

Az SZTE Kutatóegyetemi Kiválósági Központ tudásbázisának
kiszélesítése és hosszú távú szakmai fenntarthatóságának megalapozása
a kiváló tudományos utánpótlás biztosításával”



. Környezettudományi Doktori Iskola Doktori Iskola/TDK/SzakkollégiumRendezvény 2013. 05.08

A membrános gázszeperáció alkalmazása

Nemestóthy Nándor

egyetemi docens Pannon Egyetem

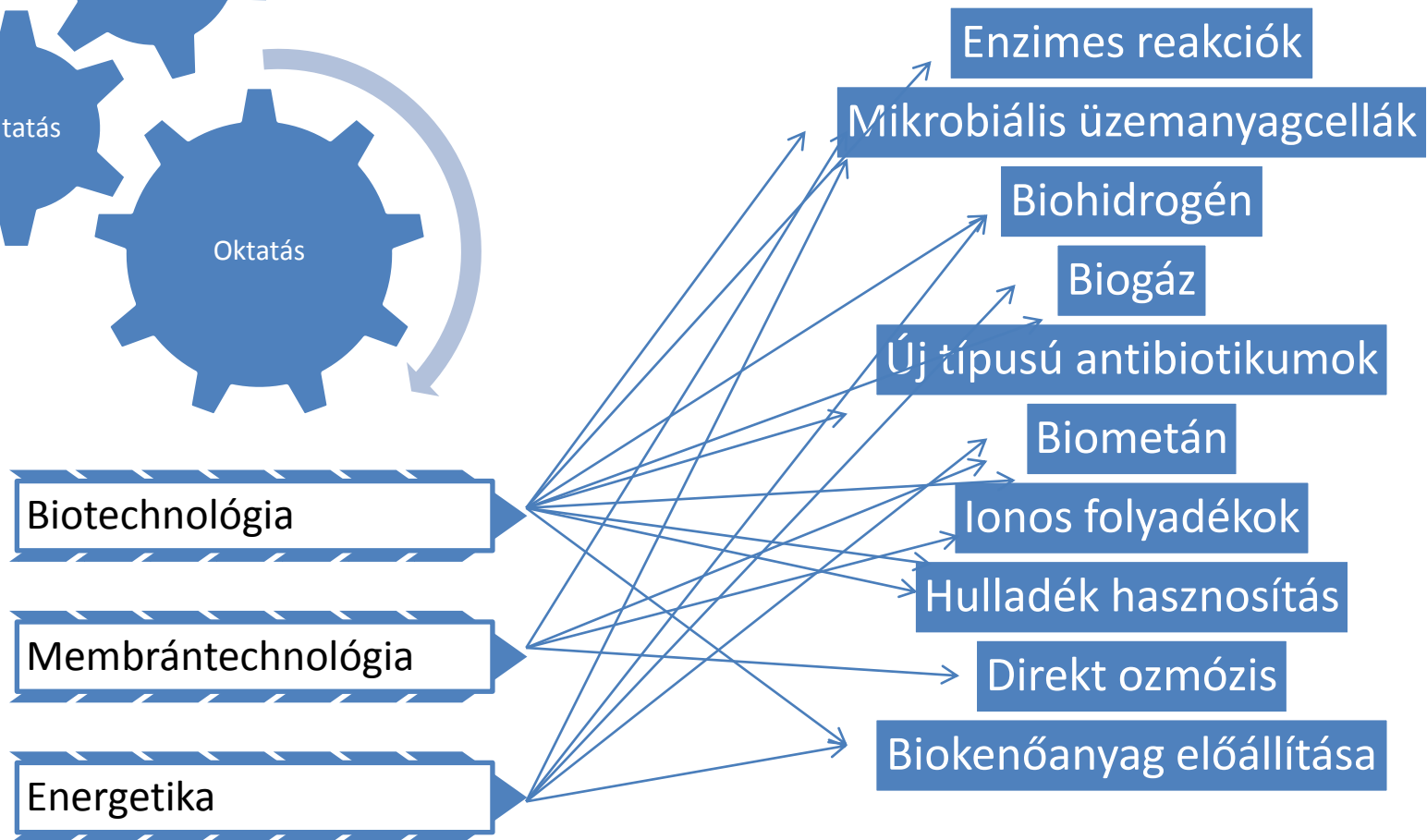
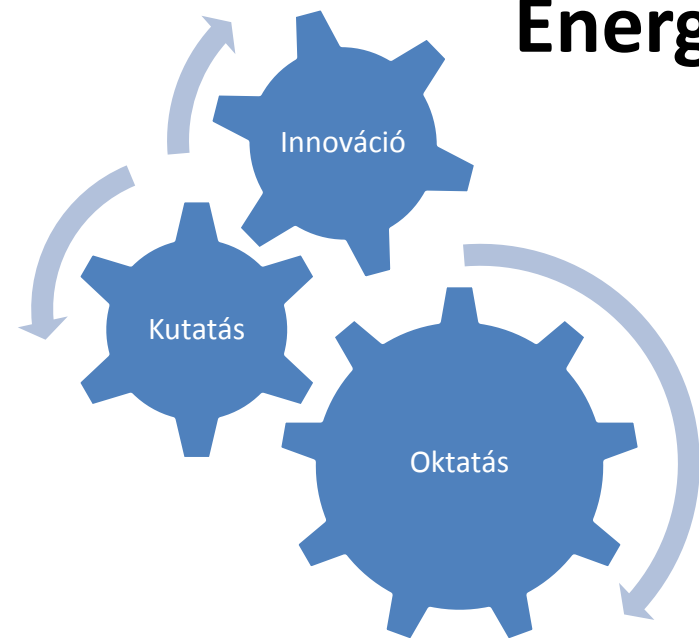
Biomérnöki, Membrántechnológiai és Energetikai Kutató Intézet



TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0012 projekt



Biomérnöki, Membrántechnológiai és Energetikai Kutatóintézet



Szeeparációs technológiák

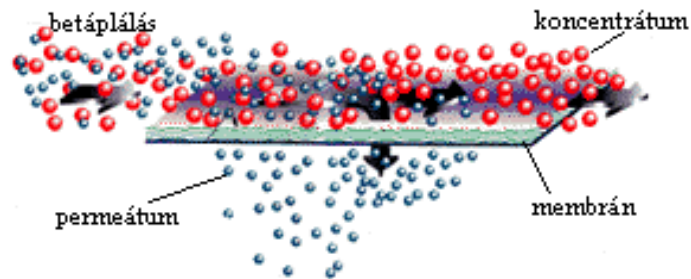
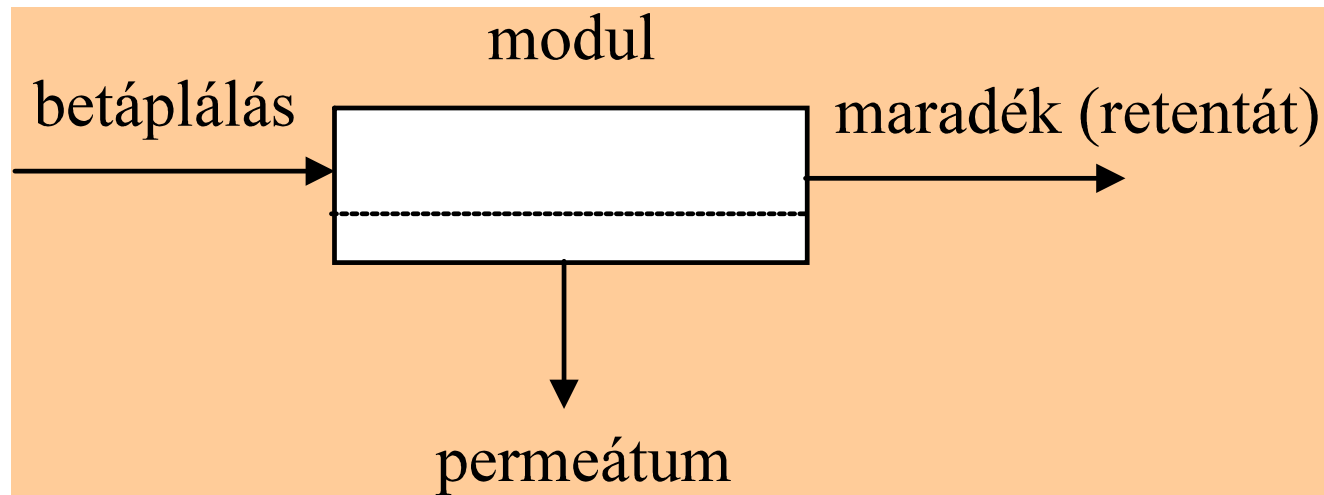
Az ipari energia-
felhasználás 55%
szeeparációs
feladatokhoz
kapcsolódik

DOE 2008-03-10 report

Fizikai/kémiai tulajdonság	Szeeparációs művelet
méret	szűrés, <i>mikroszűrés</i> , <i>ultraszűrés</i> , <i>dialízis</i> , <i>gázszeeparáció</i> , gélpermeáció, kromatográfia
gőznyomás	desztilláció, rektifikáció, <i>membrán desztilláció</i>
fagyás pont	kristályosítás
affinitás	extrakció, adszorpció, abszorpció, <i>fordított ozmózis</i> , <i>pervaporáció</i> , affinitás kromatográfia
töltés	ioncsere, <i>elektrodialízis</i> , elektroforézis, <i>diffúziós dialízis</i>
sűrűség	centrifugálás
kémiai viselkedés	komplex képzés, <i>vivőanyag transzport</i>

A szeeparációs műveletek osztályozása az elválasztandó komponens
fizikai-kémiai tulajdonságai alapján

A membránszeparációs műveletek alapelve



DEFINÍCIÓ:

*A membrán - permszelektív
gát két fázis között.*

A membrántechnológia tulajdonságai

Előnyök

könnyen kombinálható
más műveletekkel

folyamatossá tehető

enyhe körülmények
szükségesek

a méretnövelés
egyszerű

Hátrányok

eltömődés (*fouling*)

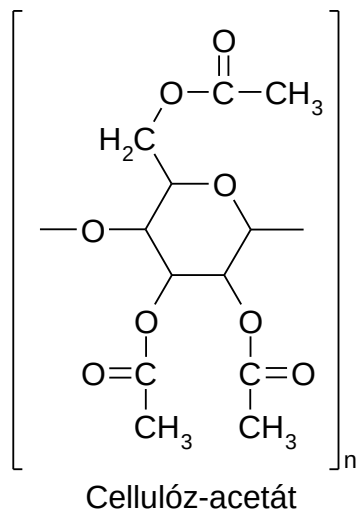
koncentráció-
polarizáció

kicsi a szelektivitás vagy
a fluxus



Ez (is) magyar gyökerű technológia

- Az első, iparban is használható szintetikus membrán előállítása



Zsigmondy Richárd

Szintetikus membrántípusok

szimmetrikus



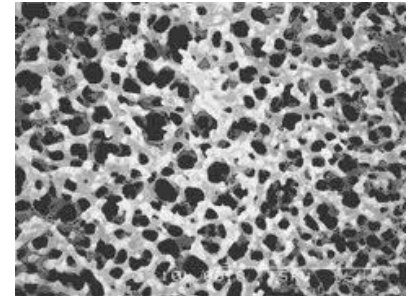
pórusos
(hengeres
pórusok)



pórusos



homogén
(pórus nélküli)



aszimmetrikus



pórusos



pórusos,
fedőréteggel
(bőrréteg)

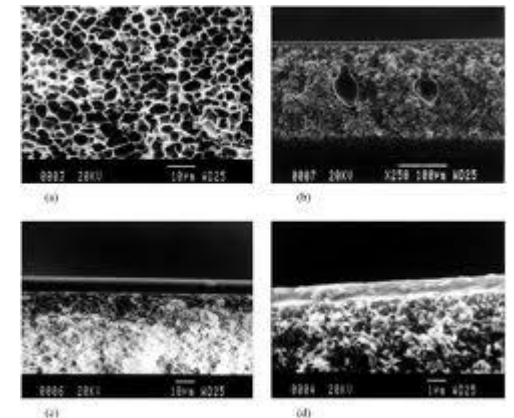
fedőréteg



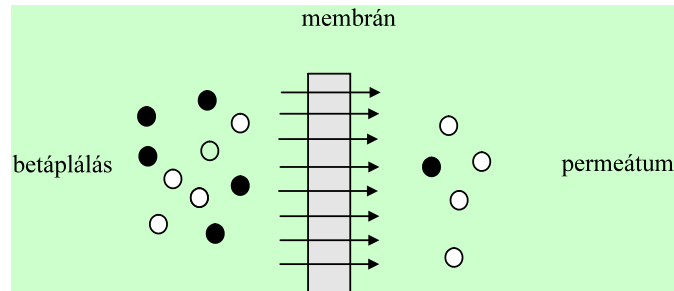
kompozit

sűrű aktív réteg

pórusos
membrán



Membránok jellemzése



Teljesítmény mérése - két paraméter: **fluxus** és **szelektivitás**

Fluxus (*flux*) vagy permeációs sebesség - definíciója:

az a térfogat, amelyet a membrán egységnyi felülete egységnyi idő alatt átereszt.

egységei: $\text{lm}^{-2}\text{h}^{-1}$, $\text{dm}^3\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$, $\text{lm}^{-2}\text{nap}^{-1}$, $\text{cm}^3\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$

Retenció (R)

f – *feed*, p – *permeate*

Mivel R dimenziómentes paraméter, független az alkalmazott koncentráció egységétől.

R értéke 1 (illetve százalékosan kifejezve 100 %) és 0 (%) között változhat, ahol e határok egyrészt a komponens teljes visszatartását ($R = 1$), másrészt az oldott anyag és az oldószer membránon keresztüli „szabad” átvirágását jelentik ($R = 0$)

$$R = \frac{c_f - c_p}{c_f} = 1 - \frac{c_p}{c_f}$$

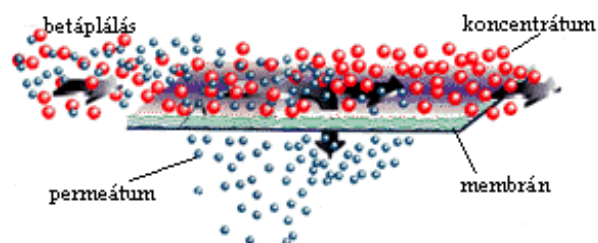
Szeperációs vagy szelektivitási faktor

y_A és y_B a két komponens koncentrációja a permeátumban, x_A és x_B a betáplálásnál.

Értéke 1-nél nagyobb.

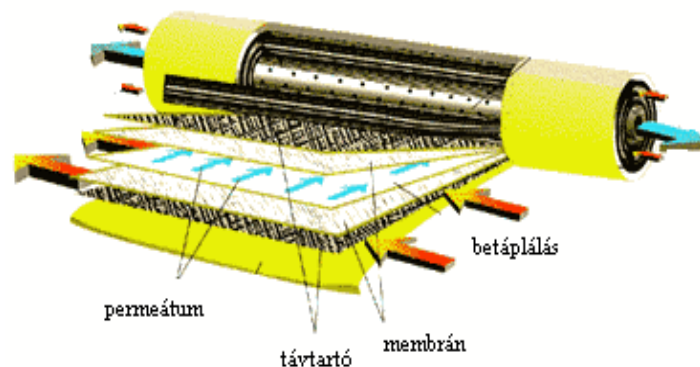
$$\alpha_{A/B} = \frac{y_A / y_B}{x_A / x_B}$$

Membrán modulok, konfigurációk

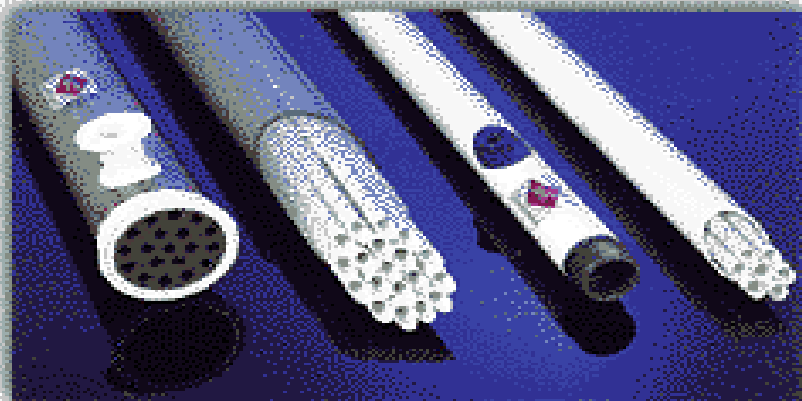


Spiráltekeres
modul

Lapmodul



Cső és kapilláris
modulok



Membránok leggyakoribb alkalmazása

Víz- tisztítás,
előkészítés
(Fordított
ozmózis RO)



Szennyvíztisztítás
(Membrán
bioreaktor MBR)

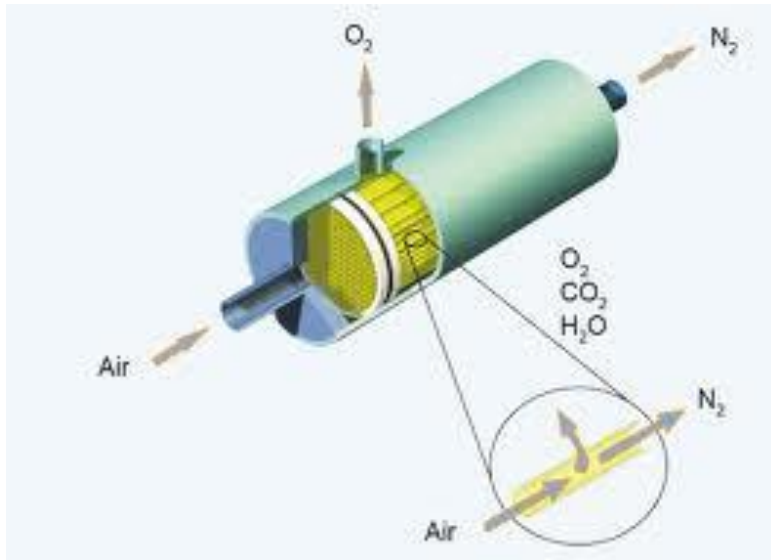
Hemodialízis
(dialízis)



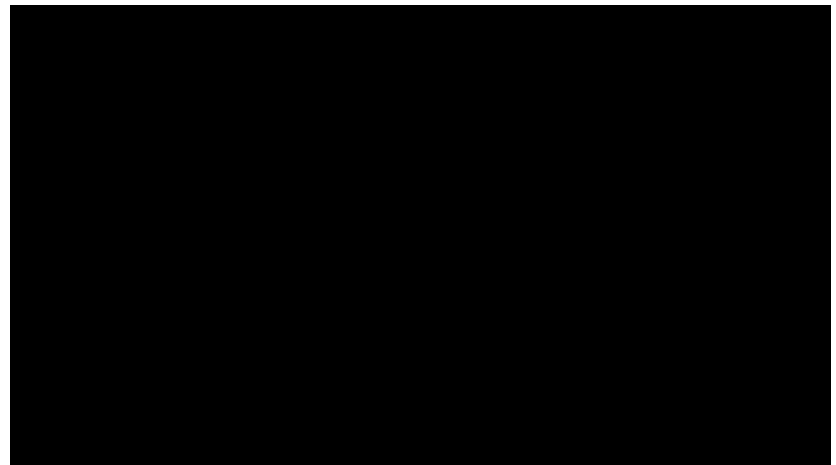
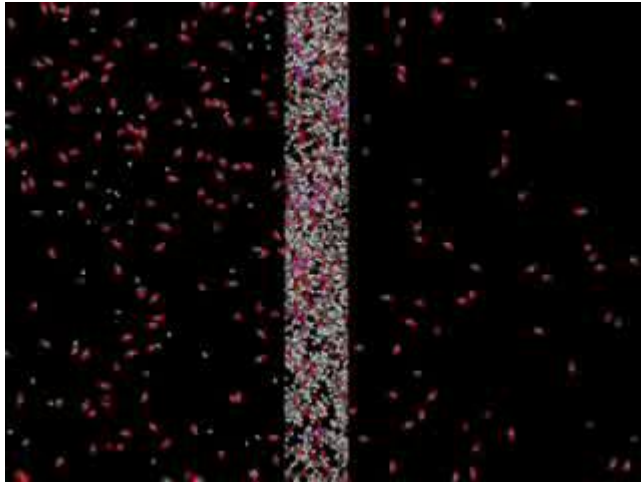
Élelmiszeripar
(ultraszűrés UF)

Gázszeperáció

- Membránokkal nem csak folyadék, hanem gáz fázisban is végezhető elválasztás



Gázszeperáció membránokkal



Alapvető jellemzők

- Pórusos
- Pórusmentes
- Nagyon kevés megfelelő anyag: 97% 6 féle polimer
- Hajtóerő a parciális nyomáskülönbség
- Nagy nyomás → a modulok ára magasabb mint a felhasznált membráné

Hidrogén szeparáció

Szeeparáció	Eljárás	Hagyományos technológia	Membrán anyag	Jelenlegi helyzet
H ₂ /N ₂	Ammónia előállítás	PSA	Poliszulfon	Ipari felhasználás (PRISM)
H ₂ /CO	Szintézis gáz	PSA	Szilikongumi, poliimid	Labor, ipari felhasználás
H ₂ /CH	Olajfinomítás	PSA	Szilikongumi, poliimid	Ipari felhasználás
H ₂ /könnyű szénhidrogének	Etilén üzem	Kriogén desztilláció	PTMSP, PMP Pd	Félüzemi, labor

Levegő szeparáció

Szeparáció	Eljárás	Hagyományos technológia	Membrán anyag	Jelenlegi helyzet
O ₂ /N ₂	Levegő szeparáció	Kriogén technológiák	Szilikon-gumi	Ipari (Cynara; separex; GMS; Air Products)
			Poliszulfon	Ipari (PERMEA Air Products)
			Poliimid	Ipari (MedsI; Dow-Generan; UBE)
			Polifenilén	Ipari (Aquillo)
			Etil-cellulóz	Ipari (Air Liquide)
			Perovszkit, Pd	labor

Metán, földgáz szeparáció

Szeparáció	Eljárás	Hagyományos technológia	Membrán anyag	Jelenlegi helyzet
N_2/CH_4	Nitrogén eltávolítás	Kriogén desztilláció	Szilikon gumi, PMP, Parel, PEBAX	Ipari, félüzemi, labor
H_2O/CH_4	Víztelenítés	Glikolos elnyeletés	Cellulóz-acetát, Poliimid, Poliaramid	Ipari felhasználás
CO_2/CH_4	Földgáz kezelés	Aminos abszorpció	Cellulóz-acetát	Ipari (Cynara-NATCO, Grace-separex)
			Poliaramid	Ipari Meadl
			Poliimid	Ipari (Medal, UBE, UOP)
			Perfluoro-polimerek	Ipari MTR

Membrános tervezési üzemelési tapasztalatok

- Aminós és membrános leválasztó



Qadirpur (1995) 265 MM SCFD 59 bar.

6.5% $\rightarrow$ 2%



UOP
cellulóz
acetát

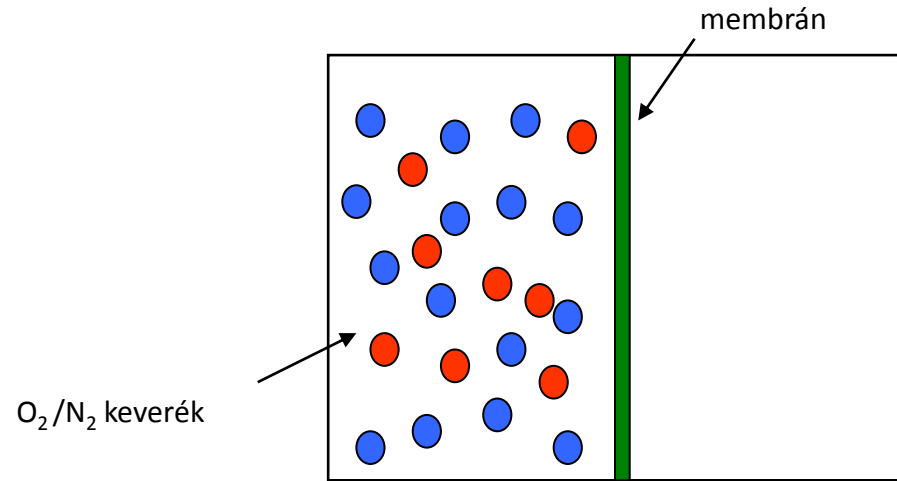
Membrános tervezési üzemelési tapasztalatok



8 MMSCFD,
4.5% $\rightarrow$ 2%.
July 2004

AirLiquid,
Petroco

Membrán modul modellje

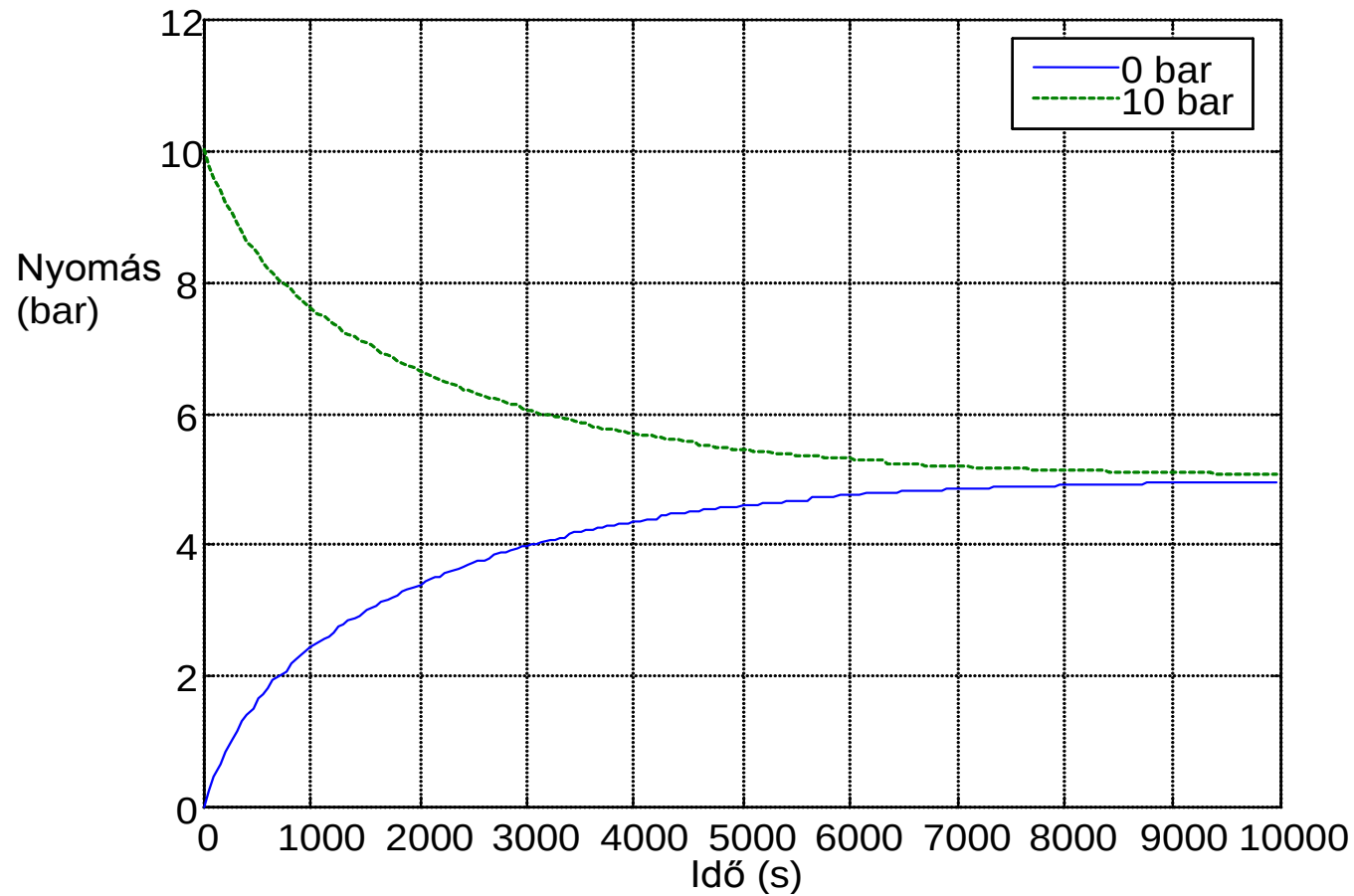


$t=0$

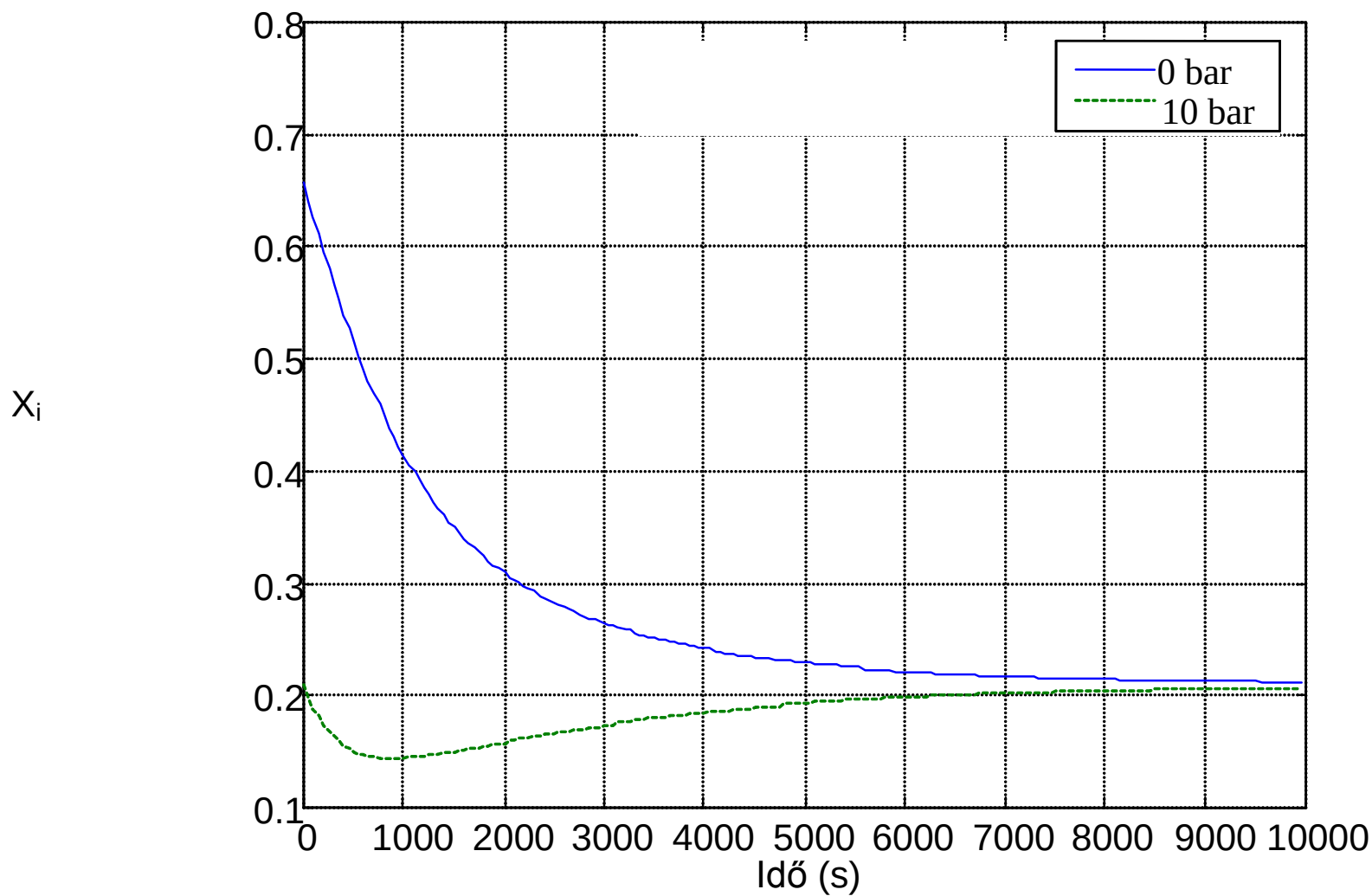
$p=10 \text{ atm}$
 $x_{\text{O}}=0.21$
 $V=100 \text{ cm}^3$

$p=0 \text{ atm}$
 $x_{\text{O}}=0$
 $V=100 \text{ cm}^3$

Membrán modul modellje



Membrán modul modellje



$$J_i = \frac{D_i(c_{0,i} - c_{l,i})}{l}$$

D a diffúziós koefficiens

$c_{0,i}$ és $c_{l,i}$ a két oldalon mérhető koncentráció,
l a membrán vastagsága

$$c_i = S_i p_i$$

Henry-törvényben szereplő parciális nyomások

S_i az i. komponens oldhatósági koefficiense a membránban

$$J_i = \frac{D_i S_i (p_{0,i} - p_{l,i})}{l}$$

permeabilitási koefficiens (P):

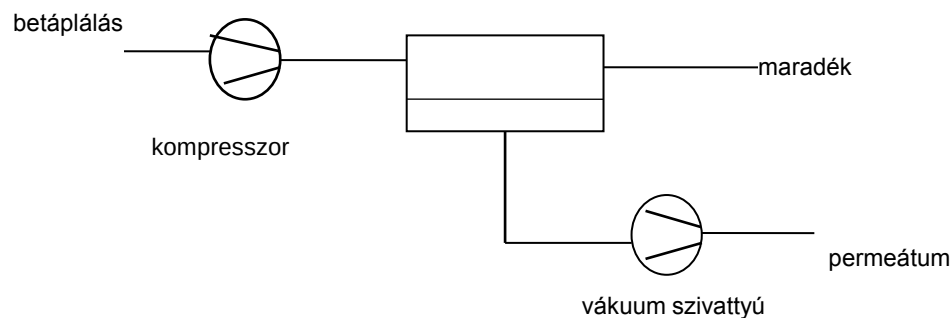
$$P = D S$$

$$J_i = \frac{P_i (p_{0,i} - p_{l,i})}{l} = \frac{P_i}{l} \Delta p_i$$

A fluxust határozza meg

$$\alpha_{i/j} = \frac{P_i}{P_j}$$

szelektivitás



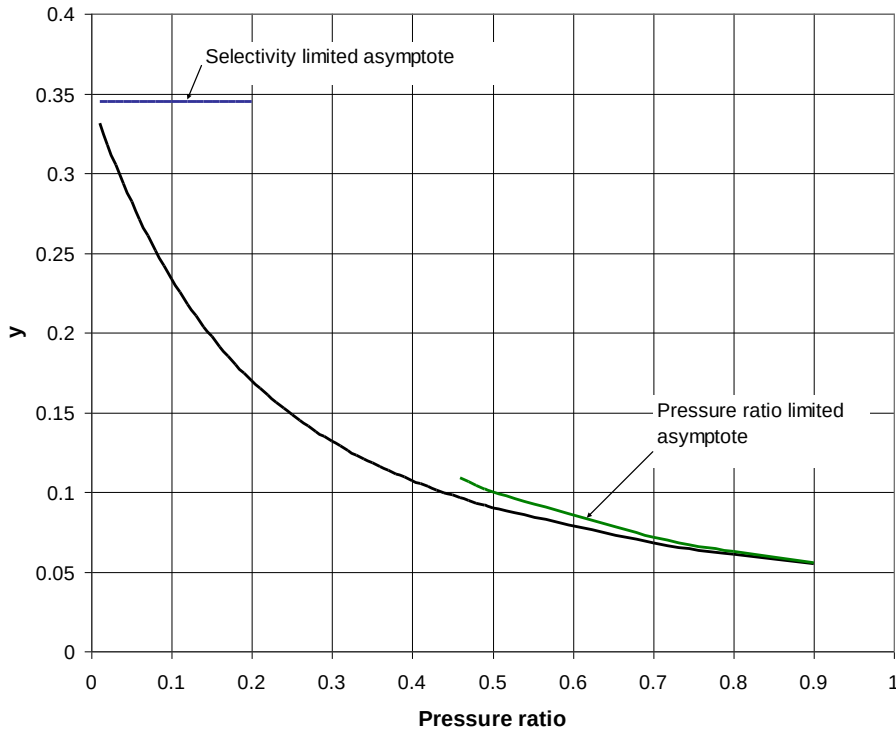
Gázszeperáció megvalósítása

A permeabilitást sokszor ún. Barrer egységben adják meg (tiszta gázok!!):

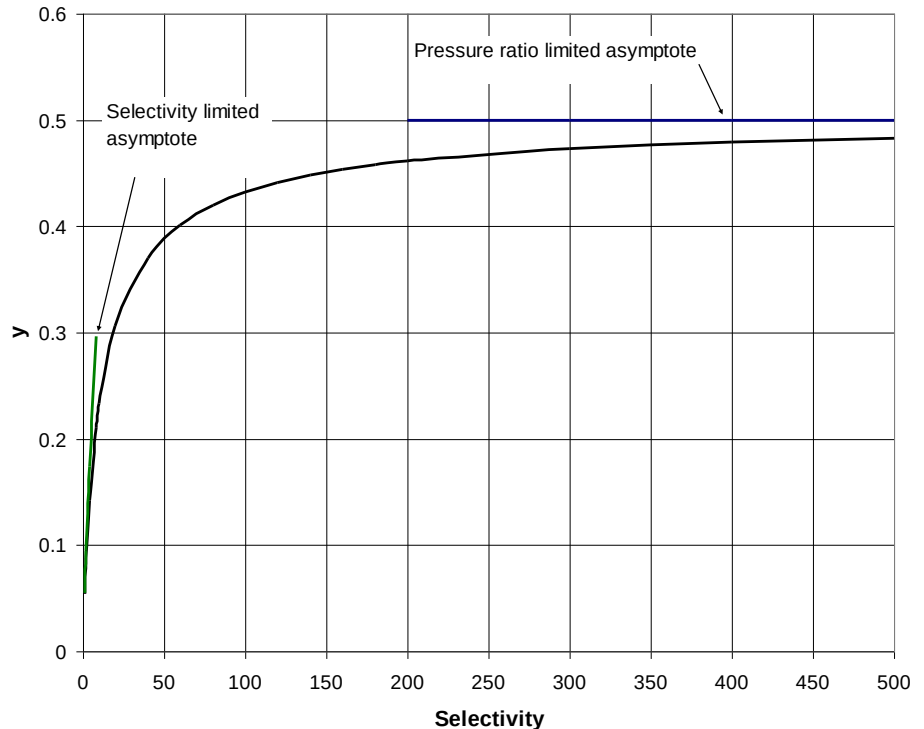
$$1 \text{ Barrer} = 10^{-10} \text{ cm}^3 (\text{STP}) \text{ cm cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ cmHg}^{-1} = 0,76 \cdot 10^{-17} \text{ m}^3 (\text{STP}) \text{ m m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$$

$$\text{Számítása: GPU (gas permeability unit)} = 10^{-6} \text{ cm}^3 (\text{STP}) \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ cmHg}^{-1}$$

WS1 – Process Analysis



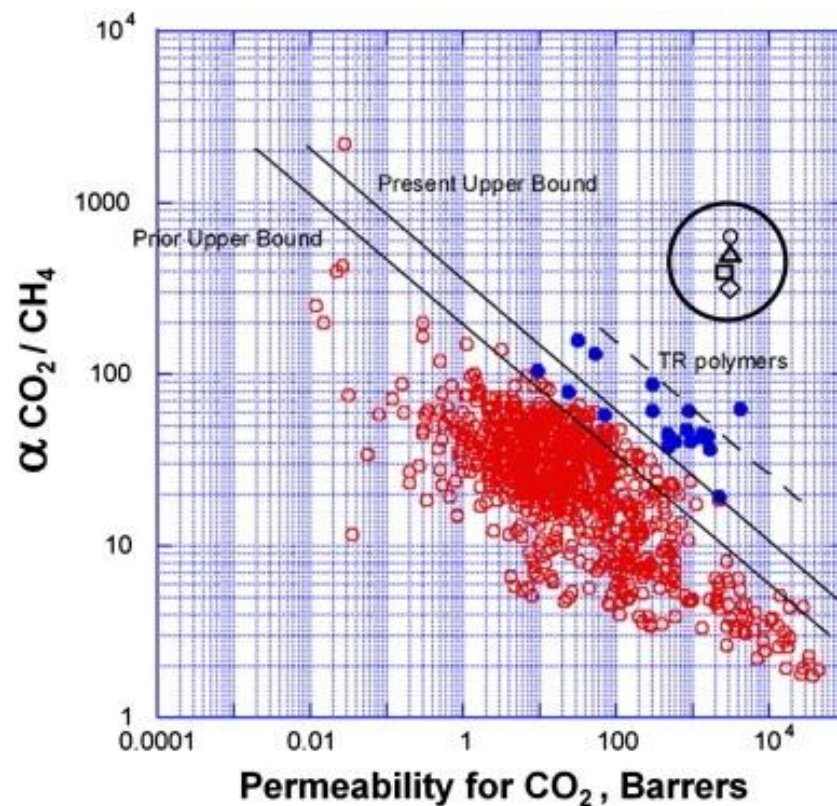
$x=0.05,$
 $\alpha=10$



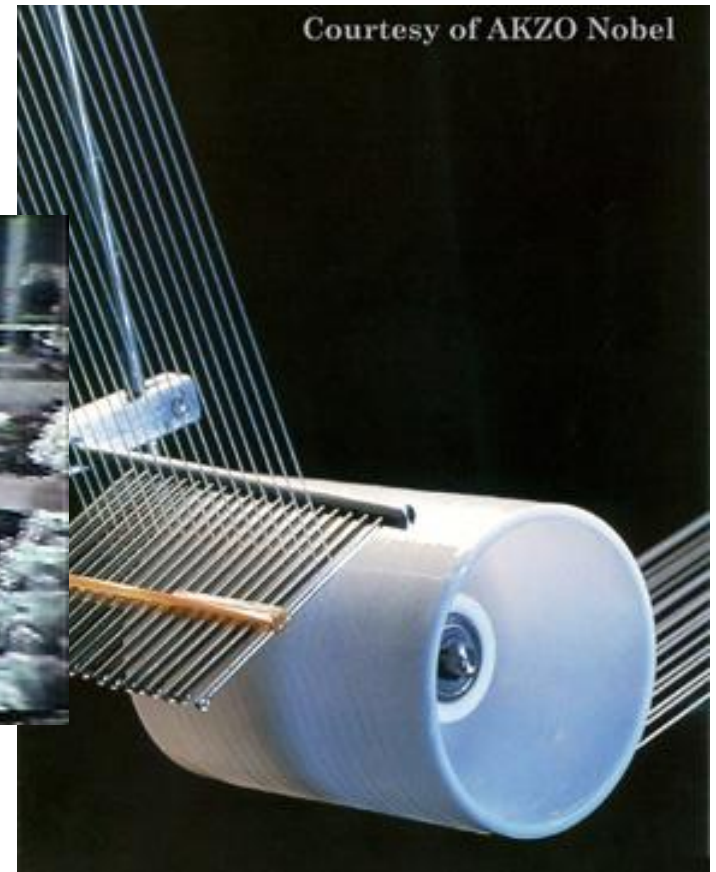
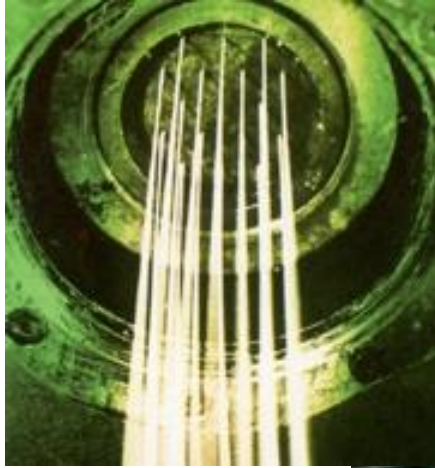
$x=0.05,$
 $\gamma=0.1$

Permeabilitási adatok (CO₂)

Polimer	Permeabilitás Barrer	P _{CO2} /P _{CH4}
Poli-trimetilszililpropin	33 100	2
Szilikon gumi	3 200	3,4
Természetes gumi	130	4,6
Polisztirol	11	8,5
Poliamid (Nylon 6)	0,16	11,2
Poli(vinil klorid)	0,16	15,1
Polikarbonát	10	26,7
poliszulfon	4,4	30
Polietilén-tereftalát	0,14	31
Cellulózacetát	6	31
Poli(éterimid)	1,5	45
Poli(éterszulfon)	3,4	50
poliimid	0,2	64



Wet Fiber Spinning



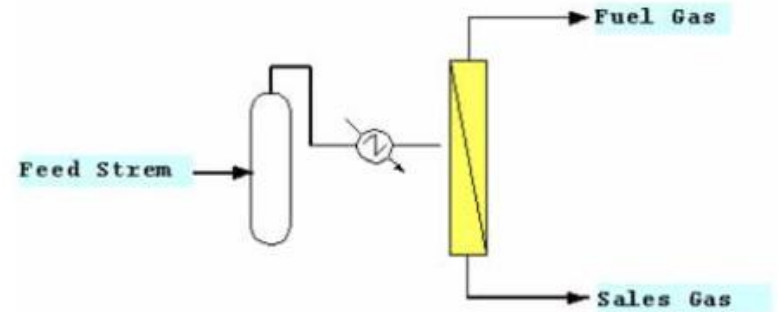
Courtesy of AKZO Nobel

Membrán gyártók



UBE

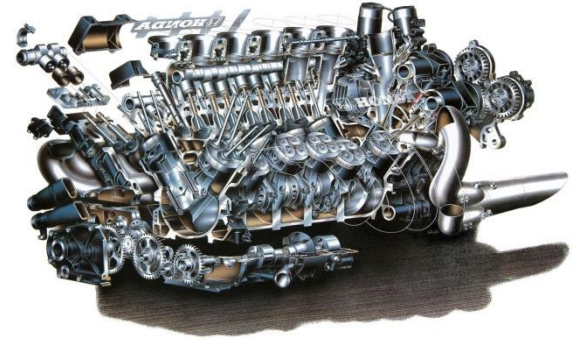
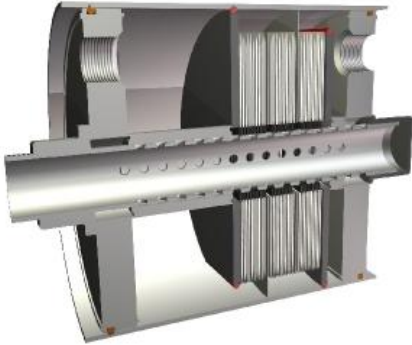
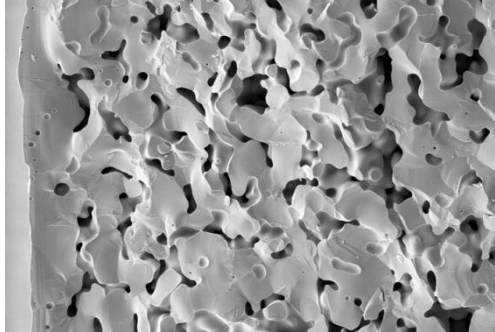
Contaminants	Max. allowable content
Water vapor	Up to saturated
H ₂ S	3 vol%
NH ₃ & Amines	100 vppm
Methanol	5 vol%
Methyl Ether	5 vol%
Benzene	1 vol%
Toluene	2000 vppm
C ₅ + Hydrocarbons	Up to saturated



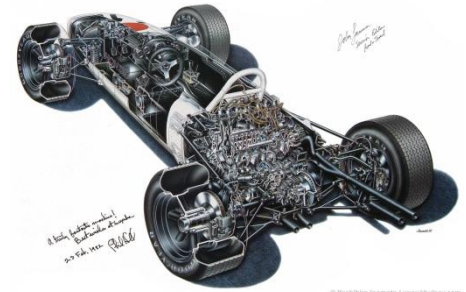
	Feed Stream	Sales Gas	Fuel Gas
Flow Rate, MMSCFD	20	16.1	3.9
Pressure, psig	950	940	75
Composition, mol%	CO ₂	6.1	1.8
	CH ₄	84.0	87.0
	C ₂ +	7.9	9.3
	N ₂	2.0	1.9

Dimentions	Max. Press. (psig)
8ind x 160inl	2200
8ind x 80inl	2200
4ind x 160inl	2200
4ind x 80inl	2200

Miért?



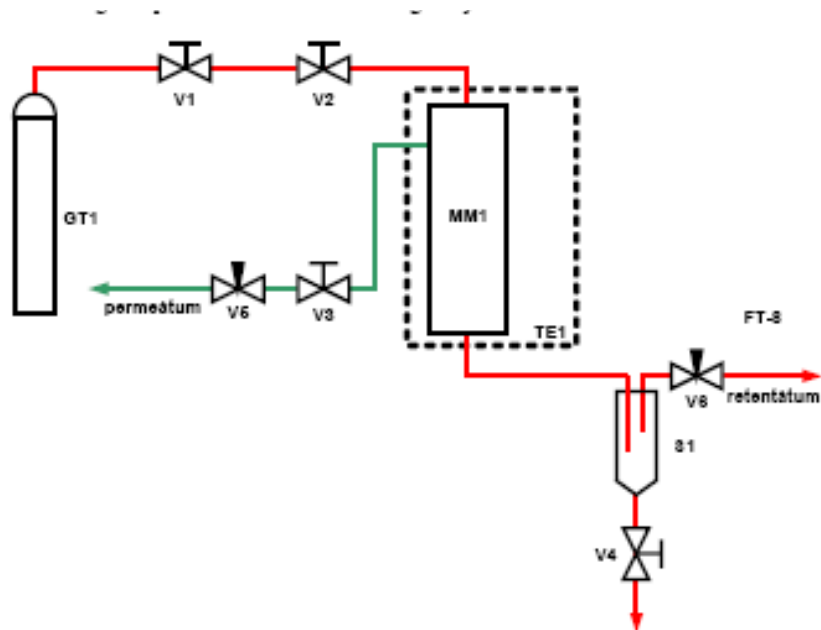
© Yoshihiro Inamoto / www.khulsey.com



© Yoshihiro Inamoto / www.khulsey.com



Mérési módszer GSMS 100



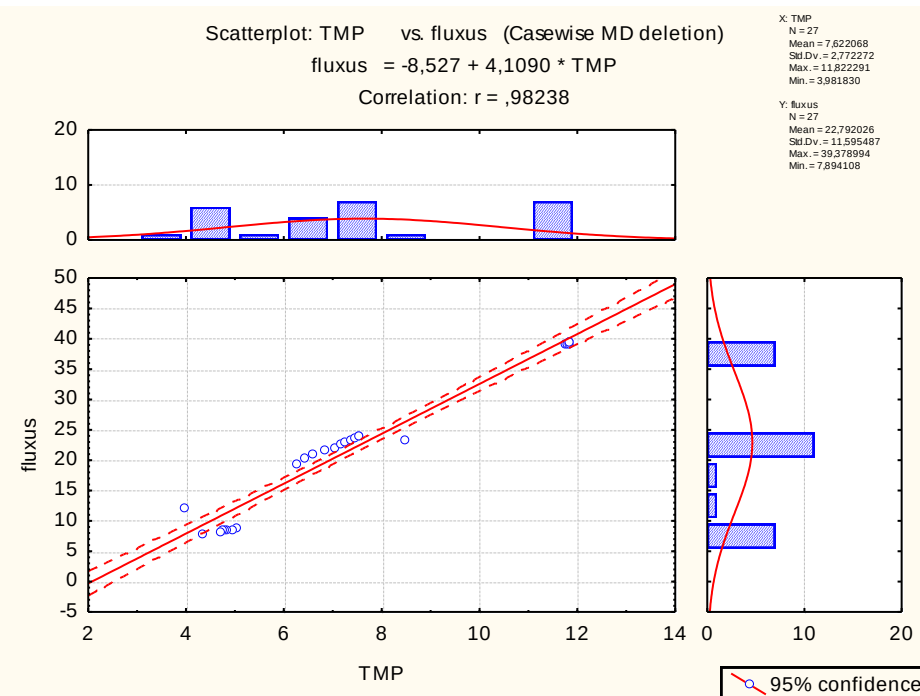
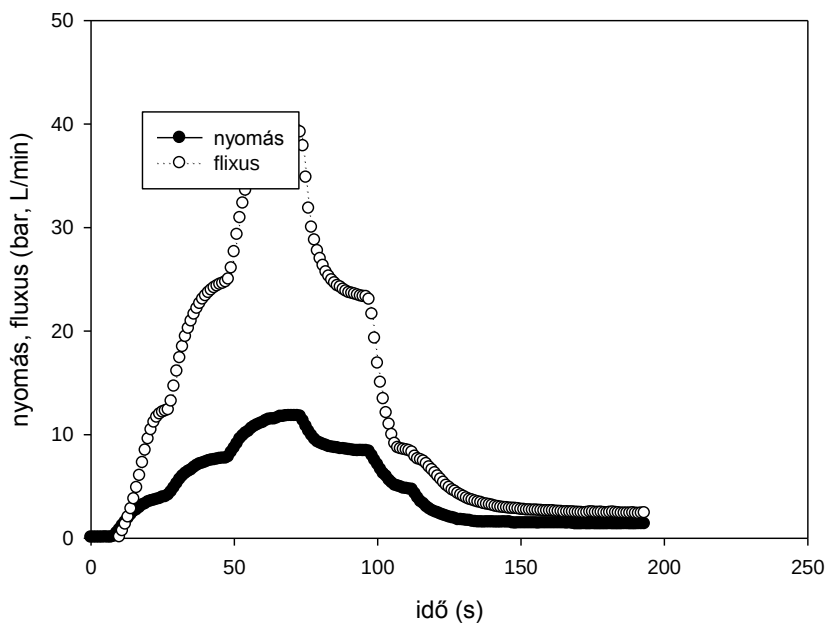
1: V1, V5 szabályozva, V2, V3 nyitva, V4, V6 zárva

2: V1, V5, V6 szabályozva, V2, V3 nyitva, V4 zárva



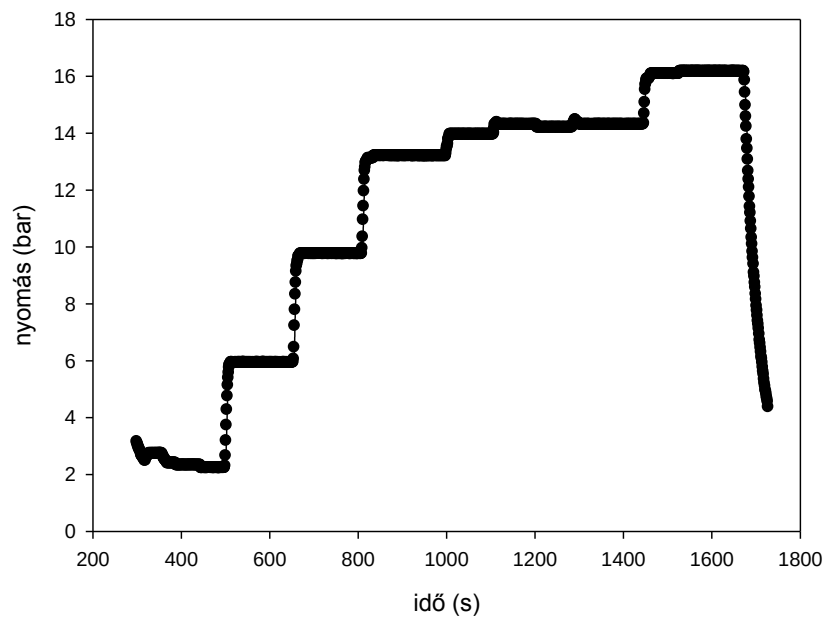
Mérési módszer fluxus meghatározás

fluxus meghatározás

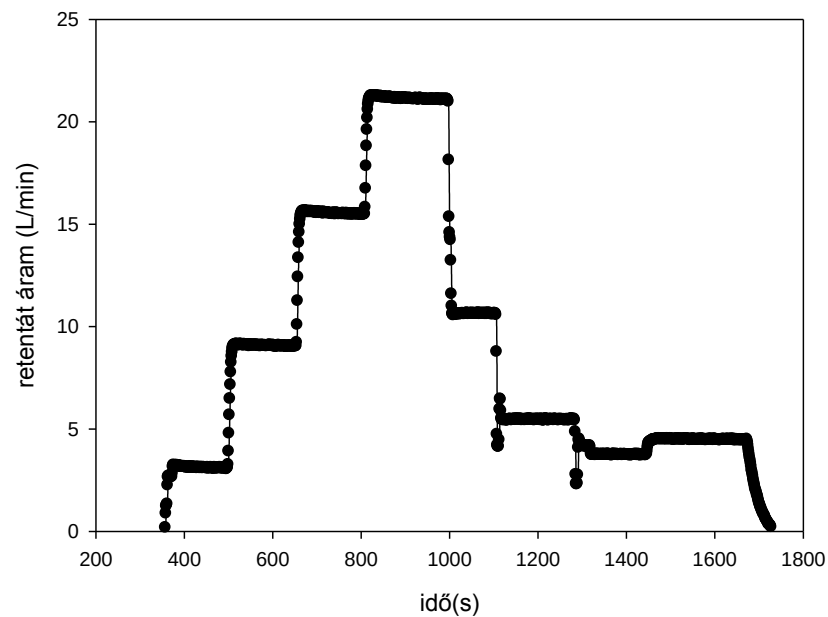


Mérési módszer

PT1

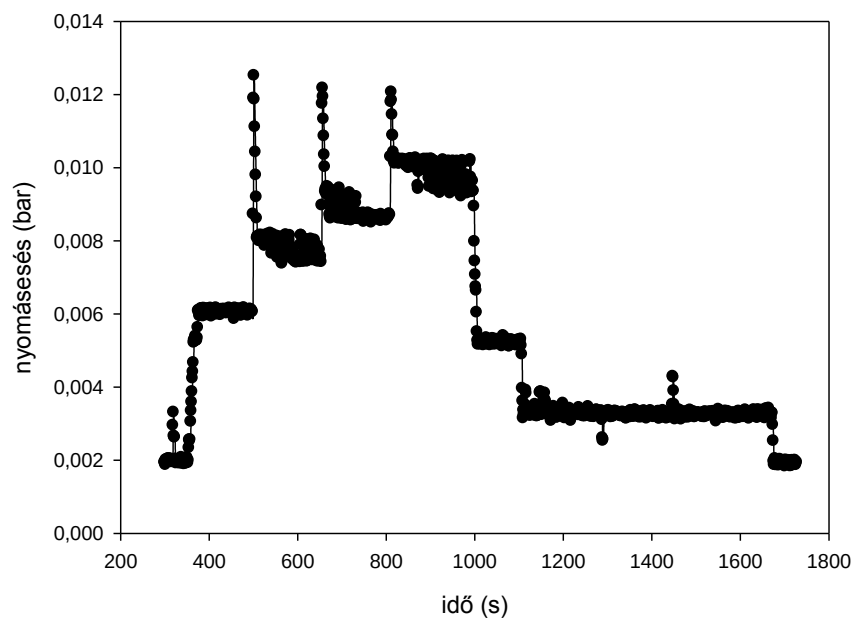


retentát áram

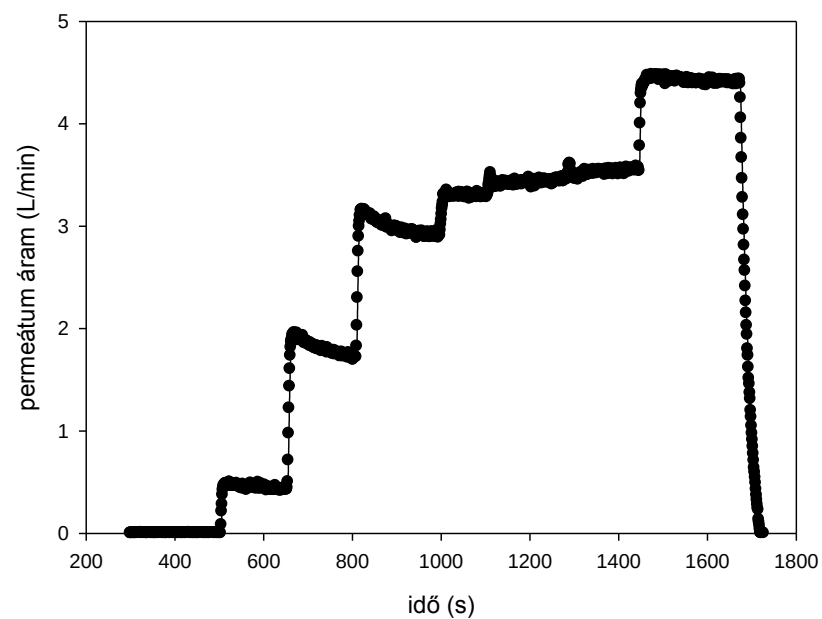


Mérési módszer

nyomásesés

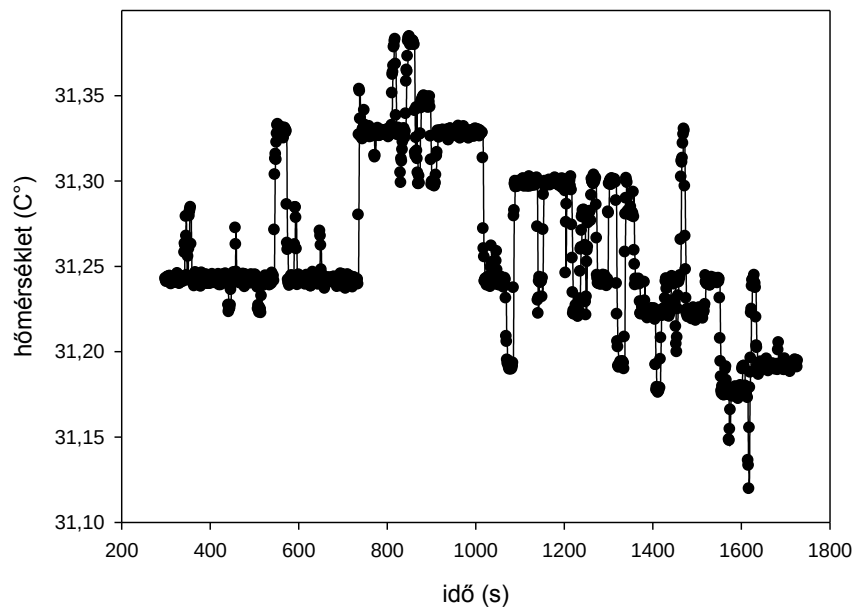


permeátum áram

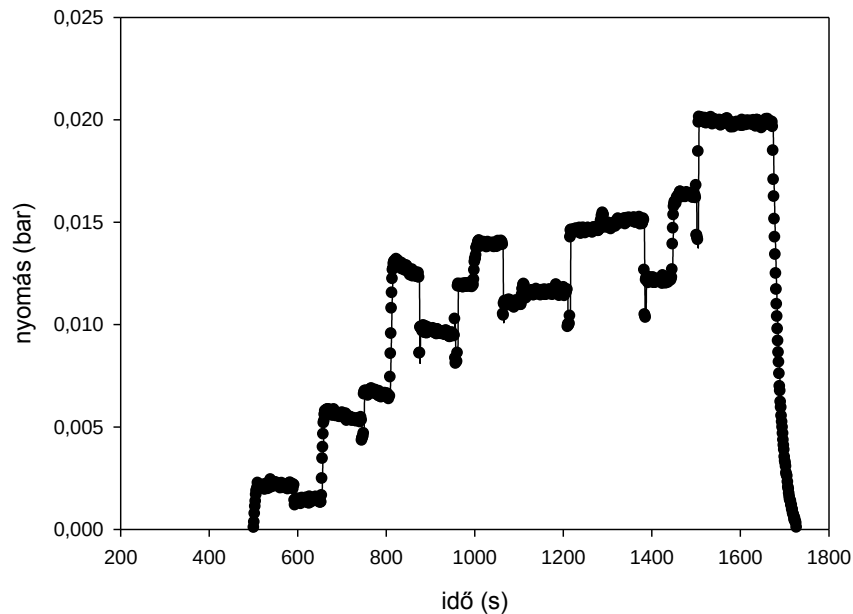


Mérési módszer

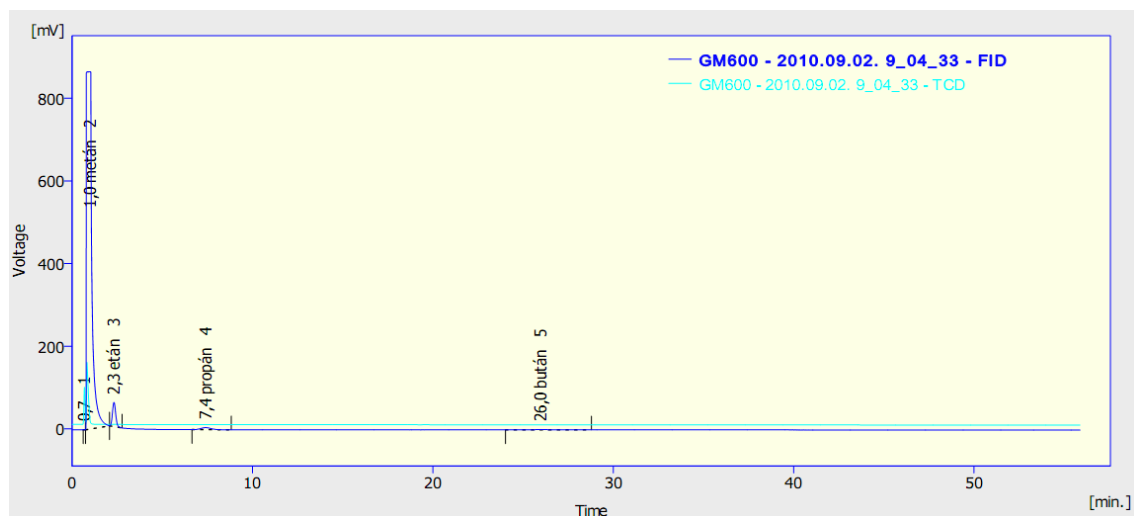
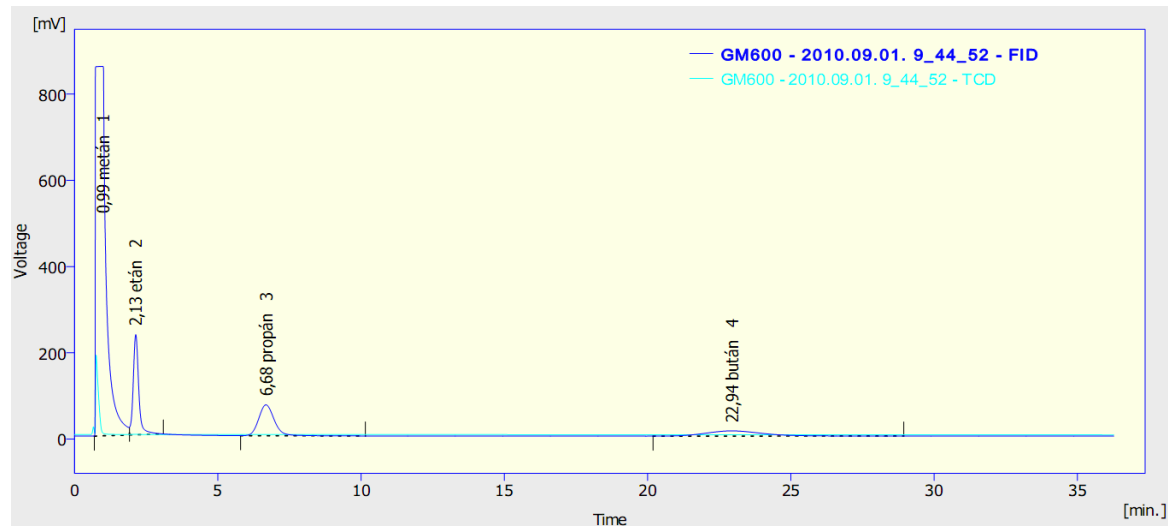
hőmérséklet



permeátum nyomás



Mérési módszer



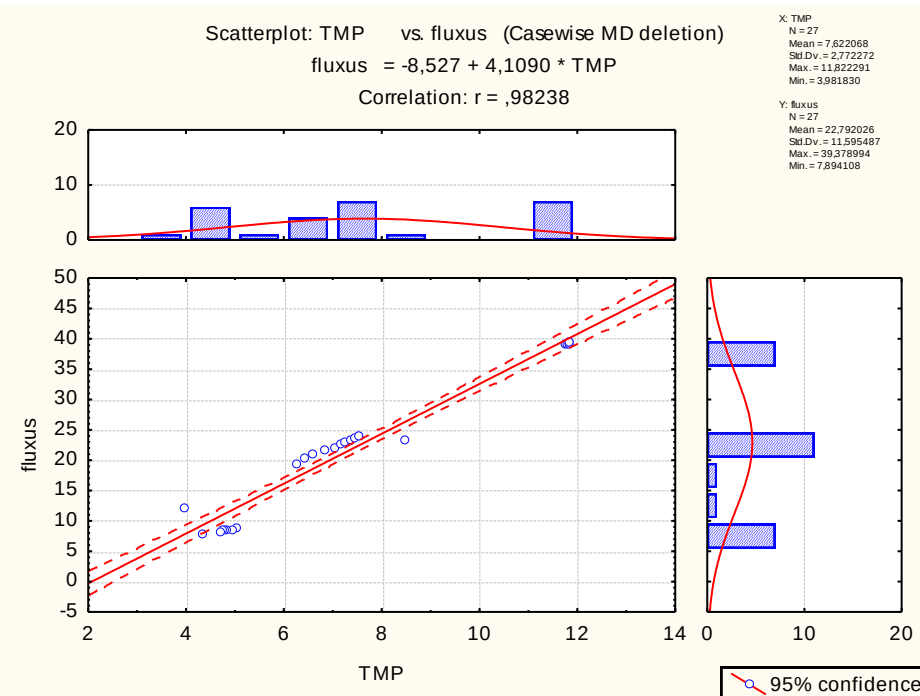
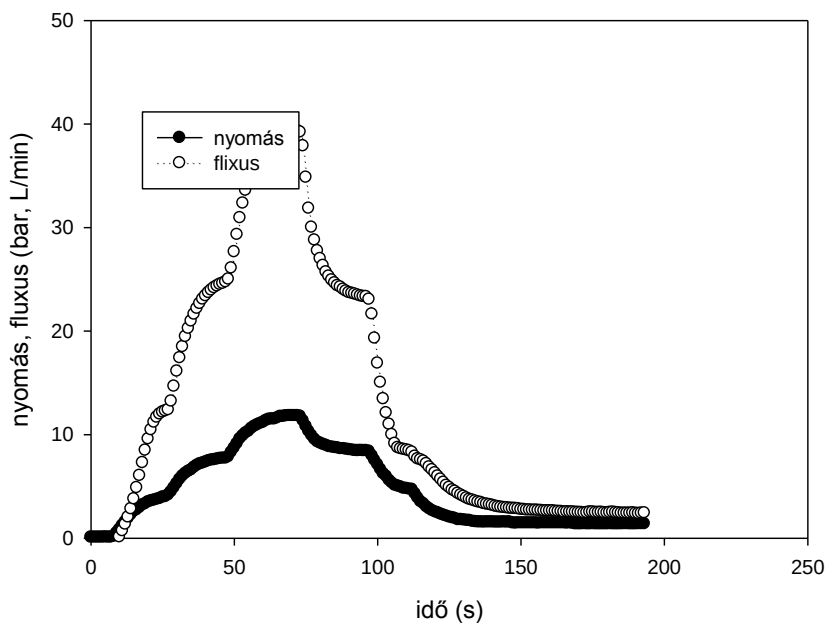
CO₂ és H₂S földgázból történő együttes szeparációja

Modell és mintagázokat alkalmaztunk

- SIAD 0.3% etán 0.2% propán és 0.1% bután +91 ppm H₂S
- SIAD + 10% CO₂
- Üllés
- Üllés + 130 ppm H₂S
- Nagylengyel

Mérési módszer fluxus meghatározás

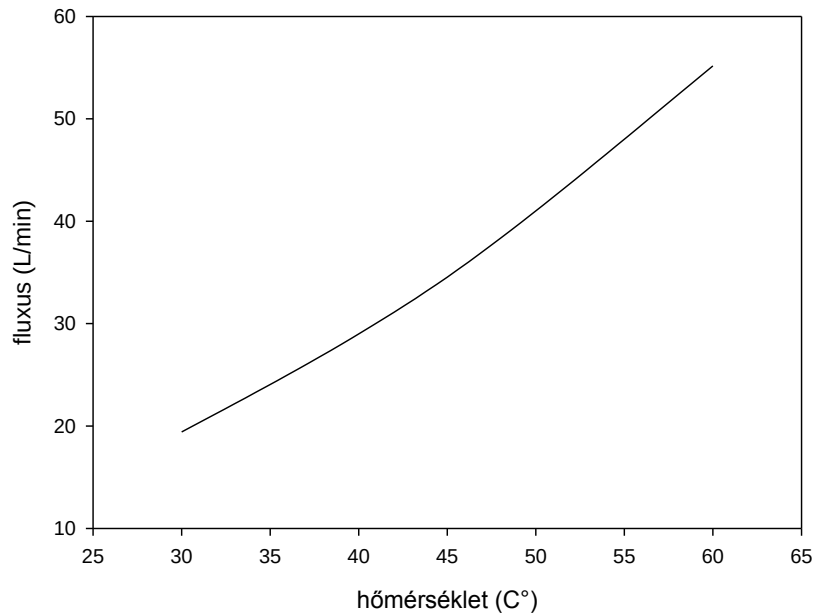
fluxus meghatározás



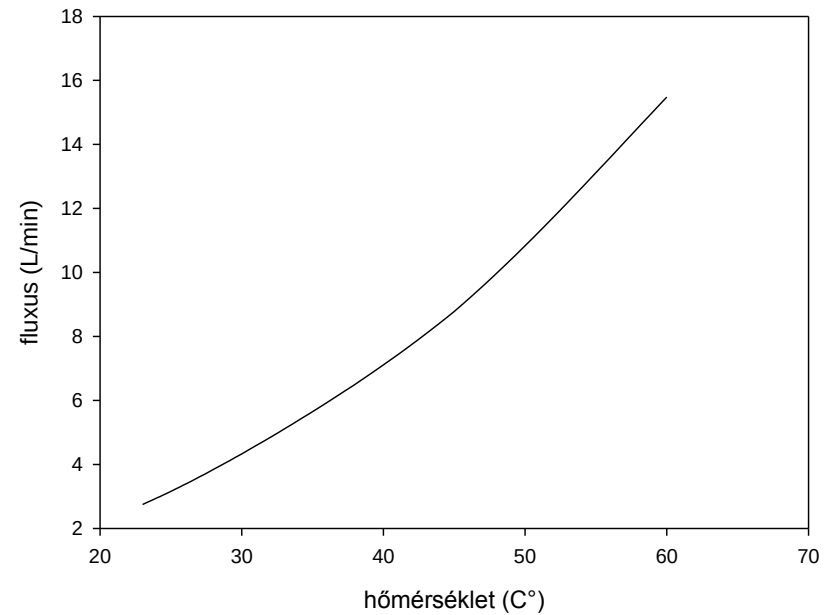
SIAD modellgáz

- Fluxusok, TMP=10bar

UBE CO5

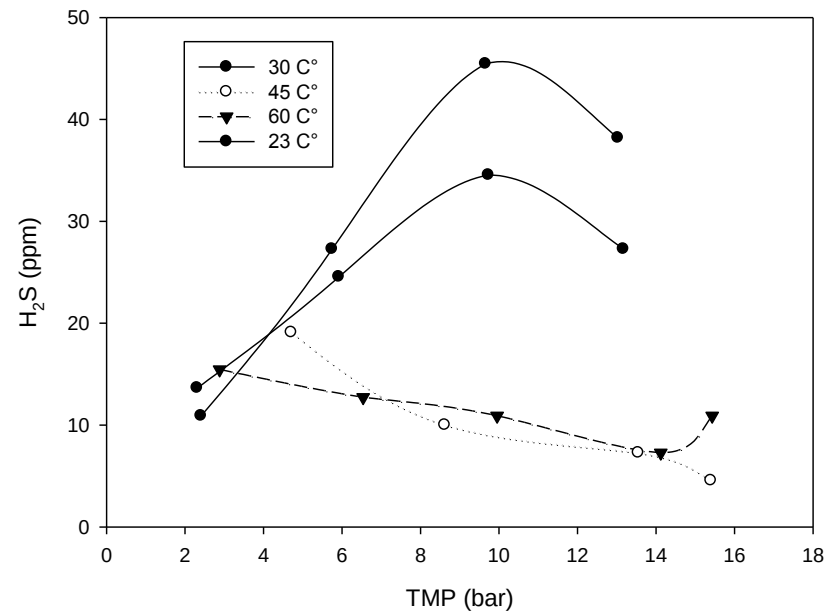
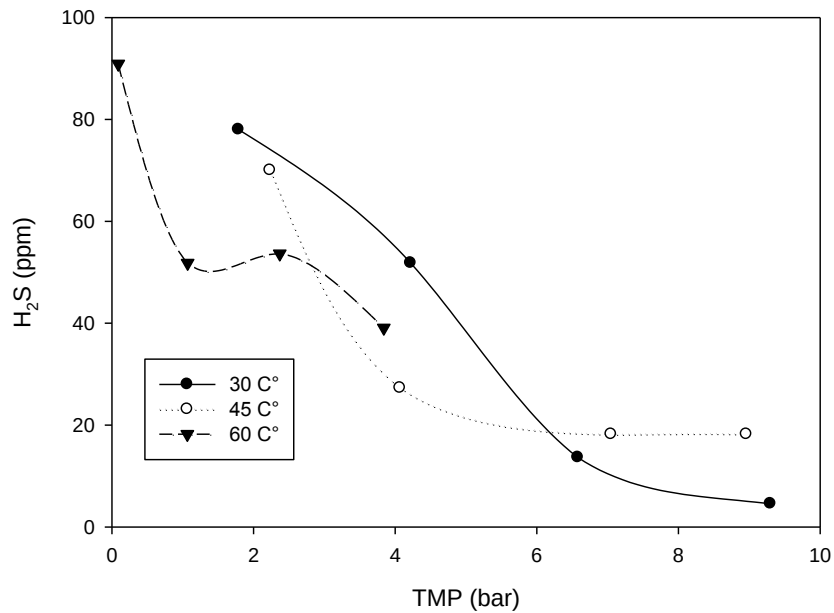


UBE N5



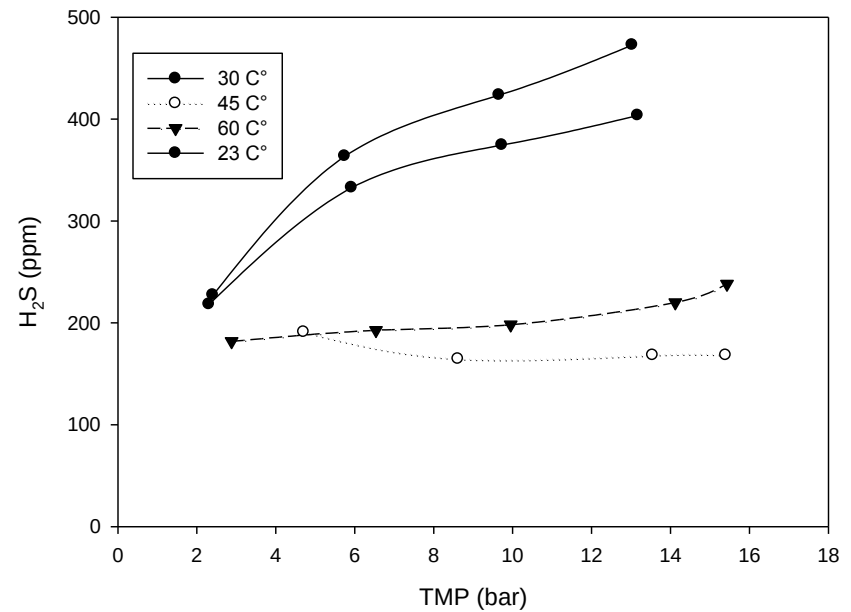
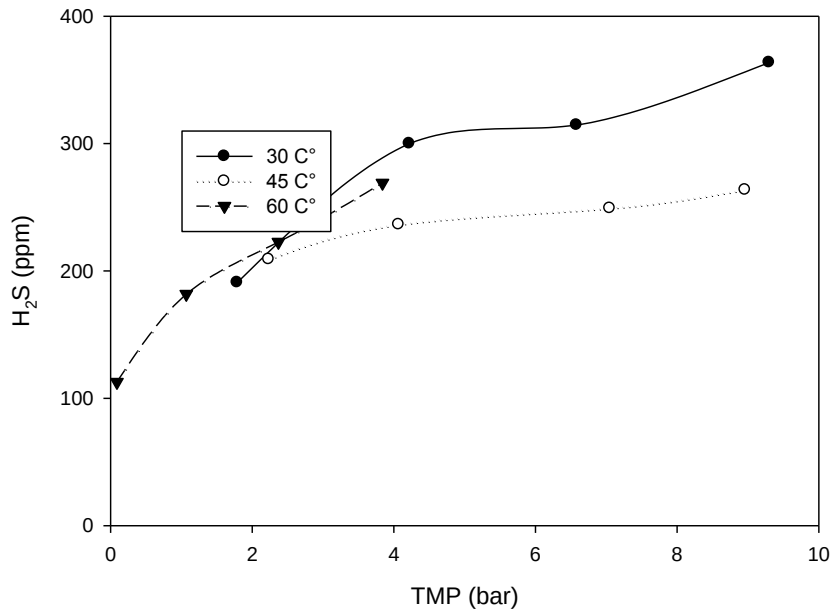
SIAD modellgáz

- TMP hatása a retentát H_2S koncentrációra



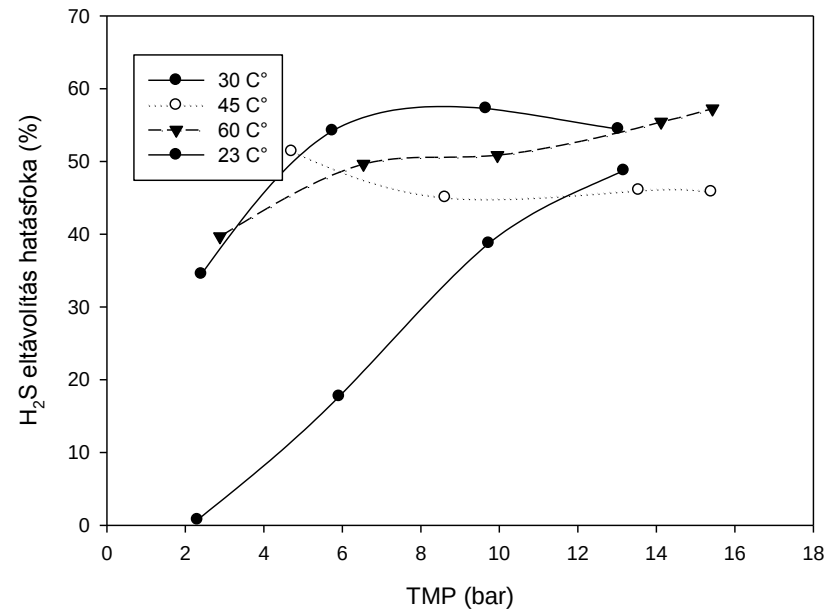
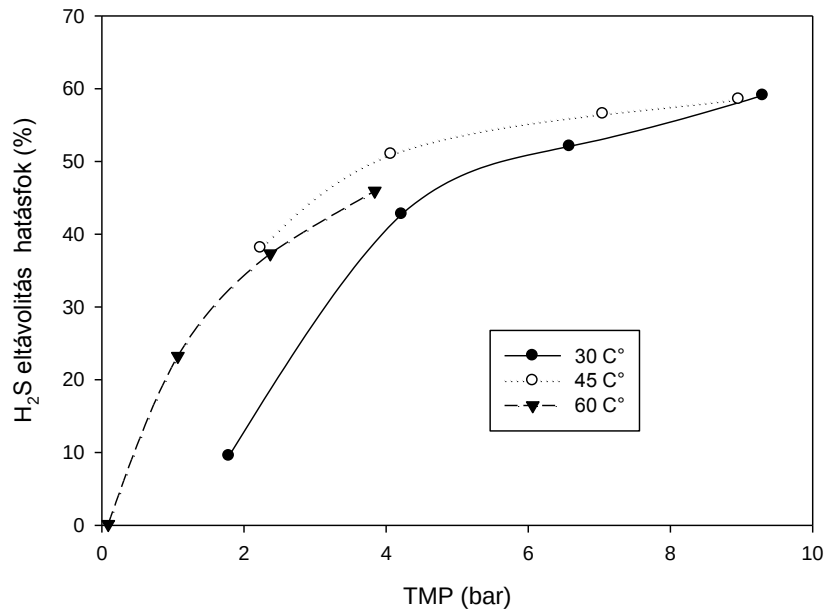
SIAD modellgáz

- TMP hatása a permeátum H_2S koncentrációjára



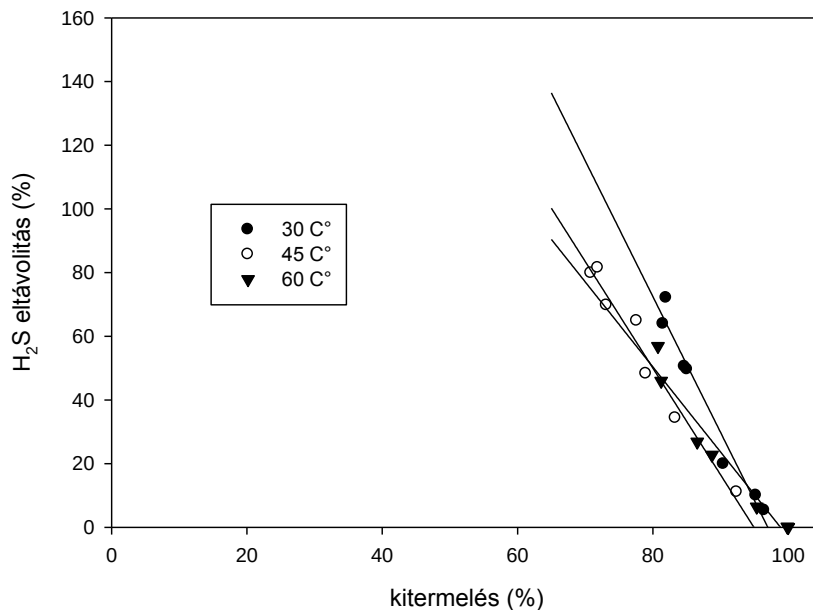
SIAD modellgáz

- kénhidrogén eltávolítás hatásfoka a TMP függvényében

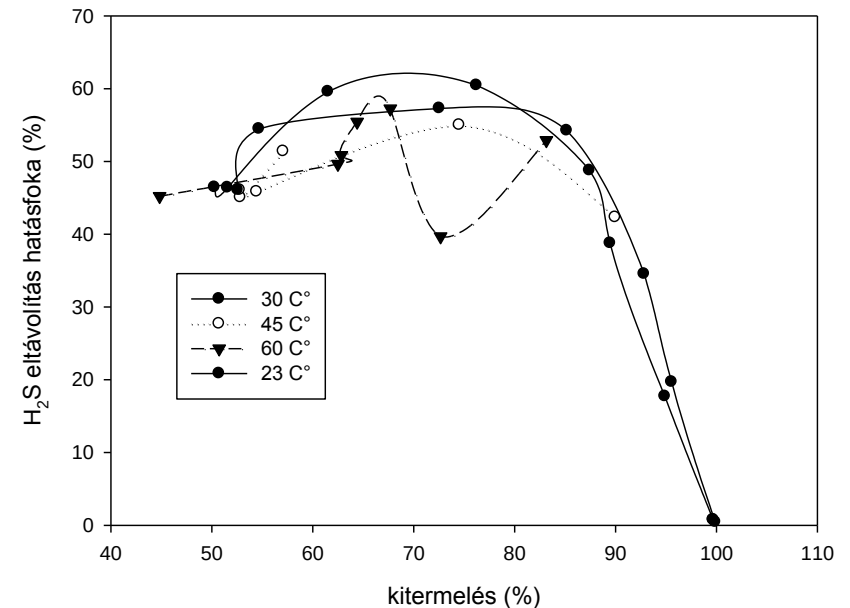


SIAD modellgáz

- kénhidrogén eltávolítás hatásfoka a kitermelés függvényében



komponens	visszatartás (%)
etán	44
propán	91
bután	96

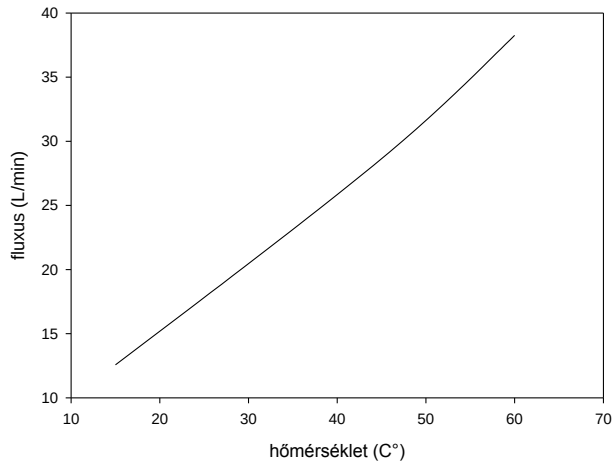


komponens	visszatartás (%)
etán	54
propán	94
bután	97

SIAD modellgáz +CO₂

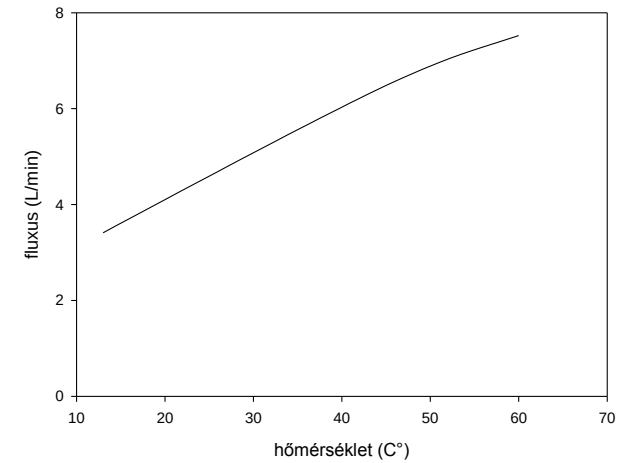
: A hőmérséklet hatása a membránra (dP=10 bar)

UBE CO5



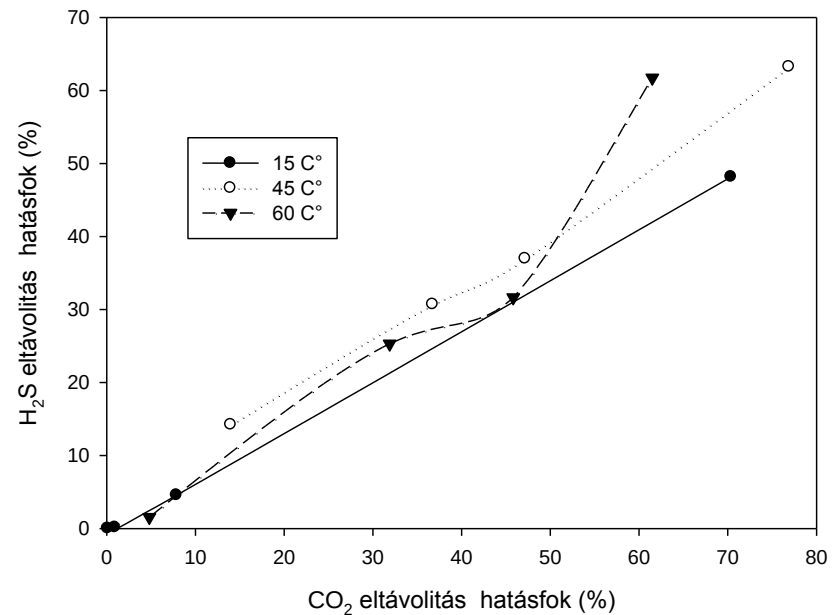
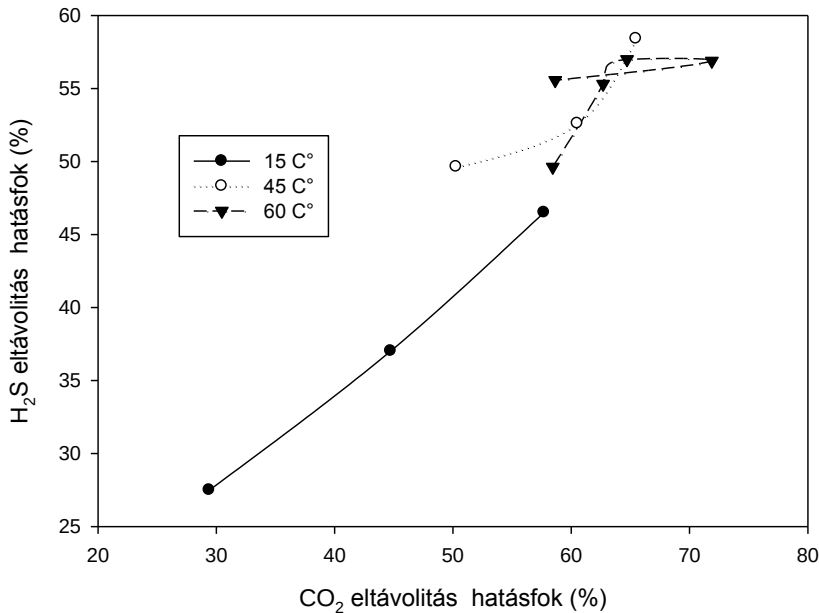
Komponens	Koncentráció
Metán	88%
Széndioxid	11%
Etán	0,3%
Propán	0,2%
Bután	0,1%
Kénhidrogén	120 ppm

UBE N5

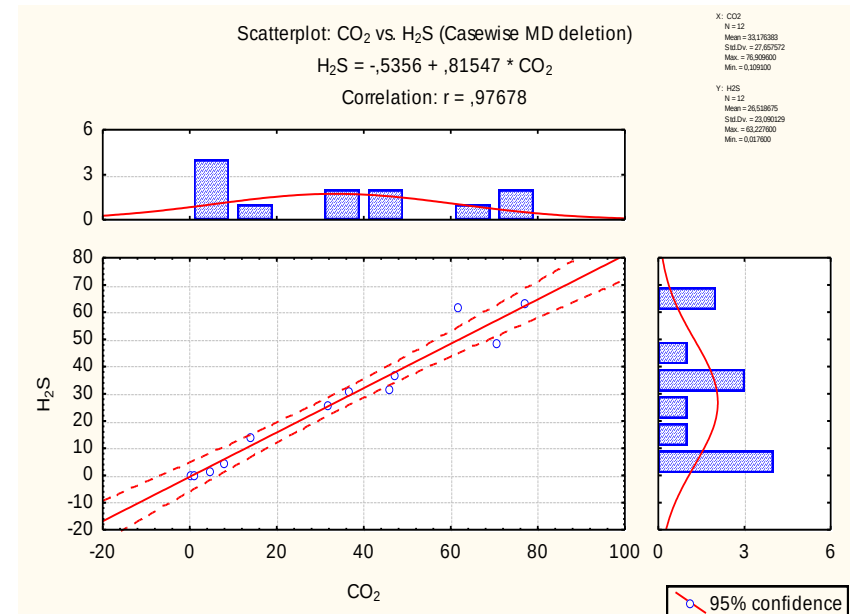
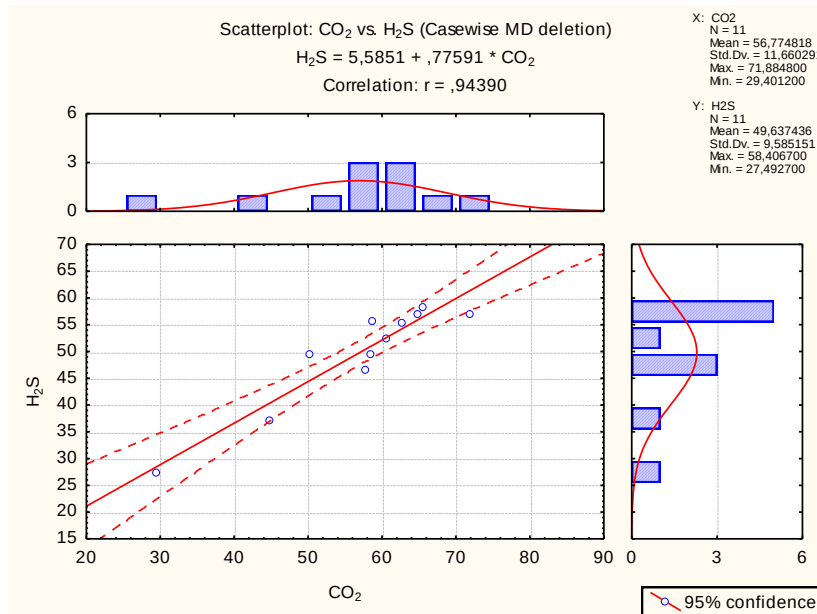


SIAD modellgáz +CO₂

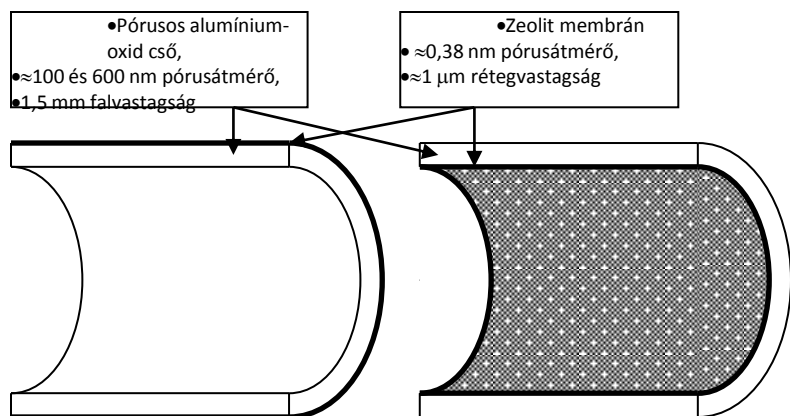
- A kénhidrogén eltávolítás hatásfoka a széndioxid eltávolítás hatásfoka függvényében



SIAD modellgáz +CO₂



SAPO-34 zeolit membrán

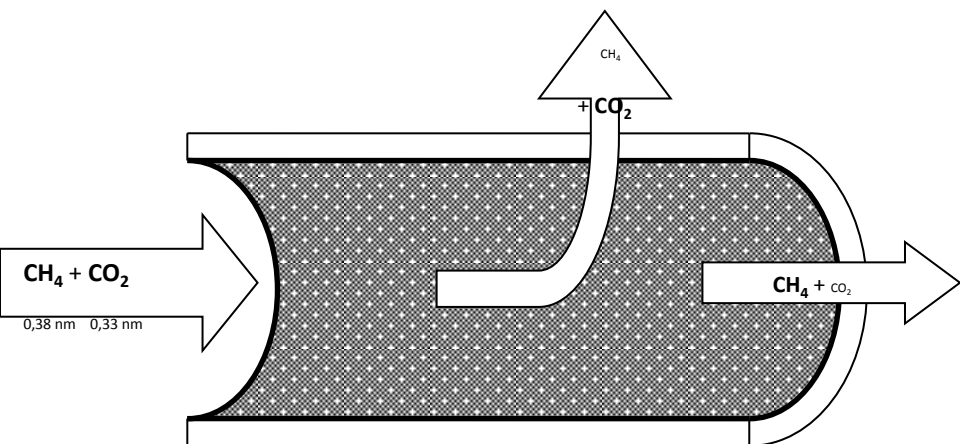


Szegedi Tudományegyetem

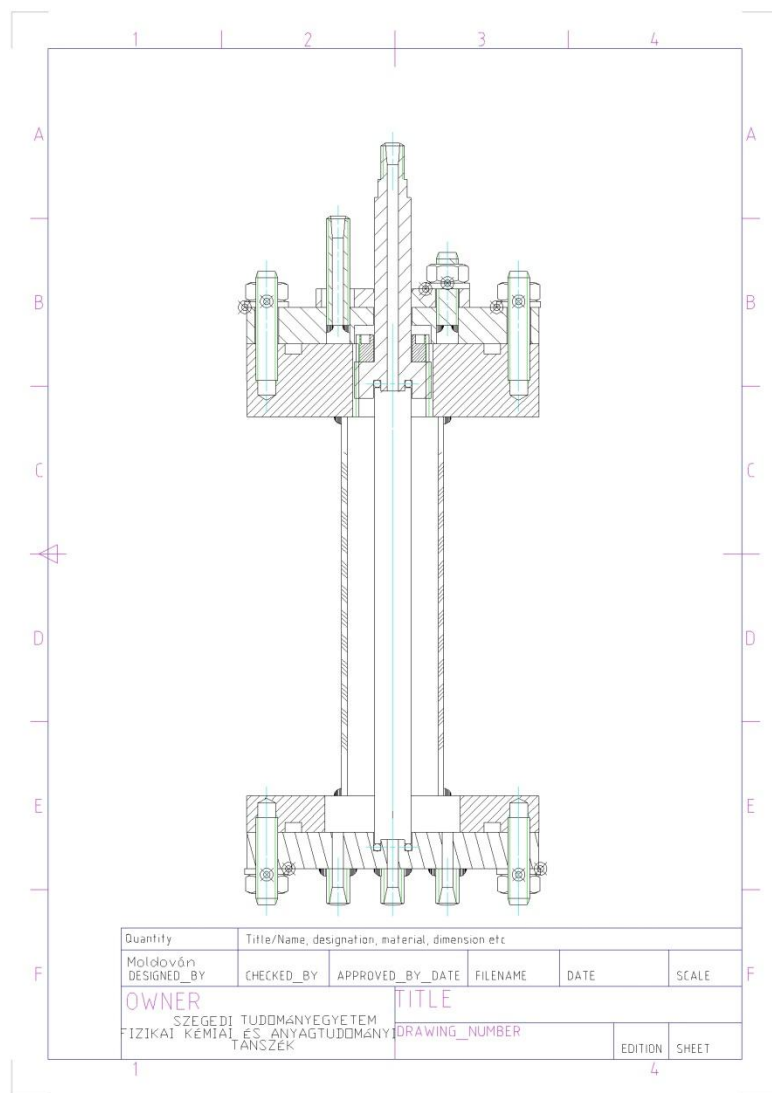


Fizikai Kémiai és Anyagtudományi Tanszék

Dr. Erdőhelyi András

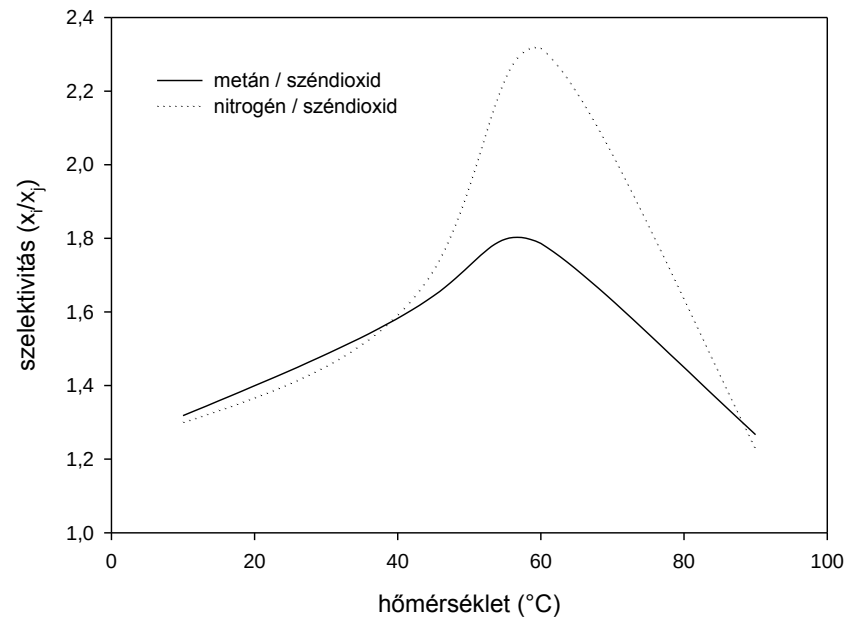
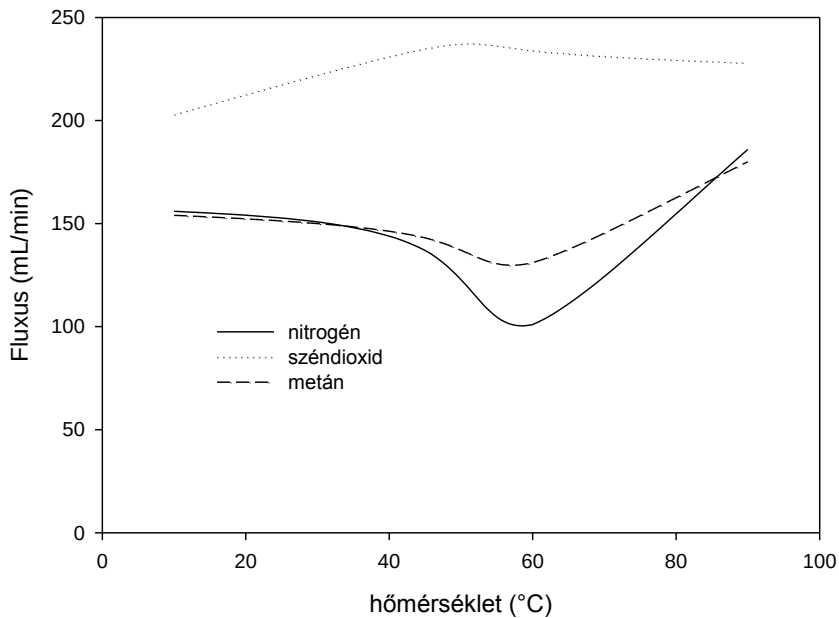


SAPO-34 zeolit membrán



Komponens	Fluxus 5 bar nyomáson (mL/min)	Szelektivitás (CO ₂)
Nitrogén	156±8	1,3
Metán	154±2	1,3
Széndioxid	203±5	-

SAPO-34 zeolit membrán

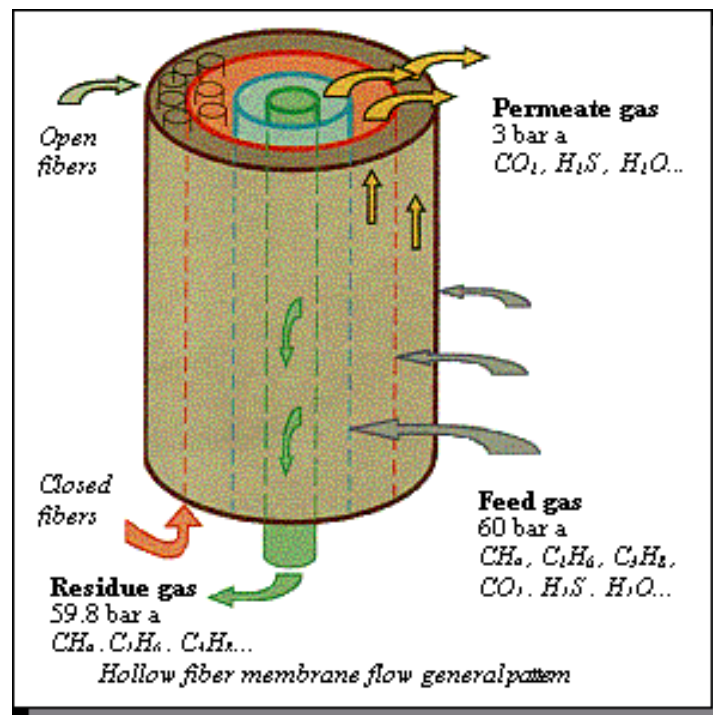


hőmérséklet	permeáció (mol/Pa s m ²)		
	nitrogén	széndioxid	metán
10 °C	9.4E-08	1.22E-07	9.29E-08
45 °C	8.3E-08	1.42E-07	8.62E-08
60 °C	6.1E-08	1.41E-07	7.9E-08
90 °C	1.1E-07	1.38E-07	1.09E-07

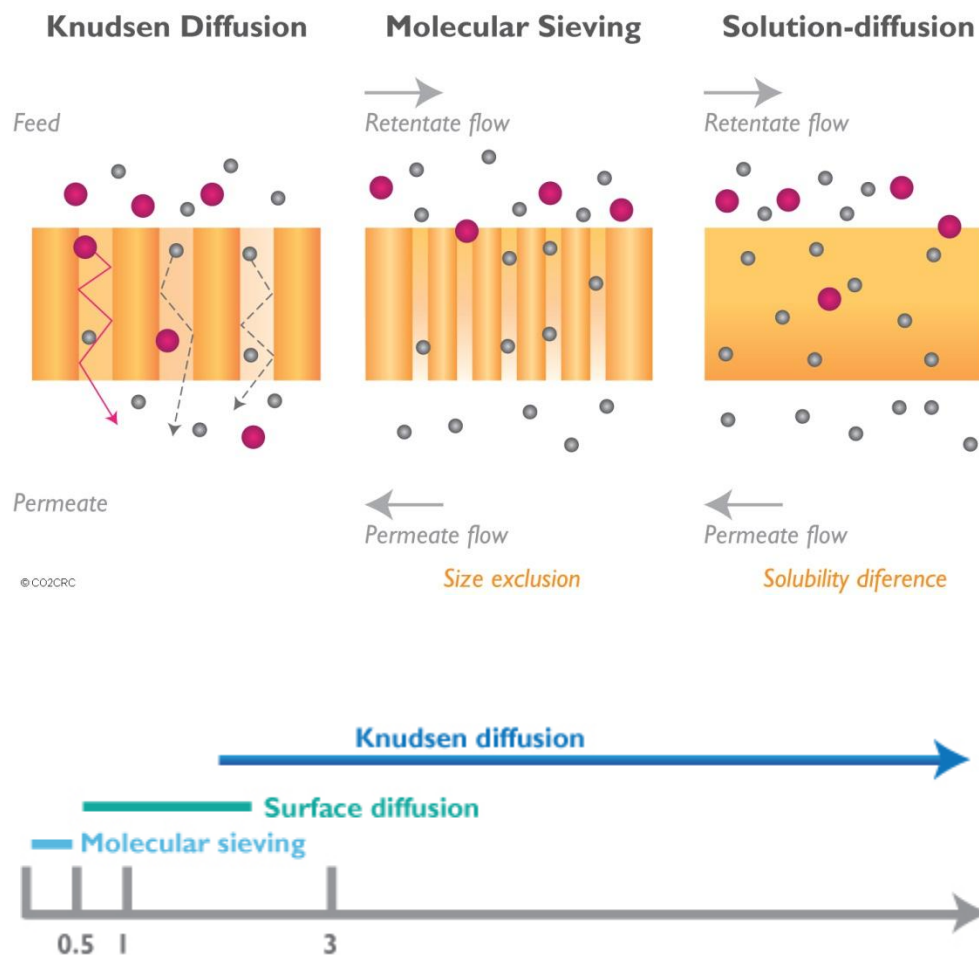
Ezek az értékek viszonylag magasak,
megfelelnek a legkorszerűbb polimer
membránok értékeinek

Kénhidrogén eltávolítása membránnal

- Pórusos membránok
- Nanostrukturált membránok
- Polimer membránok
- Membrán kontaktorok



Pórusos membránok



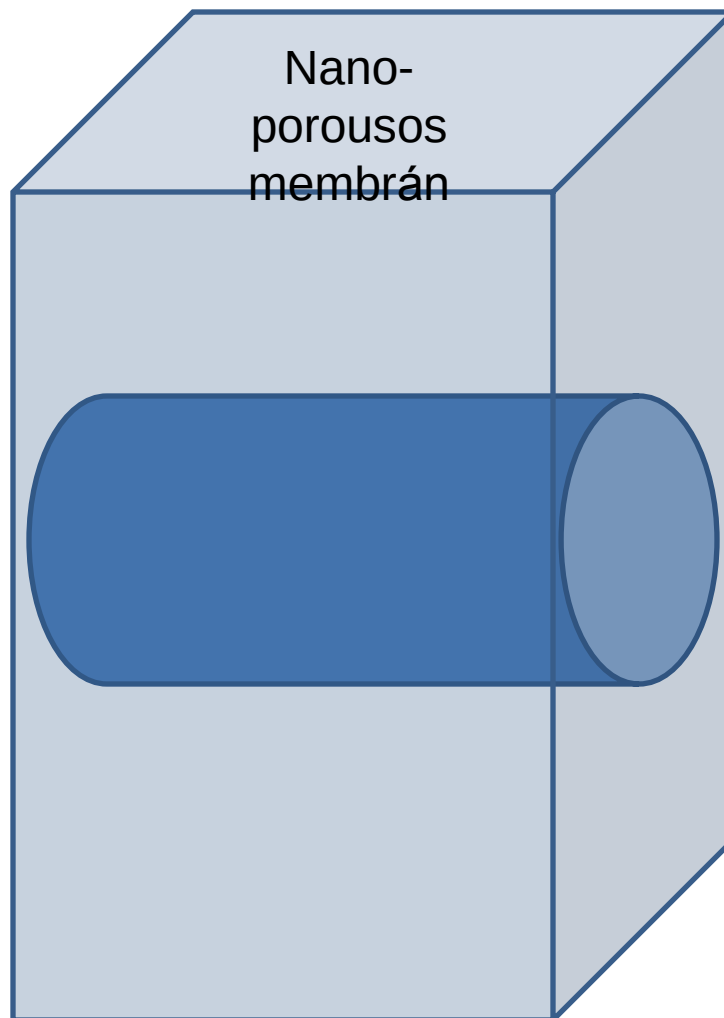
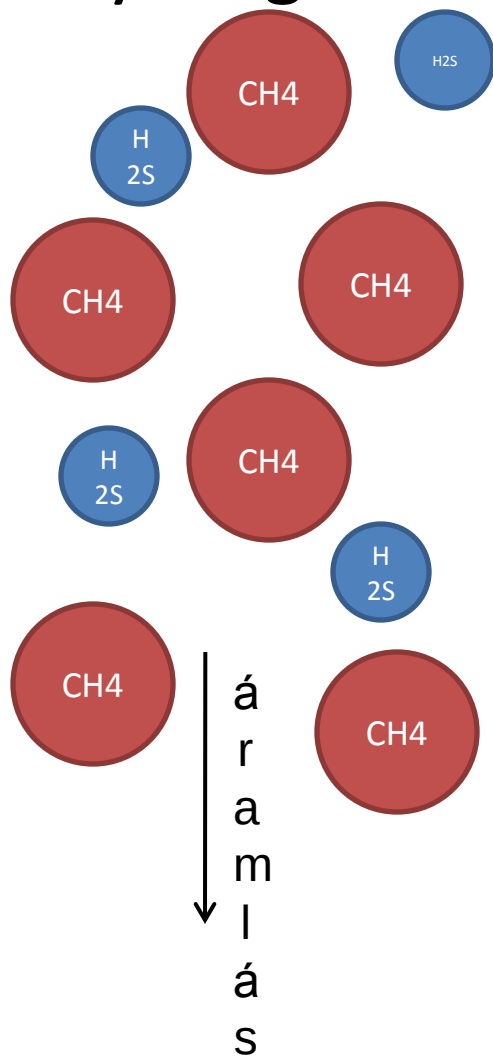
$$J = \frac{8\pi r^3 \Delta p}{3\tau (2\pi MRT)^{1/2}}$$

Azaz H₂S/CH₄
szelektivitás max 1,45

(és általában ez is
ellenünk van)

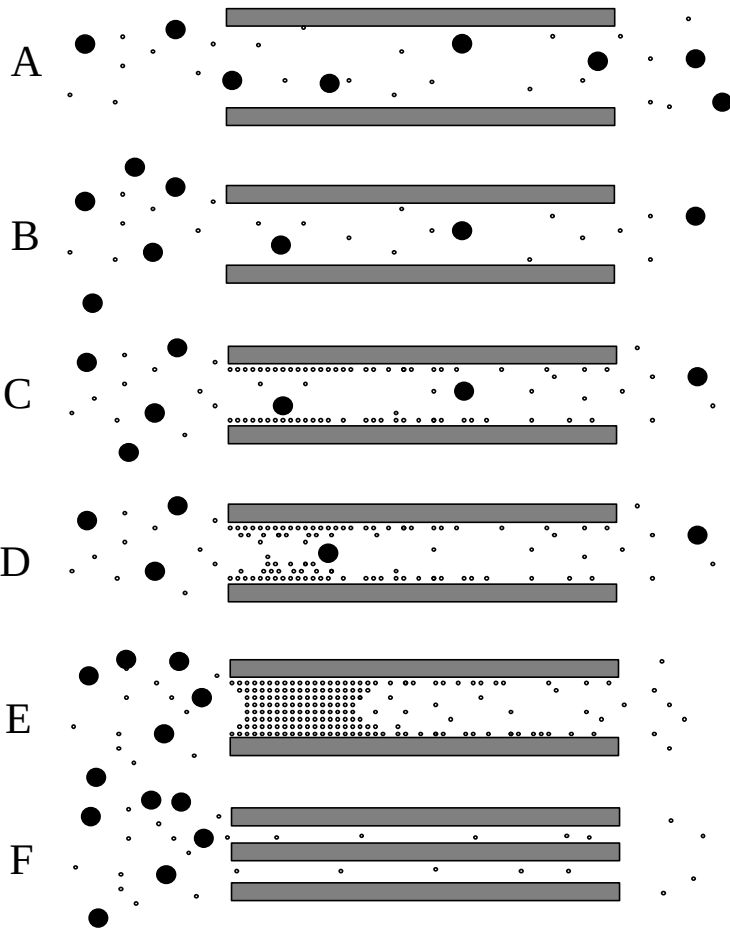
Nano strukturált membránok

Nyers gáz



permeátum

Kondenzált



A: Hagen-Poiseuille's flow,

B: Knudsen flow,

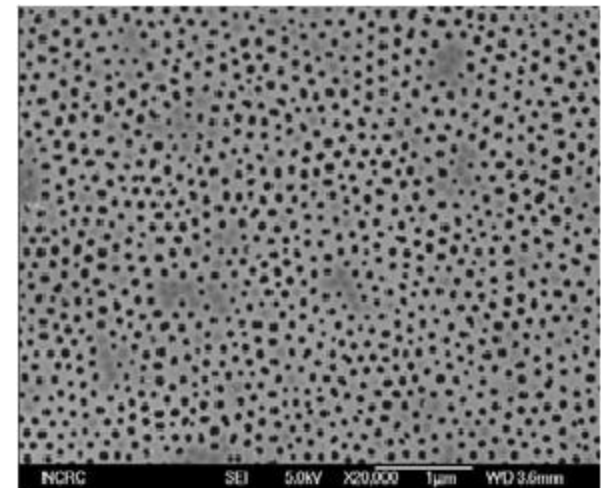
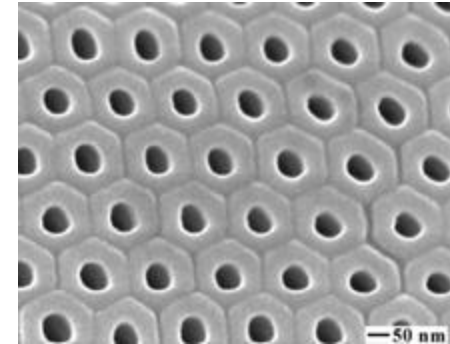
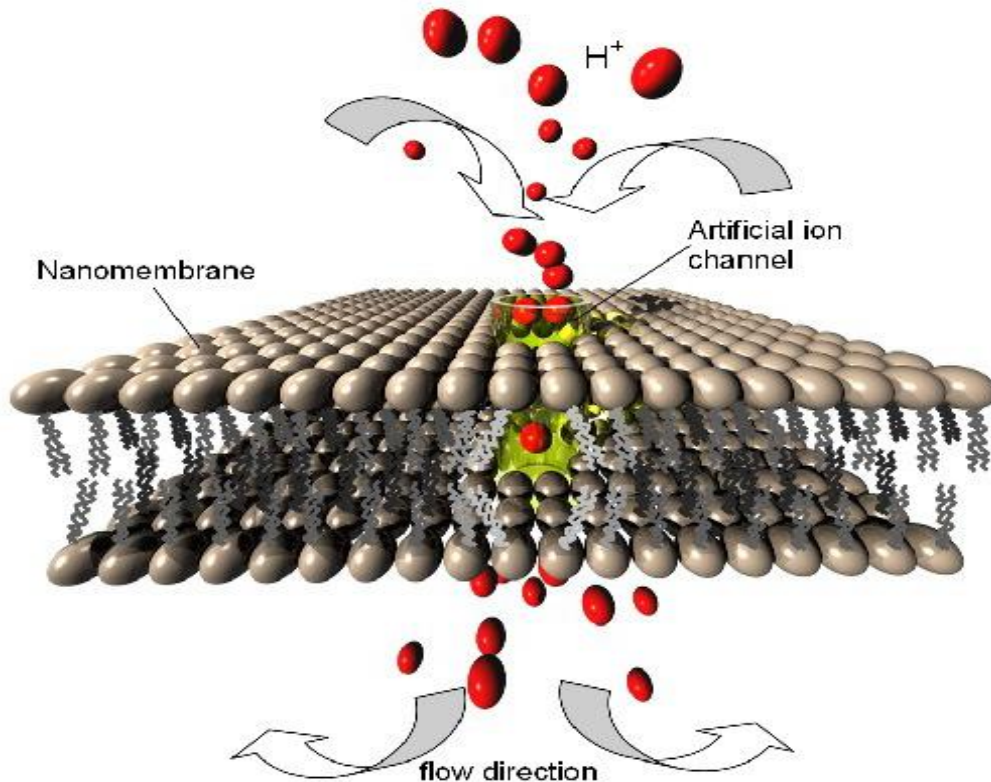
C: surface flow,

D: multilayer adsorption,

E: capillary condensation,

F: molecular sieving.

Nano-porous membranes



Images from www.mdpi.com/1996-1944/3/1/165/aq
sites.google.com/.../home/MAIN_NANO_2.jpg
www3.interscience.wiley.com/.../ncontent

Pórusmentes membránok

Glassy Membranes

Fast Gas

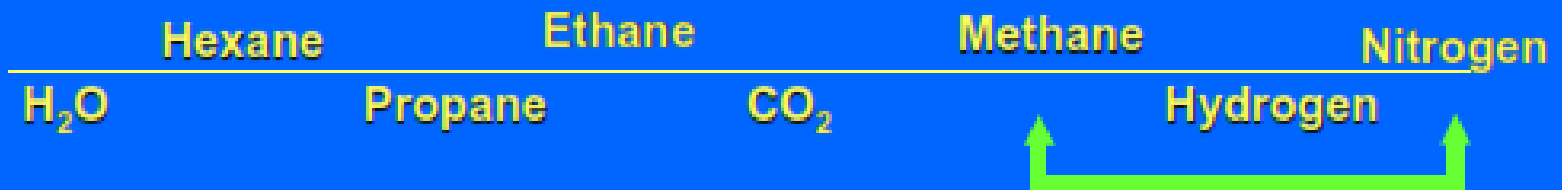
Slow Gas



Rubbery Membranes

Fast Gas

Slow Gas



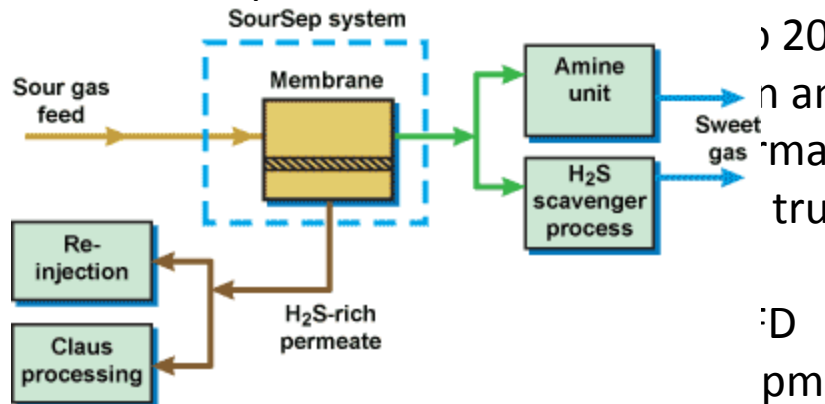
MTR

H₂S REMOVAL FROM NATURAL GAS:

- Benefits

SOURCESEP™

- SourSep™ unit for installation on an Indonesian remote production field



• 200-300 ppm

• n and water dewpoint

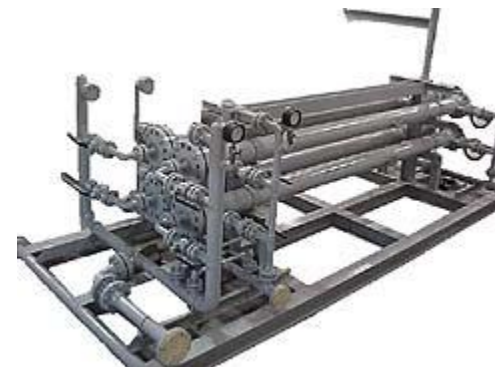
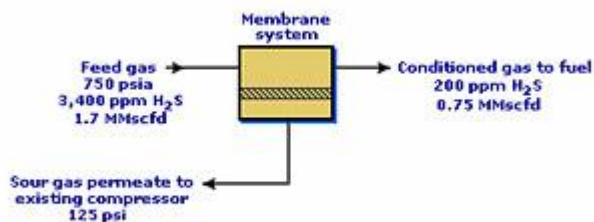
• mance at high H₂S content

• trucked to site and installed fast

• D

• pm

- Product gas pressure 30 to 1200 psia
- H₂S reduction up to 90%
- Application Options



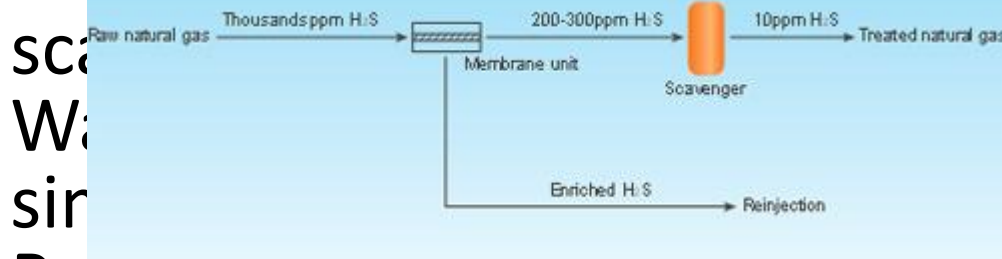
Eurofilm



- **Benefits**

H₂S removal up to 50-90% with membrane alone

H₂S content reduced to 10ppm with further



removed

Permit unattended operation at remote location

Easy to install and operate with skid-mounted construction and no moving parts

Robust proven membrane performance at high H₂S content

- **Reference**

Location: China

Application: H₂S removal
gas for fuel gas

Feed rate: 180,000 Nm³/h

Feed H₂S content: 15 g/m³

Product H₂S content: ≤ 0.5 g/m³

Dewpoint: -15°C

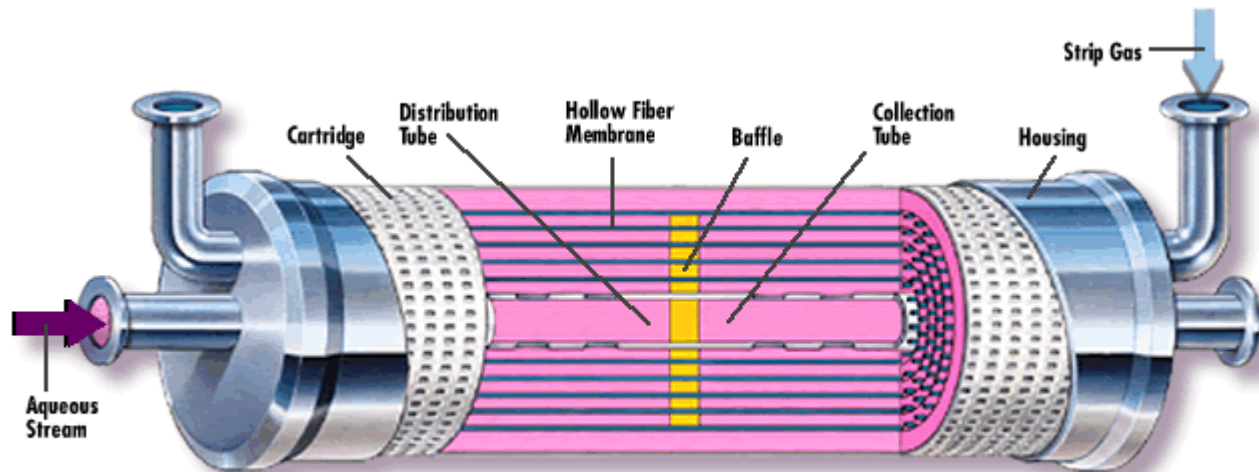
CH₄ recovery: ≥ 50%

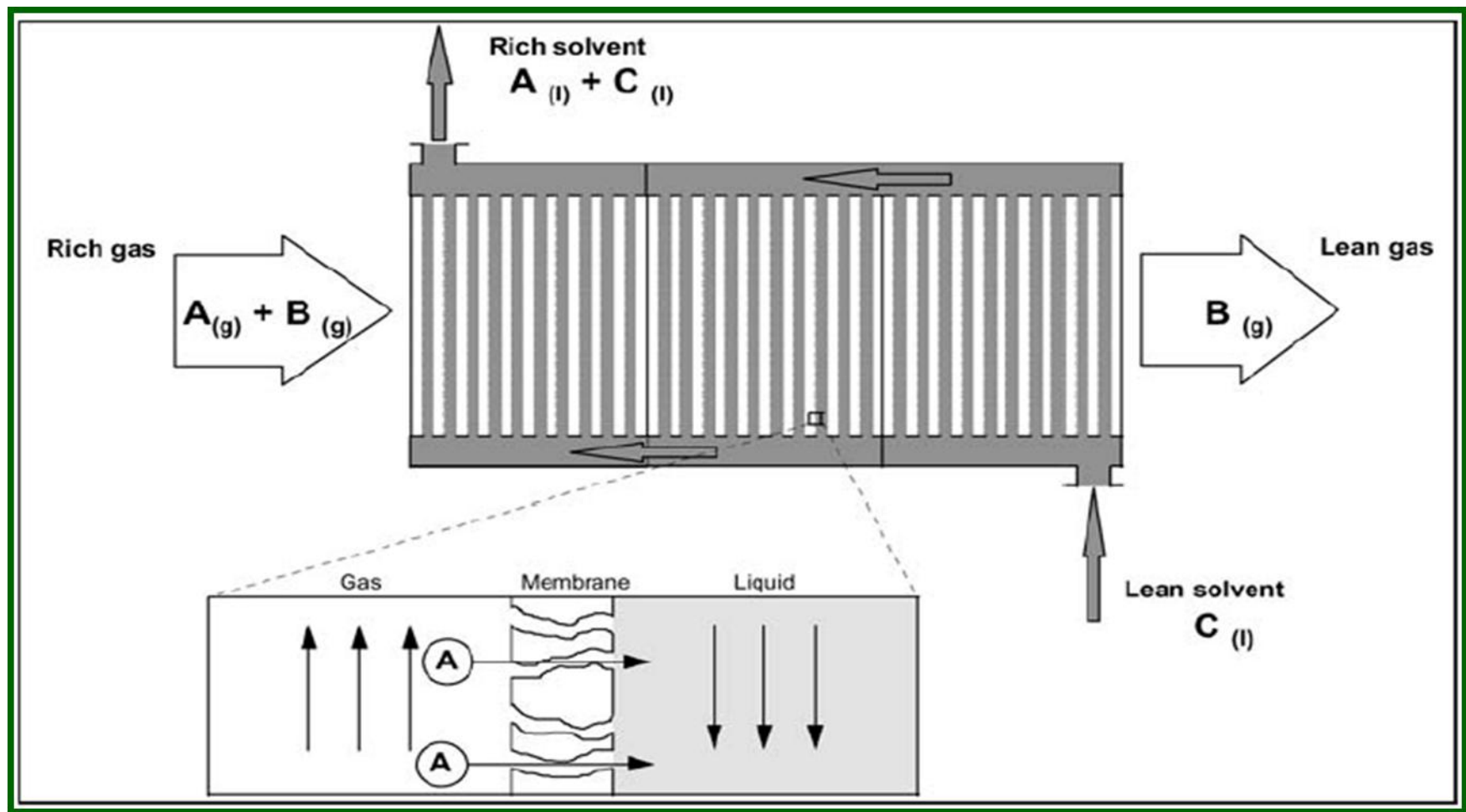
Start-up time: 2009

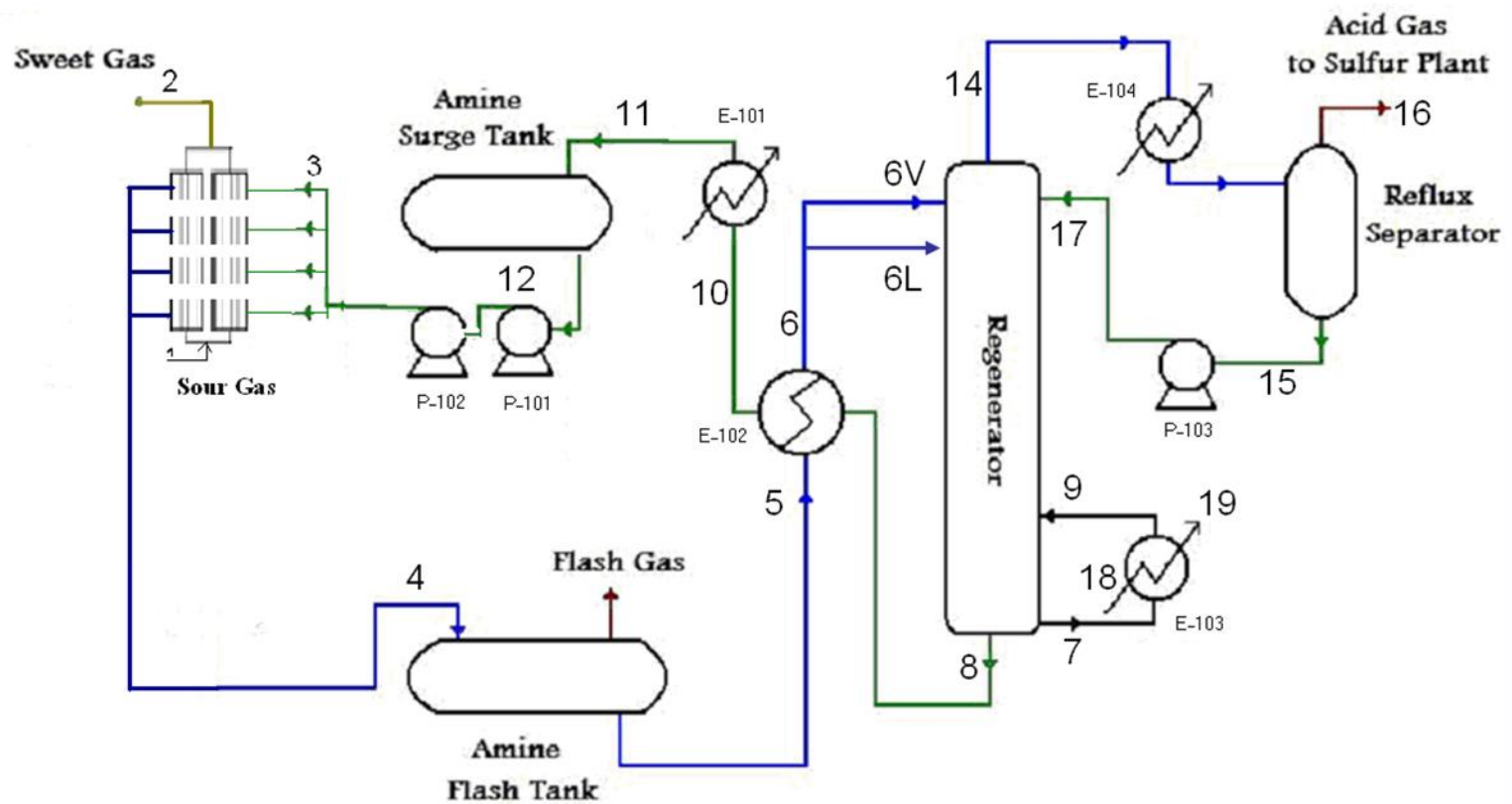


Membrán kontaktor

- Megnövelt, kontrolált érintkeztetés
- Térben szeparálva







MTR nitrogénszeparáció

- 12 átadott nitrogén leválasztó membrános üzem (2008-2010?)
- Mind metán, mind nitrogén szelektív membránokat használnak
- A tényleges szelektivitás alacsony

Table 4
Membrane performance used for process design simulations.

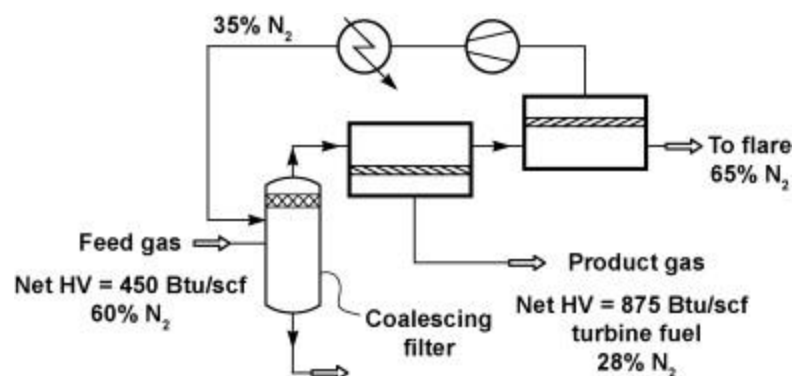
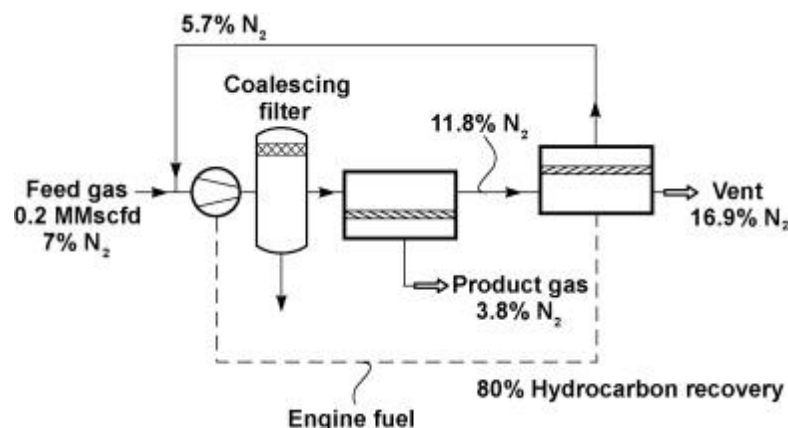
Gas	Nitrogen-selective membrane		Methane-selective membrane	
	Permeance (gpu)	Selectivity gas/CH ₄	Permeance (gpu)	Selectivity gas/N ₂
Nitrogen	50	2.5	50	1.0
Methane	20	1.0	150	3.0

MTR nitrogénszeparáció

polimer	Permeabilitás (Barrer) ^a		Szelektivitás	
	Nitrogén	Metán	N ₂ /CH ₄	CH ₄ /N ₂
Polyimide (6FDA- <i>m</i> -PDA)	3.10	1.34	2.3	0.4
Polyimide (6FDA-BAHF)	0.26	0.13	2.1	0.5
Polyimide (PMDA- <i>m</i> -PDA)	0.2	0.1	2.0	0.5
Polyimide (6FDA-IPDA)	1.34	0.7	1.9	0.5
Polycarbonate	0.37	0.45	0.8	1.2
Cellulose acetate	0.35	0.43	0.8	1.2
Polysulfone	0.14	0.23	0.6	1.7
Natural rubber	17.3	50.1	0.35	2.9
Poly(dimethylsiloxane) (PDMS)	230	760	0.3	3.3
Poly(siloxylene siloxane)	91	360	0.25	4.0
Poly(<i>p</i> -silphenylene siloxane)	3	12	0.25	4.0
Polyamide–polyether block copolymer (Pebax [®] 2533)	4.8	20	0.24	4.2

^a 1 Barrer = 10⁻¹⁰ cm³(STP) cm/cm² s cmHg.

MTR nitrogénszeparáció



Kentucky-ban felépült üzem, ahol a 7% nitrogéntartalmú gázból a helyi előírásoknak megfelelő 3,8% -os tisztaságú terméket állítanak elő 80%-os kihozattal 50000 m³/nap
Itt nitrogén szelektív membránt használtak

Olajkísérő gáz feldolgozása metán szelektív membránnal. 20 % metánt tartalmazó olajkísérő gázból 30%-os kitermeléssel gázturbinában elégethető gázt állítanak elő, ami évente 0,8M dollár megtakarítást jelent az olajkitermelés energiafogyasztásában.

MTR nitrogénszeparáció



Flow Capacity

Max: 0.2 MMSCFD

Operated: 0.1-0.2 MMSCFD

Pressure rating

Max: 1250 psig

Operated: 400-600 psig

Temperature

Max: 135°F

Operated: 15-50°F

MTR nitrogénszeparáció

Designed for Offshore Installation

Main System Components

**Membrane Modules/Housings
Filter Separator/Coalescer
Inlet and Discharge Valves**

System Dimensions: 6 ft (W) x 8 ft (L) x 8 ft (H)

Location: Nigeria

Flow Capacity: 2.5 MMSCFD

Pressure rating 550 psig

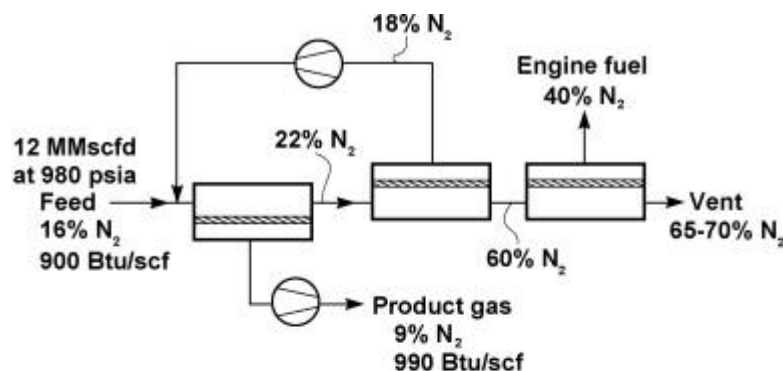
Operating pressure: 220 psig

Feed hydrocarbon dewpoint: 82°F

Conditioned Gas Dewpoint: 20°F

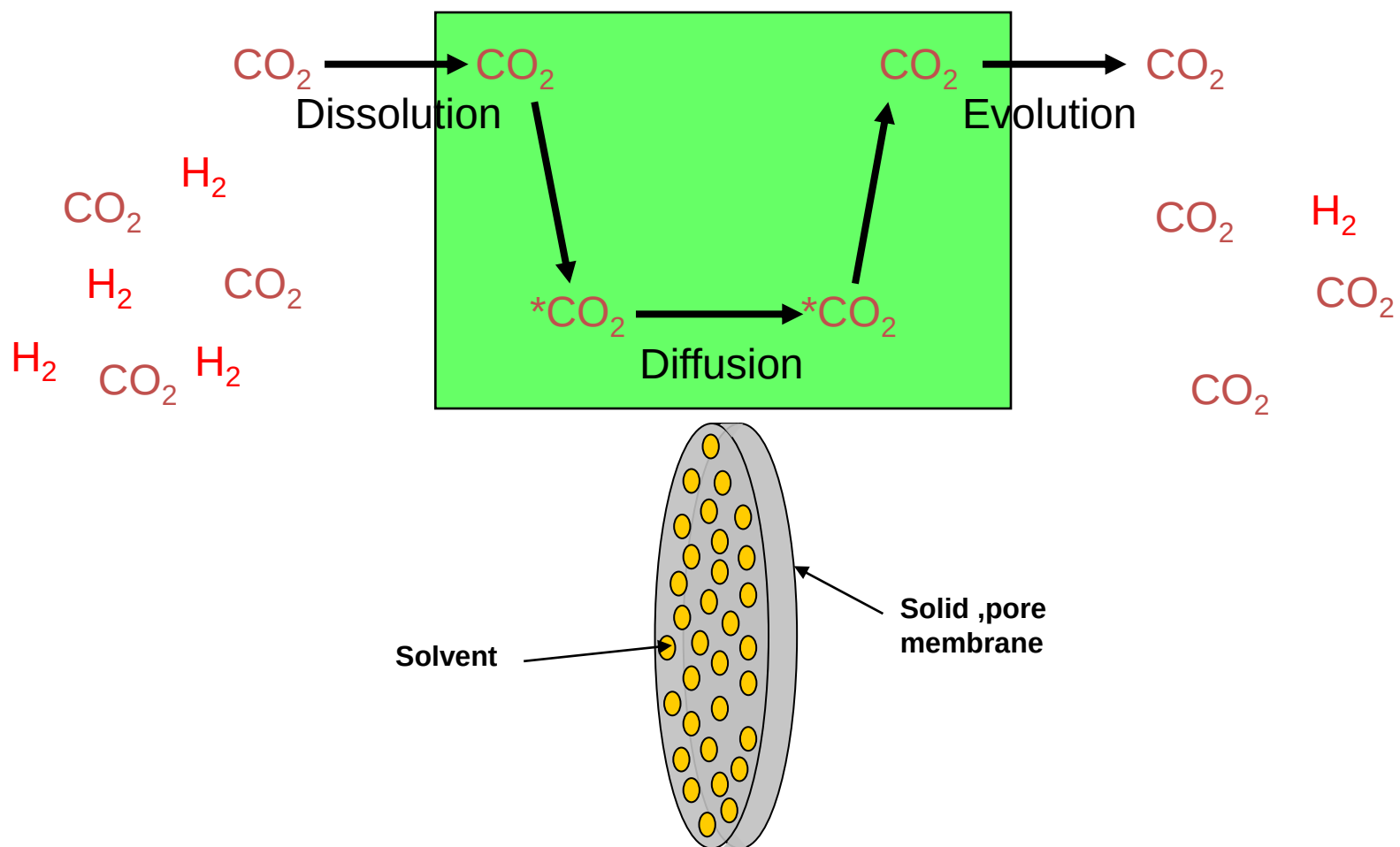


MTR nitrogénszeparáció



nitrogén szelektív membránt használnak abban a 350 ezer m³/nap kapacitású üzemben, ahol 16 % tartalmú nyers gázból 9%-os terméket állítanak elő, így már az tovább hígítható, felhasználható. A Rio Vista (Kalifornia) gázmezőn található egység teljes kitermelése 95%-os a szénhidrogének fűtőértékére vonatkoztatva.

SUPPORTED IONIC LIQUID MEMBRANES (SILM)



SUPPORTED IONIC LIQUID MEMBRANES (SILM)

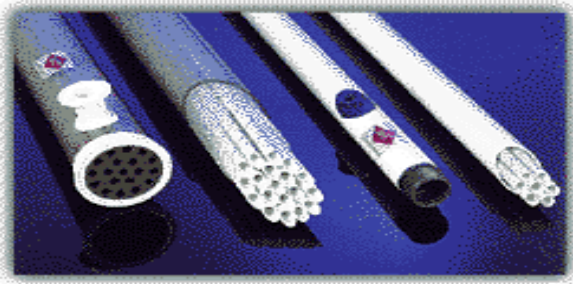
Liquid Membranes

Supporting membrane



Supported Liquid Membranes

**Porous
Hydrophobic
Adequate porosity
Sufficient support**

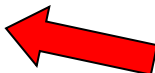


Emulsion Liquid Membranes
Ionic liquid (IL)

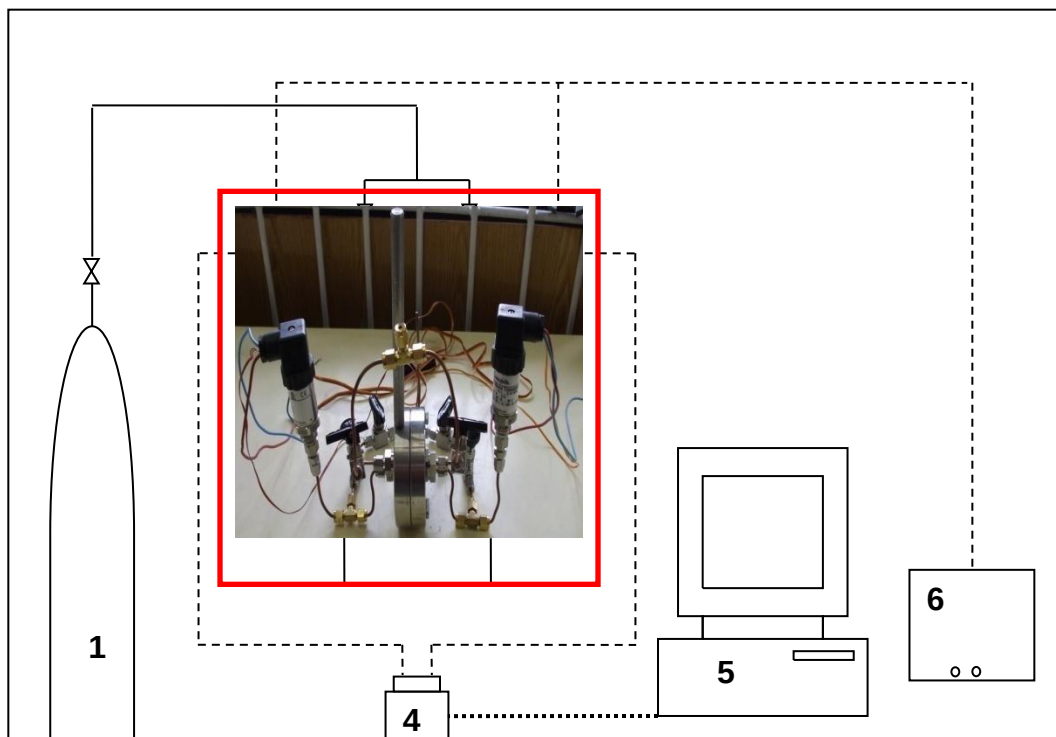
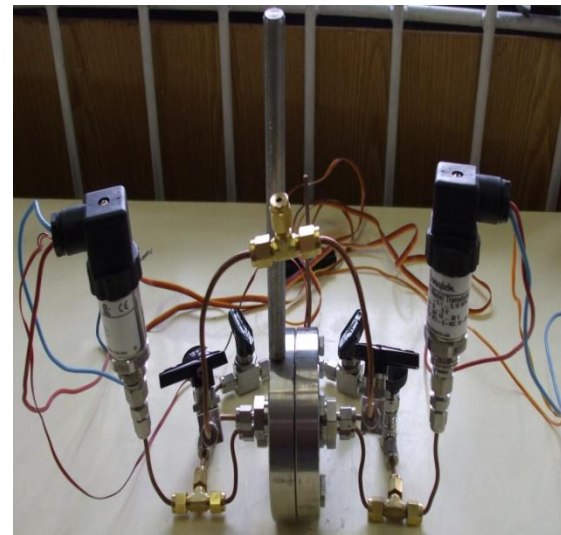
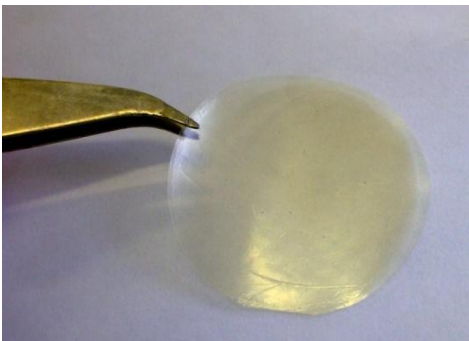


Benefits:

- ✓ **Low energy consumption**
- ✓ **Low solvent need**
- ✓ **High selectivity**
- ✓ **Extraction and stripping in one step**
- ✓ **High pressure is not needed**
- ✓ **Simple set-up**
- ✓ **Stability is relatively high**
- ✓ **Little solvent loss**

 **high viscosity of IL**

 **negligible vapour pressure of IL**



- 1- gas feed
- 2- membrane module
- 3- pressure sensor
- 4- interface
- 5- computer
- 6- converter

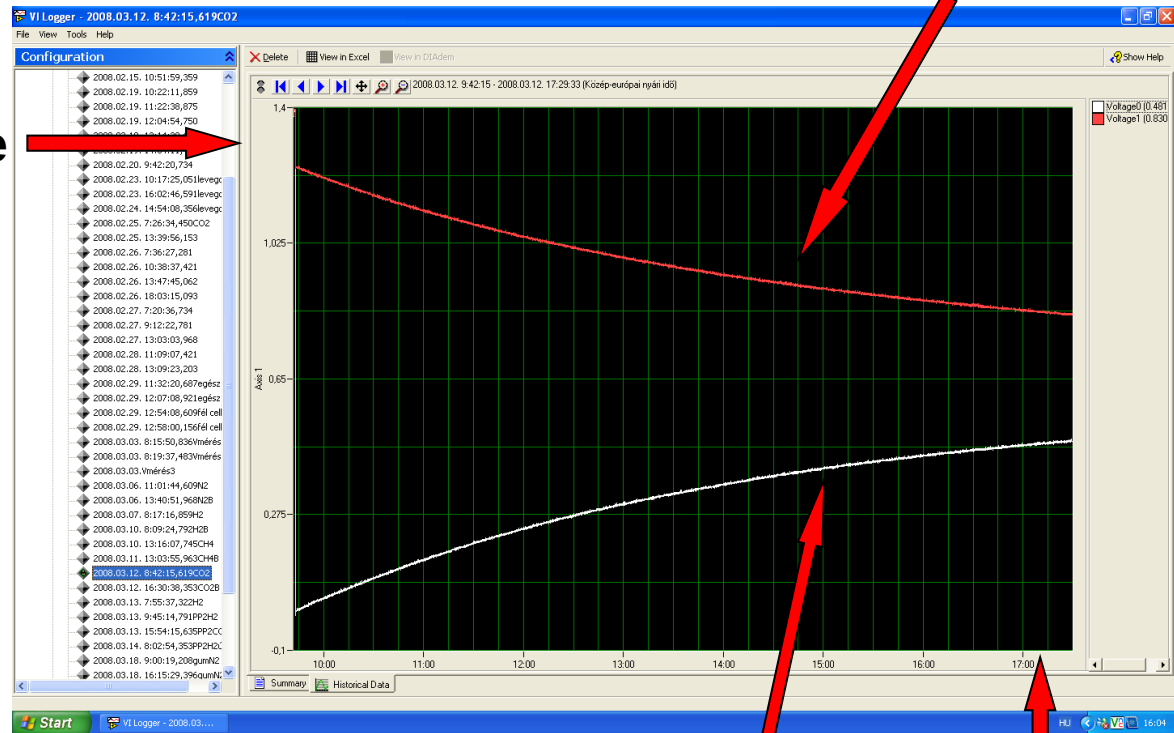
Change in pressure was measured

Registered with the VI Logger programme

retentate

pressure

Change in
permeate
volume (v)
was determined



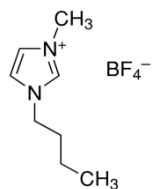
permeate

time

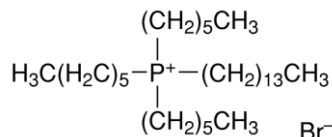
Permeability (GPU) was calculated

$$\text{GPU} = (v \cdot 10^6) / (A \cdot \Delta p)$$

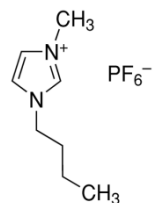
IL used for membrane preparation



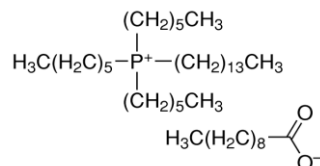
[bmim][BF₄]
1-Butyl-3-methyl
imidazolium
tetrafluoroborate



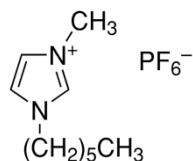
Cyphos 102
Trihexyl
(tetradecyl)
phosphonium
bromide



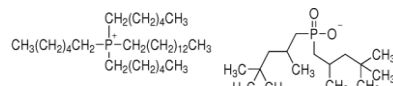
[bmim][PF₆]
1-Butyl-3-methyl
imidazolium hexafluorophosphate



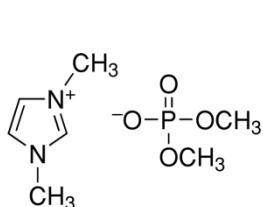
Cyphos 103
Trihexyl(tetradecyl)
phosphonium
decanoate



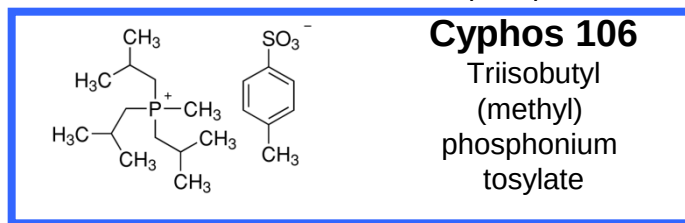
[hmim][PF₆]
1-hexyl-3-methyl
imidazolium hexafluorophosphate



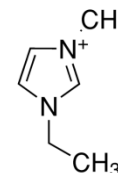
Cyphos 104
Trihexyl
(tetradecyl)
Phosphonium
bis(2,4,4-trimethylpentyl)
phosphinate



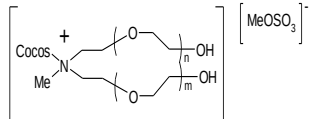
ECOENGTM 1111P
1,3-Dimethyl
imidazolium
-dimethyl
phosphate



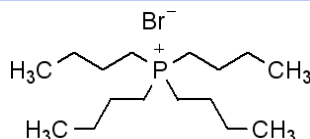
Cyphos 106
Triisobutyl
(methyl)
phosphonium
tosylate



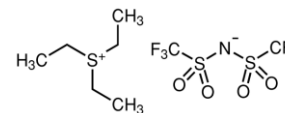
[emim][CF₃SO₃]
1-ethyl-3-methylimidazolium
trifluoromethanesulfonate



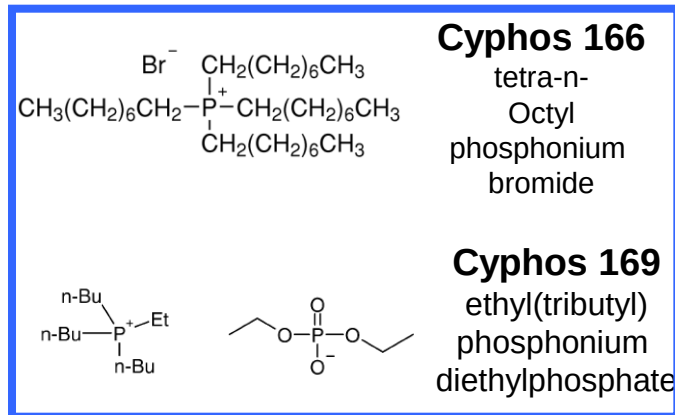
AMMOENGTM 100



Cyphos 163
Tetrabutyl-phosphonium
bromide



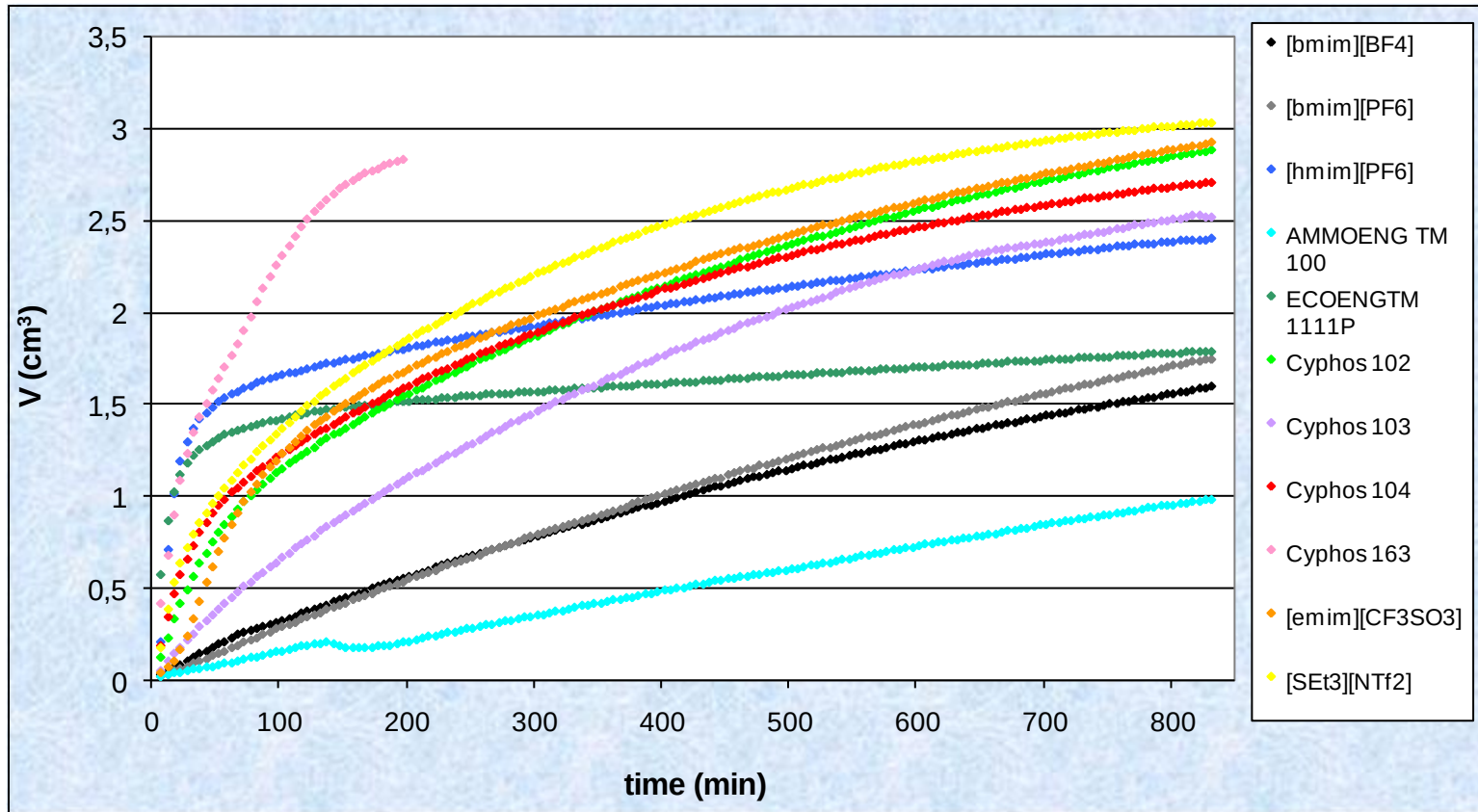
[SEt₃][NTf₂]
Triethylsulfonium
bis(trifluoromethyl
sulfonyl)imide



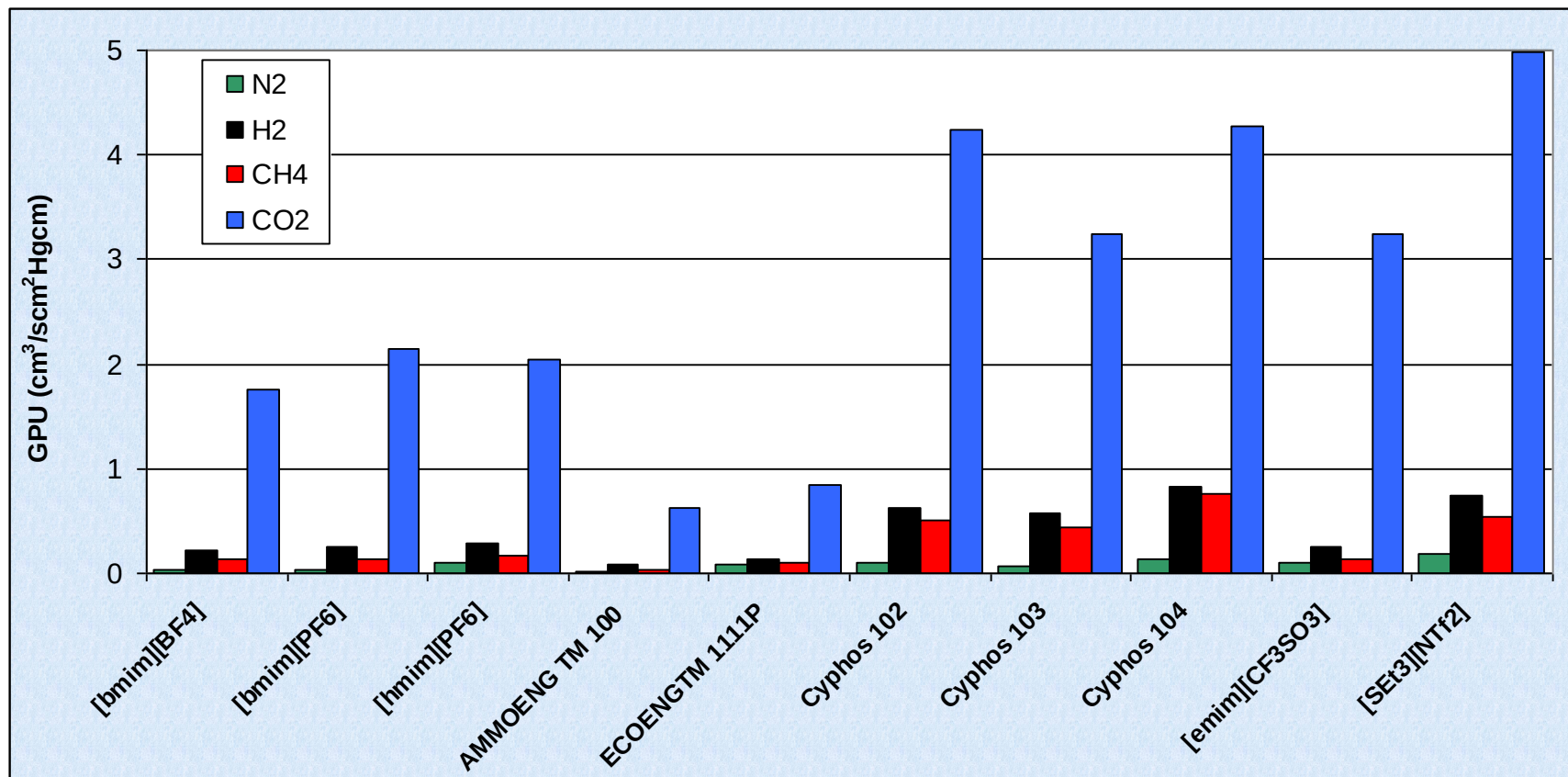
Cyphos 166
tetra-n-Octyl
phosphonium
bromide

Cyphos 169
ethyl(tributyl)
phosphonium
diethylphosphate

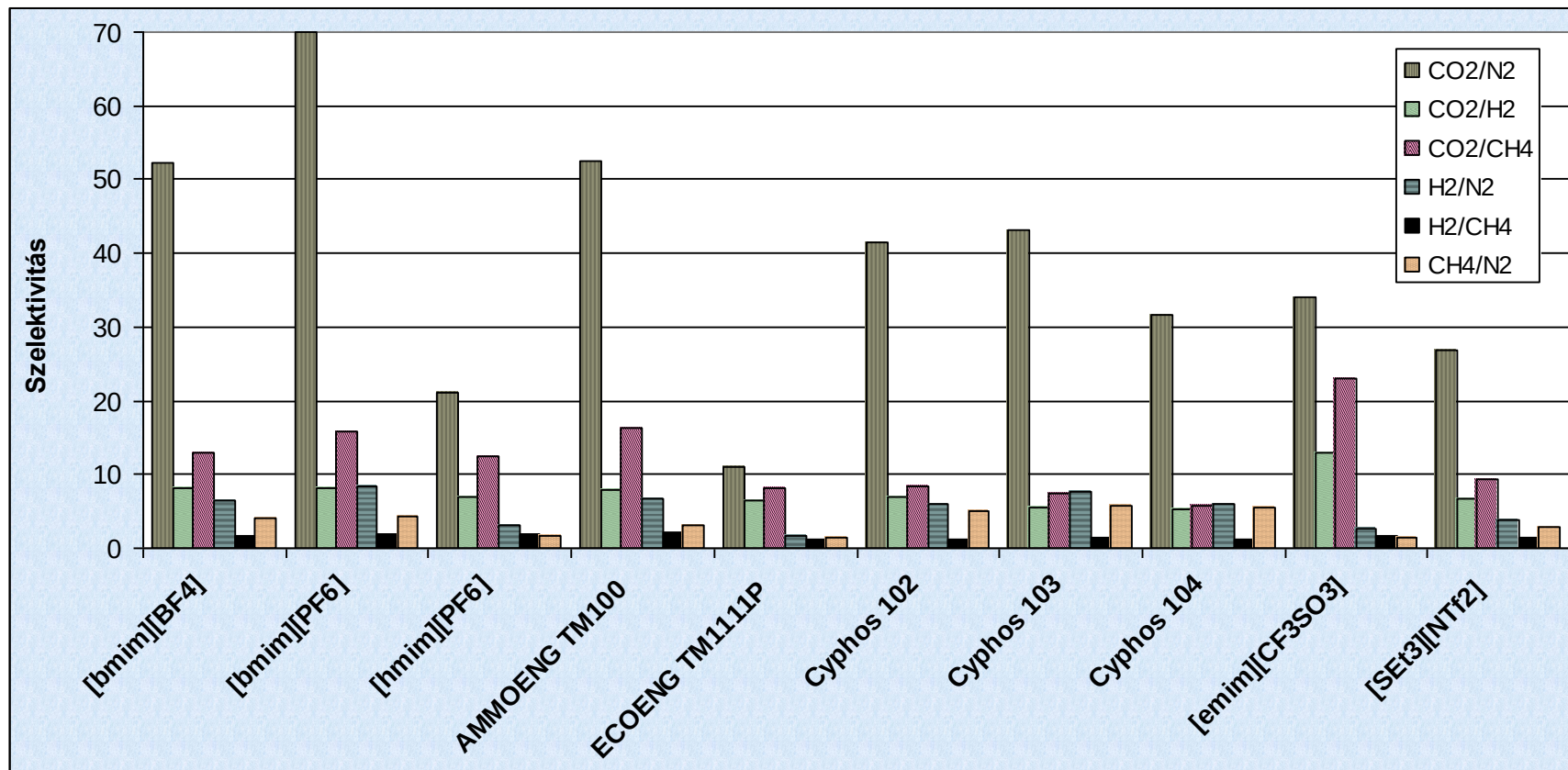
Permeation with Nitrogen



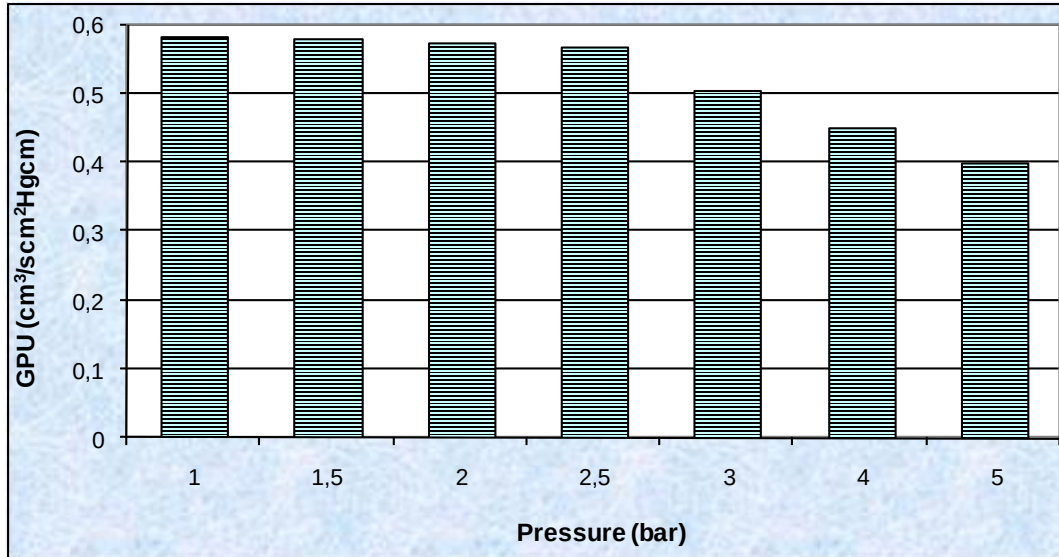
Permeance with single gases: nitrogen, hydrogen, methane and carbon dioxide



Calculated selectivities



Effect of pressure and temperature on Cyphos 103 SILM



Pressure difference incerase

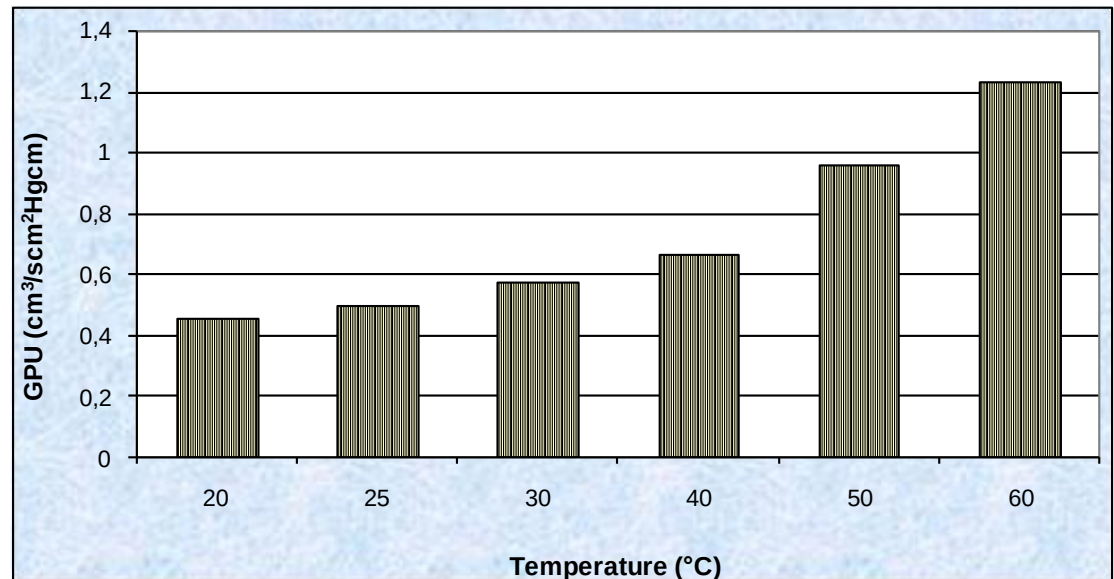


Permeace deacrease

Temperature incerase



Permeace incerase



EXPERIMENTS

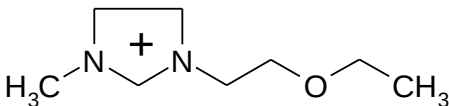
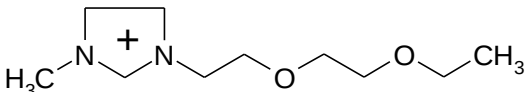
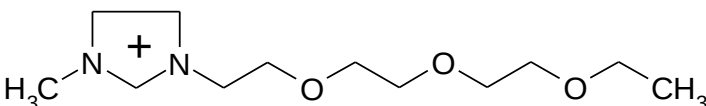
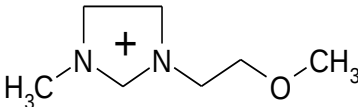
Supporting membrane: Hydrophobic, PVDF (Millipore)

A =14,51 cm²

d=173 μm

Ionic liquids:

[bmim][BF₄]

VACEM 42	1-(2-etoxy-ethyl)-3-methylimidazolium hexafluorophosphate		PF ₆ ⁻
VACEM 44	1-{2-[2-(etoxy)-etoxy]-ethyl}-3-methylimidazolium hexafluorophosphate		PF ₆ ⁻
VACEM 47	1-[2-{2-[2-(2-etoxy)-etoxy]-etoxy}-ethyl]-3-methylimidazolium hexafluorophosphate		PF ₆ ⁻
VACEM 58	1-(2-methoxy-ethyl)-3-methylimidazolium hexafluorophosphate		PF ₆ ⁻

