (AC1) (β (CO₂) = 0.35; β (N₂) = 0.33).

28

Pórusalak (gátolt deszorpció pl. kölcsönhatás, diffúzió, network hatás miatt)



H1 henger
H2 network, tintásüveg
H3-H4 résalakú pórusok

29

Pórusméret eloszlás

$$\ln \frac{p}{p_0} = - \frac{2\gamma^{LV} V_m^L}{r_k RT} \cos \theta$$

In adopting the classical approach, one must necessarily assume that:

1. the Kelvin equation is applicable over the complete mesopore range;
2. the meniscus curvature is controlled by the pore size and shape and $\theta = 0$;
3. the pores are rigid and of well-defined shape;
4. the distribution is confined to the mesopore range;
5. the filling (or emptying) of each pore does not depend on its location within the network;
6. the adsorption on the pore walls proceeds in exactly the same way as on the corresponding open surface.

30

Vizsgálati módszerek 2

- gázadszorpcióhoz hasonló elv
- csak nyílt pórusok
- >1,5 nm felett
- könnyű
- elterjedt módszer

$$P \cdot r = -2 \cdot \gamma \cdot \cos\theta$$

Washburn egyenlet

$$\gamma_{Hg} = 480 \frac{N}{m}$$

$$\theta = 140^\circ$$

7,5 μm	légköri nyomás
3,5 nm	P=2000 bar
1,5 nm	P=5000 bar

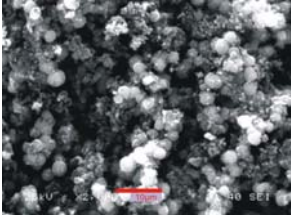
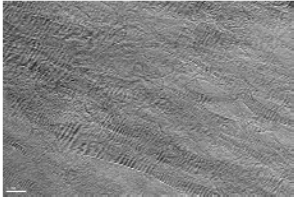
31

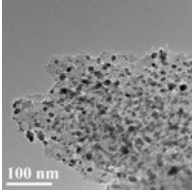
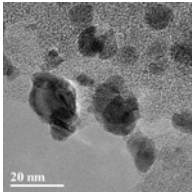
Vizsgálati módszerek 3

Elektronmikroszkópia (SEM, TEM)

- > 5 nm
- póruselemzésre ritkán

- pórushierarchia
- rendezett porozitás esetén pórusméret meghatározható
- ritkán használják pórusanalízisre

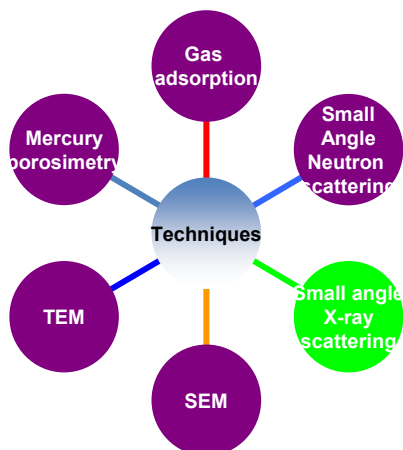



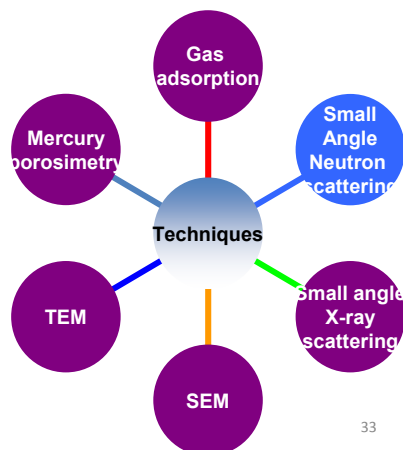
32

Vizsgálati módszerek 4

- tetszőleges pórusméret
- nyílt és zárt egyaránt



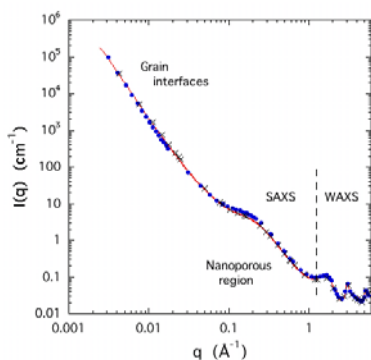
- tetszőleges pórusméret
- nyílt és zárt egyaránt
- drága



33

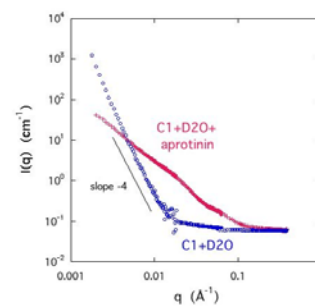
X- és n-szórás

- tetszőleges pórusméret
- nyílt és zárt egyaránt



- tetszőleges pórusméret
- nyílt és zárt egyaránt
- drága

H $-3.74 \cdot 10^{-13}$ cm
 D $6.67 \cdot 10^{-13}$ cm
 C $6.64 \cdot 10^{-13}$ cm



34

Transzportmechanizmusok

Molekuláris (Fick) diffúzió

makro

Viscous flow Bulk diffusion

Knudsen-diffúzió

mezo

Knudsen diffusion Surface diffusion

Felületi (Volmer)-diffúzió

Capillary condensation Activated

A pórus mérete és alakja meghatározza a diffúziós sajátosságokat

35

$D \text{ (m}^2\text{/s)}$

10⁻⁴
10⁻⁸
10⁻¹²
10⁻¹⁶

1000 100 10 1 0.1

Pore diameter (nm)

$E_a \text{ (kJ/mol)}$

100
50
0

1000 100 10 1 0.1

Pore diameter (nm)

Felületi diffúzió

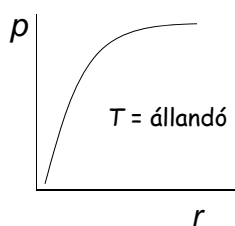
36

18

A telítési gőznyomás függ a pórusmérettől

$$p = p_{\infty} e^{\frac{-2\gamma V_m}{rRT}} \quad \text{Kelvin egyenlet}$$

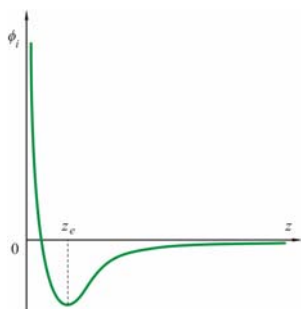
tenziógörbe



37

Kölcsönhatás a felülettel

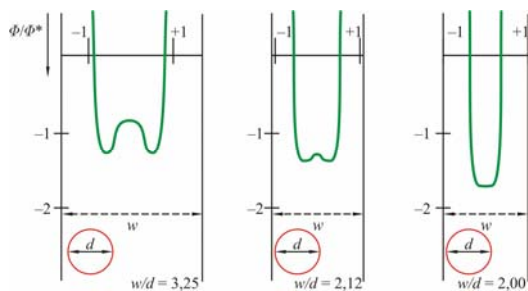
sík



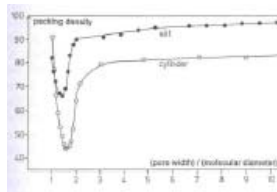
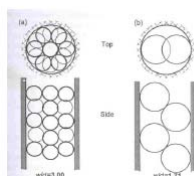
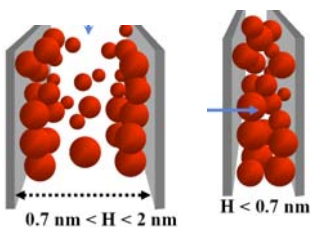
● N₂ ~0,35 nm

pórus

$$\ln \frac{p}{p_0} = -\frac{2\gamma^{LV} V_m^L}{r_k RT} \cos \theta$$

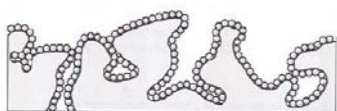


Pórusgeometria



38

A molekula tulajdonságainak szerepe (méret, polaritás)



Vapour	Temperature (°C)	Customary value	A_m (Å ²) Range of values
Nitrogen	-195	16	13-20
Argon	-195	14	13-17
Krypton	-195	20	17-22
Xenon	-195	25	18-27
Oxygen	-183	14	14-18
Ethane	-195	21	20-24
Benzene	25	40	30-50

Vízgőz RT 0,125 nm²
 CO₂ 0 0,17 nm²

- $v \sim T^{1/2}$

- N₂: permanens kvadrupólmomentum

Kr 77 K p₀=2,63 torr

$S_{min, N_2} = 0.5 \text{ m}^2$

$S_{min, Kr} = 0.05 \text{ m}^2$

A hőmérséklet szerepe

$$k = Ae^{-\frac{E_{adsz}}{RT}}$$

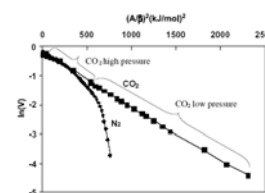


Fig. 1. Characteristic curve obtained from N₂ (77 K) and CO₂ (273 K, low and high pressure) adsorption data corresponding to a chemically activated carbon (AC1) (β (CO₂) = 0.35; β (N₂) = 0.33).

**Dinamikus módszerek
 pórusos és diszperz szilárd anyagok jellemzésére ill.
 alkalmazások**

Áramlás töltött oszlopon

Flow

Wall

A lejátszódó folyamatok

- 1: pórusediffúzió
- 2: szilárd diffúzió
- 3: fázishatáron történő átmenet
fizi: szorpció kinetika
kemi: reakciókinetika
- 4: külső anyagátadás
- 5: a fluid fázis(ok) keveredése

Molecules diffusing in pores
Tortuosity
Wall interactions

41

Illékony vegyületek megkötése adszorbens (aktív szén) ágyon

$$t_b = \frac{W_e m}{Q c_{in}} - \frac{W_e \rho_b}{k_v c_{in}} \ln \left(\frac{c_{in} - c_{out}}{c_{out}} \right)$$

Wheeler-Jonas egyenlet
félempírikus
csak a töltet és a gőz tulajdonságait veszi figyelembe,
adsz. mechanizmust nem

(a)

(b)

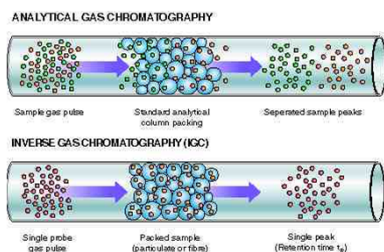
(c)

t_b : áttörési idő
 W_e : a (szén)töltet statikus szorpc. kapacitása
 m : a töltet tömege
 Q : térfogatáram
 c_{in} : a belépő koncentráció
 ρ_b : a töltet látszólagos sűrűsége
 k_v : bruttó adsz. seb. állandó
 c_{out} : megengedett kilépő koncentráció

42

Journal of Occupational Health, 2016

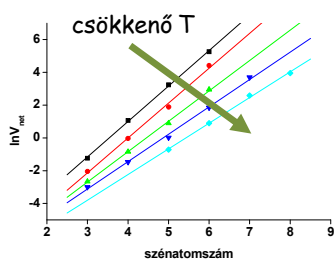
Inverz gázkromatográfia



$$V_{ret} \sim \frac{1}{m} v_0 (t_r - t_0)$$

V_{ret} Retenciós térfogat
 v_0 Gázáram
 m Mintatömeg
 t Retenciós idő

Alkalmazás: kölcsönhatási energiák meghatározása

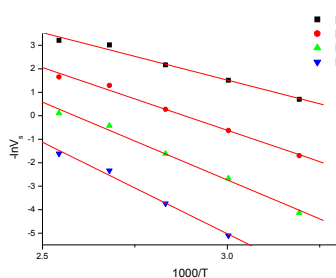


Telített paraffin homológ sor

$$\Delta G_{CH_2} = -RT \ln \frac{V_{n+1}}{V_n}$$

43

$$\Delta G_A = -RT \ln \frac{V_n \cdot P_0}{S_A \cdot m \cdot \pi_0} = -RT \ln V_S + C$$

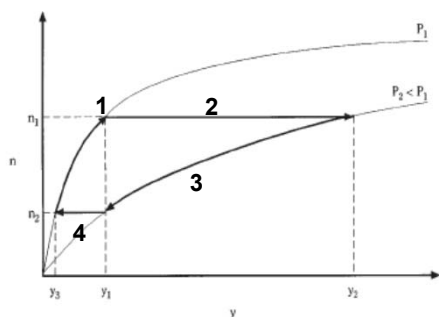


$$\Delta H_A = R \frac{d \ln V_S}{d \frac{1}{T}} = R \cdot |slope|$$

$$\Delta S_A = \frac{(\Delta H_A - \Delta G_A)}{T}$$

44

Pressure swing adsorption (PSA)



1: A gázelegyet P_1 nyomáson, T_1 hőmérsékleten átvezetjük a töltött oszlopon az n_1 esélyi adsz. menny. eléréséig

2: Csökkentjük a nyomást $P_1 > P_2$

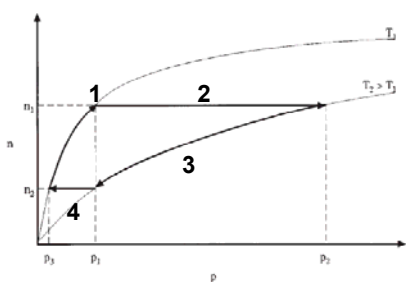
3: Deszorpció

4: Nyomás növelése P_1 -re

Alkalmazások

H_2 tisztítás
 levegő elválasztása
 izo/normál elválasztás
 ...

Temperature swing (thermal swing) adsorption (TSA)



1: A gázelegyet P_1 nyomáson, T_1 hőmérsékleten átvezetjük a töltött oszlopon az n_1 esélyi adsz. menny. eléréséig

2: Növeljük a hőmérsékletet $T_2 > T_1$

3: Deszorpció

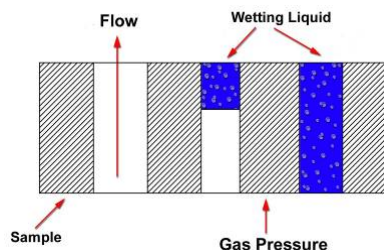
4: Hőmérséklet csökkentése T_1 -re

Alkalmazások:

szárítás
 földgáz tisztítása (H_2S , SO_2)
 NO_x megkötés
 HCl eltávolítás Cl_2 -ből

Kapilláris telítési porometria

A pórusok spontán telnek meg a nedvesítő folyadékkal
Inert gázárammal kihajtjuk a folyadékot



$$r = \frac{2\gamma \cos \theta}{p}$$

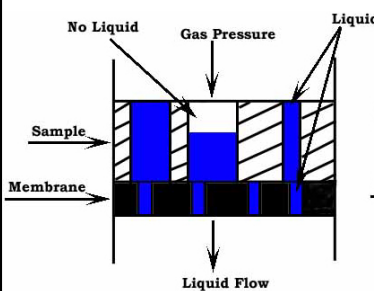
$\cos \theta = 1$

vö. Hg-porozimetria

- Legszélesebb pórus?
- Permeabilitás?
- Roncsolódhatnak a pórusok a nagy nyomásnál
- A Hg toxikus
- Kontaminálja a mintát
- Környezetvédelmi megfontolások

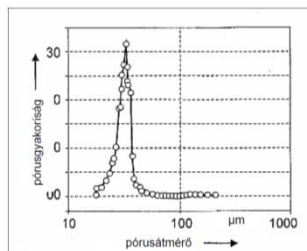
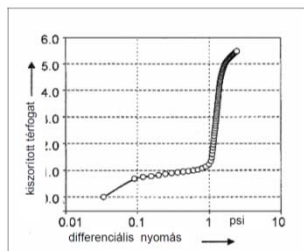
47

Pórusméret-eloszlás



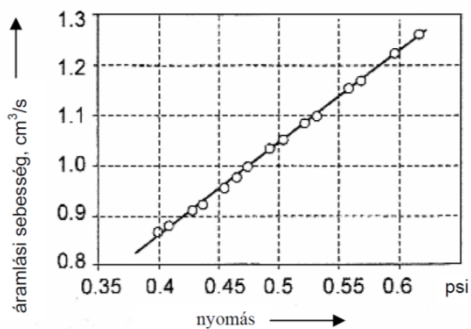
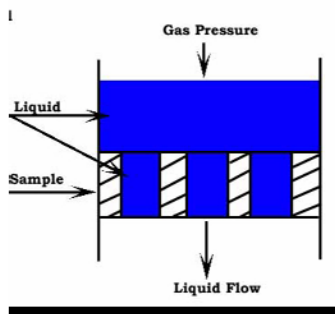
1. Az anyagmintát a mintatartó kamrában levő membránra helyezik.
 - A membrán legnagyobb pórusa is kisebb, mint a mérendő minta legkisebb pórusa
 - A folyadék nedvesíti a membránt.
2. A mintakamrában lassan növelik az inert gáz (általában levegő) nyomását

$$r = \frac{2\gamma \cos \theta}{p}$$



48

Permeabilitás (folyadékáteresztő képesség)



$$k = v \frac{\eta \Delta x}{\Delta p}$$

- k: Permeabilitás
- v: Áramlási sebesség
- η: Viskozitás
- Δp: Nyomáskülönbség
- Δx: Mintaréteg magassága

Folyadékkal és folyadék nélkül - összehasonlítás

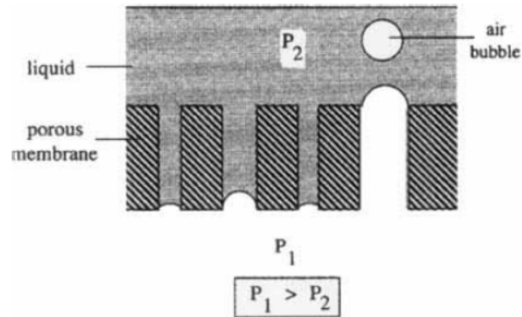
49

Permeability	Pervious				Semi-pervious				Impervious				
	Well sorted gravel		Well sorted sand or sand and gravel		Peat		Layered clay		Unweathered clay				
Unconsolidated sand and gravel	Well sorted gravel		Well sorted sand or sand and gravel		Peat		Layered clay		Unweathered clay				
Unconsolidated clay and organic					Peat		Layered clay		Unweathered clay				
Consolidated rocks	Highly fractured rocks				Oil reservoir rocks				Fresh sandstone		Fresh limestone, dolomite		
κ (cm ²)	0.001	0.0001	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹³	10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁵
κ (millidarcy)	10 ⁺⁸	10 ⁺⁷	10 ⁺⁶	10 ⁺⁵	10,000	1,000	100	10	1	0.1	0.01	0.001	0.0001

$$1 \text{ darcy} = 9.869233 \times 10^{-13} \text{ m}^2 = 0.9869233 \text{ (}\mu\text{m)}^2$$

50

Buborék-pont teszt



A legtágabb (legkönnyebben átjárható) pórus meghatározására

$$r = \frac{2\gamma \cos \theta}{p} \quad \cos \theta = 1$$

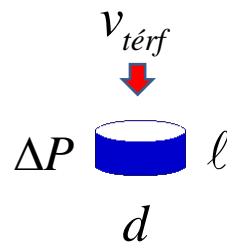
51

Permeabilitás-mérésből felület

Kozeny-Carman egyenlet lamináris áramlás

$$S_A = \frac{7d}{\rho(1-\varepsilon)} \sqrt{\frac{\varepsilon^3 \pi \Delta P}{\ell \eta v_{\text{térf}}}}$$

ε : porozitás
 ρ : a minta sűrűsége
 η : a közeg viszkozitása



szabályos részecskegeometria feltételezésével

Diszperz szilárd anyagok

Méretük a gyakorlati alkalmazás során meghatározó

Folyási/tárolási tulajdonságok
 Szűrhetőség
 Reológiai tulajdonságok (viszkozitás)
 Tapadás (agglomerálódás)
 Porzás
 Ülededés
 Aktivitás/reakciósebesség (pl. katalizátorok)
 Oldódási , felszívódási sebesség (pl. gyógyszerek)
 Gázmegkötés sebessége, mértéke
 Vízmegkötés (hidratáció)
 Nedvességfelvétel
 Káros anyagok belégzése
 Egési sebesség (üzemanyag)
 ... és így tovább

Mérethatárok

Szita	25 μm -125 μm
nedves szita	10 μm -100 μm
Üledítés (H₂O)	1 μm felett
Centrifugálás	5 μm alatt
Mikroszkóp	200 nm - 150 μm
Ultramikroszkóp	10 nm - 1 μm
Elektronmikroszkóp	
(pásztázó - SEM,	
transzmissziós - TEM)	1 nm - 1 μm
Fényszórás	1 nm - néhány μm

Átlagos méret, de milyen ?

a különböző kísérleti módszerek eltérő módon „érezkelik” a polidiszperz rendszereket, mert a frakciók más-más tulajdonságaira „érzékenyek”

A részecskék mérete egy halmazon belül különböző lehet:

Monodiszperz: azonos méretű részecskék halmaza (szűk méreteloszlás)

Bi...

Polidiszperz: különböző méretű részecskék halmaza (széles méreteloszlás)

$$\overline{x_N} = \frac{\sum x_i \phi_i}{\sum \phi_i} \quad \overline{x_W} = \frac{\sum x_i W_i}{\sum W_i} \quad PD = \frac{\overline{x_W}}{\overline{x_N}}$$

Minden részecske egyenlő: ϕ_i a darabszám **SZÁM SZERINTI ÁTLAG**

Vannak egyenlőbbek: ϕ_i a felület
tömeg
térfogat
...
FELÜLET SZERINTI ÁTLAG
TÖMEG SZERINTI ÁTLAG
TÉRFOGAT SZERINTI ÁTLAG

Ülepítés (ülepedési sebesség)

gravitáció vs. súrlódás

$$V(\rho - \rho_{közeg})g = fv$$

STOKES

$$\frac{4}{3}r^3\pi(\rho - \rho_{közeg})g = 6\pi\eta rv$$

$$v = \frac{2r^2(\rho - \rho_{közeg})g}{9\eta}$$

Feltételek: $r \gg r_{közeg}$

lassú mozgás
gömb
híg
+nedvesedés/-duzzadás
1- 20 μm

Coulter számláló

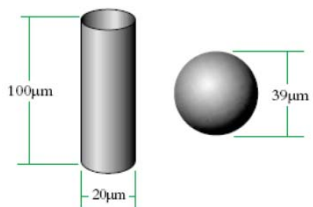
kiszorított térfogat ellenállása/vezetőképessége

etd.ohiolink.edu

Részecskeméret?

Ibuprofen kristályok (SEM)

Az ekvivalens gömb



- Egyetlen mérettel (r vagy d) jellemezhető

- Jellemzői ennek alapján könnyen számíthatók:

$$V = \frac{1}{6} \pi d^3 \quad S = \pi d^2 \quad m = \frac{\rho}{6} \pi d^3$$

- Egyszerű és kényelmes

Size of cylinder		Aspect Ratio	Equivalent Spherical Diameter
Height	Diam.		
20	20	1:1	22.9
40	20	2:1	28.8
100	20	5:1	39.1
200	20	10:1	49.3
400	20	20:1	62.1
10	20	0.5:1	18.2
4	20	0.2:1	13.4
2	20	0.1:1	10.6

Az ekvivalens gömb mérete is módszerfüggő

