

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ÉPÜLETGÉPÉSZETI ÉS GÉPÉSZETI ELJÁRÁSTECHNIKA TANSZÉK



TDK DOLGOZAT

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ÉPÜLETGÉPÉSZETI ÉS GÉPÉSZETI ELJÁRÁSTECHNIKA TANSZÉK**

**SZEMÁN DÁVID
TDK DOLGOZAT**

Adszorber tartályra adaptálható porozitásmérő állomás tervezése

Konzulens:

Horváth Dániel
Tanszéki mérnök

Témavezető:

Dr. Poós Tibor
Egyetemi docens

Budapest, 2023

Tartalomjegyzék

Jelölések jegyzéke	4
1. Bevezetés	5
2. Szakirodalmi áttekintés	6
2.1. Higanys porozimetria.....	6
2.2. Víz abszorpciós módszer	7
2.3. Optikai vizsgálatok	8
2.4. Számítógépes tomográfias módszer.....	8
2.5. Imbibíciós módszer.....	8
2.6. Arkhimédészi módszer	9
2.7. Fény-, röntgen-, neutronsórás alapú módszer	9
2.8. Termoporozimetria és krioporozimetria	10
2.9. Nyomáskülönbségen alapú porozitás mérés	10
3. A Mérési módszer.....	12
3.1. Tanszéki mérőállomás	12
3.2. A munkahenger méretezése	12
3.3. Elméleti hibaszámítás	13
4. A vizsgált anyag	15
5. Mérőállomás műszerezése	16
5.1. Mérőtartály.....	16
5.2. Kompressziótartály	18
5.2.1. Kritériumok, elvárások	18
5.2.2. Lehetőségek	19
5.2.3. Javaslat.....	19
5.3. Nyomásmérő	21
5.3.1. Kritériumok, elvárások	21
5.3.2. Lehetőségek	21
5.3.3. Javaslat.....	24
5.4. Távolságmérő.....	25
5.4.1. Kritériumok, elvárások	25
5.4.2. Lehetőségek	26
5.4.3. Javaslat.....	28
5.5. Hőmérő	28
5.5.1. Kritériumok, elvárások	28
5.5.2. Lehetőségek	29
5.5.3. Javaslat.....	30
5.6. Mérleg	30
5.6.1. Kritériumok, elvárások	30
5.6.2. Lehetőségek	31
5.6.3. Javaslat.....	33
6. A mérőállomás tervezése.....	34
6.1. Tartályfedél.....	34
6.2. Az alátámasztás.....	36

6.2.1. PVC támasztóelemek.....	36
6.2.2. Munkahenger fogó.....	37
7. A 3D modell	38
8. A Tervezett állomás leírása	40
8.1. Összeszerelés	40
8.2. Mérés menete.....	41
8.3. Kiértékelés	41
9. Összefoglalás.....	43
10. Irodalomjegyzék	44
11. Függelék	46
12. Melléklet.....	48

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Jelölés	Megnevezés, érték	megjegyzés, Mértékegység
Anyagsűrűség	ρ_{anyag}	kg/m^3
Gravitációs gyorsulás	g (9,81 m/s^2)	m/s^2
Halmazsűrűség	ρ_{halmaz}	kg/m^3
Henger külső átmérő	d_k	m
Hézagterfogat	$V_{\text{hézag}}$	m^3
Kompressziótartály térfogat	V_{AB}	m^3
Légköri nyomás	p_0	Pa
Mért nyomás	$p_{\text{mért},i}$	Pa
Porozitás	ε	m^3/m^3
Tartály belső átmérő	D_b	m
Tartály keresztmetszetének felszíne	$A_{\text{tartály}}$	m^2
Töltetmagasság	$H_{\text{töltet},i}$	m
Töltetterfogat	$V_{\text{töltet},i}$	m^3
Víz sűrűsége	$\rho_{\text{víz}}$	kg/m^3
Vízoszlop magasság	Δh_i	m
π	Pi-szám (3,14)	1

1. BEVEZETÉS

A feladat egy mérőállomás tervezése, mely alkalmas egyedi kialakítású mérőtartályba töltött zeolit halmaz porozitásának meghatározására. Ez az információ fontos a töltött tartály működése szempontjából. A tartály ugyanis levegő nedvességtartalom csökkentési feladatot lát el, mely művelet során a fázisérintkezés intenzitása, így közvetetten a szárítás hatásfoka is függ a porozitás értékétől.

A mérési módszer kiválasztása, megismerése, valamint a számítások elvégzése és a tervezés során a Tanszék jelenlegi porozitásmérő állomása szolgált alapul. A tanszéki állomás nyomáskülönbségen alapuló mérési sorozat elvégzését követően, a megfelelő kiértékeléssel biztosítja az állomás saját tartályában a töltet porozitását. A meglévő tartály sajátos geometriája okán szükséges új állomás tervezése, a meglévő mérési módszer azonban továbbra is alkalmazható.

A mérőállomással szemben néhány támasztott követelmény adott; a mérőtartály a mérés során fix, függőleges helyzetben áll, a jelenlegi mérőállomáshoz képest a tartályba töltött szemcsés halmaz térfogata pontosan mérhető legyen, valamint a mérés során a tartály és töltet tömege is mérhető legyen. Kiegészítésként csatlakozzon a tartályhoz egy hőmérő, mely a tartályon belüli hőmérséklet mérésével visszajelzést ad arról, hogy a mérés valóban izoterm körülmények között zajlik.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Porozitás mérés során fontos kiemelni, hogy pontosan milyen fizikai paramétert is értünk a fogalom alatt. A feladat esetén anyaghalmazra értett mérőszámként értelmezzük, mely a szemcsehalmazban jelenlevő kitöltetlen tér, másnéven hézagterefogat és a halmaz ösztérfogatának arányát fejezi ki. Átalakításokat követően a porozitás kifejezhető a halmaz sűrűségének, valamint a hézagmentes, „tömör” anyag sűrűségének összefüggésében is. A porozitás ismerete fontos többletinformációval szolgál számos eljárás során, például szárítási, adszorpciós feladatok, valamint az anyag katalizátorként alkalmazása esetén.

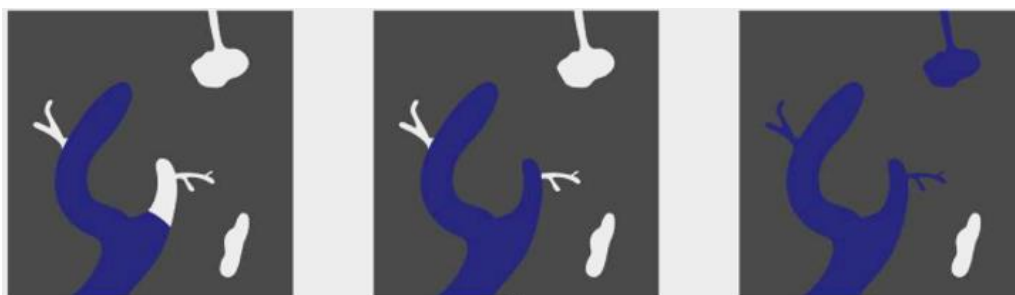
A porozitás fogalma emellett máshogy is értelmezhető. Egy kiemelt szemcsére vonatkoztatva, a benne található „üres” tér, és a szemcse teljes térfogatának aránya is porozitás. Ebben a verzióban meghatározása elkülönítendő feladat az előbbieken tárgyalt porozitás mérésétől.

A továbbiakban olyan mérési módszerek kerülnek ismertetésre melyek a fent megkülönböztetett két porozitás valamelyikének mérésére alkalmasak. A mérőállomás tervezésének szempontjából, ezek közül azon eljárások a relevánsak, melyek a halmaz porozitásának értékére engednek következtetni, továbbá nem roncsolják a vizsgált mintát.

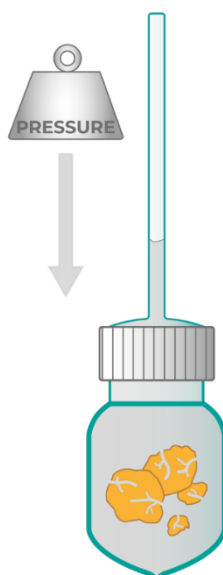
2.1. *Higanyos porozimetria*

Ez az eljárás a porózus anyagokban a pórusméret, valamint a pórustérfogat meghatározására alkalmas, folyékony higany használatával. A higany képes behatolni a pórusrendszerbe, tehát a hézagok kitöltéséhez szükséges higany mennyiségéből következtetni lehet a porozításra. A mérés során nagy nyomás alkalmazása szükséges, mivel a higany nem nedvesítő folyadék, továbbá az egyes pórusokba való behatoláshoz, pórusfalak átrepesztéséhez is erre van szükség. Az eljárás tárgyalása során fontos kiemelni, hogy a higany sajátos tulajdonsága a nedvesítési peremszöge, mely $130-150^\circ$. Ez teszi lehetővé a mérés eredményességét. Az 1. ábrán látható a hézagok telítődésének mechanizmusa a nyomás növelésével, a 2. ábra [1] pedig a mérés lényegi kialakítását szemlélteti.

A higany egy igen veszélyes toxikus anyag, ezért a módszer alkalmazása kevésbé jellemző. A mérés továbbá minden esetben a minta roncsolásával jár, ugyanis elegendően nagy nyomáson a higany képes a szemcsén belüli összes pórusba behatolni, azonban eltávolítása nem lehetséges.



1. ábra: A hézagok telítődésének mértéke a nyomás növelése mellett [1]



2. ábra: A higanyos poroziméter működési elve [1]

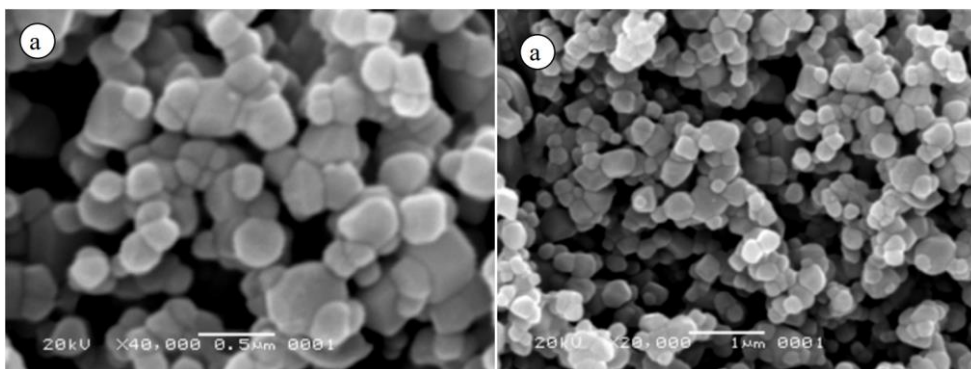
2.2. *Víz abszorpciós módszer*

Ez a módszer igen elterjedt különböző kerámia ipari ágazatokban, főként szemcsepórus térfogatának meghatározására alkalmas. Lényege, hogy a mintát minimum 2 órán keresztül forrásban lévő vízben áztatják, ezzel telítve a minta pórusait. Ezután a pórusokat megtöltő víz mennyiségéből számítható a porozitás értéke. A mérés [2] tulajdonképpen két tömegmérésből vezeti le a porozitást, a száraz anyag tömegéből, valamint a forralás utáni, vízzel telített tömegből. Számos anyag esetén a porozitás értéke nedvességtartalom függő. Az ilyen anyagoknál nem mindegy a mérés sorrendje. Forralást és szárítást követően csak a teljesen száraz anyag porozitása határozható meg, így a sorrendet fel kell cserélni.

Az eljárás hidrofil anyagok esetében, valamint olyan technológiákban, ahol a víz jelenléte a későbbi felhasználhatóságot zavarja, nem alkalmazandó.

2.3. Optikai vizsgálatok

Optikai mikroszkóp, például pásztázó elektronmikroszkóp (SEM), valamint transzmissziós elektronmikroszkóp (TEM) alkalmazása, elterjedt szemcsés anyagok, szivacsok, valamint vágott, csiszolt felületek porozitásának meghatározására. A módszer a mikroszkópok által adott képek feldolgozásán alapul. Számítógépes szoftverek, mint például ImageJ, OriginPro [3] arra lettek létrehozva, hogy mikroszkópi felvételekből legyenek képesek a szemcsehalmazt alkotó szemcsék méretére, a szemcsék közötti hézagokra számszerű értéket adni. Az anyag paramétereire és ezen adatok ismeretében a porozitás értéke számítható.



3. ábra: SEM felvételek különböző nagyításban [3]

2.4. Számítógépes tomográfias módszer

A módszer lényege tulajdonképpen a teljes anyaghalmaz feltérképezése. Ipari és úgynevezett mikro-CT szkennerrel segítségével a halmaz 3D modelljének leképezését követően a modellből a porozitás meghatározható. A módszer [4], [5] eredményessége, a számított porozitás értékének pontossága a felbontástól függ.

Számos berendezés használ röntgensugárzást a feltérképezéshez. A mérés során több szögből is kép készül a halmazról, annak egy adott területéről, pontjáról. Ezt követően a képek az optikai mikroszkópos módszerhez hasonlóan feldolgozhatók és számos fizikai paraméter, köztük a porozitás kinyerhető.

2.5. Imbibíciós módszer

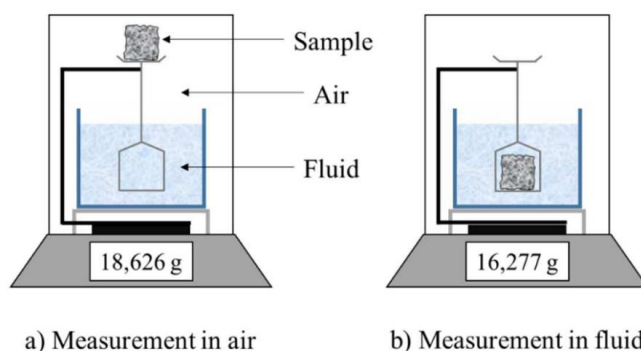
A módszer lényege hasonló a higanyos porozimetriai módszeréhez, azonban ebben az esetben [6] vákuum alatt tartott mintát merítenek kedvező nedvesítési tulajdonságú folyadékba. A minta merítés előtti, és merítés utáni tömegéből, és a folyadék sűrűségéből meghatározható a

hézagokat kitöltő folyadék térfogata, azaz a hézagtérfogat. A minta teljes térfogatából, vagy tömegéből és anyagsűrűségéből a porozitás számítható.

2.6. Arkhimédészi módszer

Az eljárás az úgynevezett térfogatkiszorításos módszeren alapul. A mérés [7] során a mérőtartályba helyezett minta által kiszorított közeg térfogatából állapítható meg a minta tényleges térfogata, és tömegének ismeretében számítható annak sűrűsége. A minta halmazának térfogata a betöltés során határozható meg. Ehhez a tartálynak lehetővé kell tennie a betöltött halmaz térfogatának mérését, osztás vagy esetleg szintmérő segítségével. A halmaztérfogatból számolt halmazsűrűségéből, vagy a két eltérő térfogatértékből a porozitás számítható. Az eljárás során alkalmazott közeg lehet gáz halmazállapotú (pl. nitrogén, hélium), vagy szilárd (aprószemű, finom kvarckristályok). Ez a megvalósítás alkalmas halmazok porozitásának meghatározására.

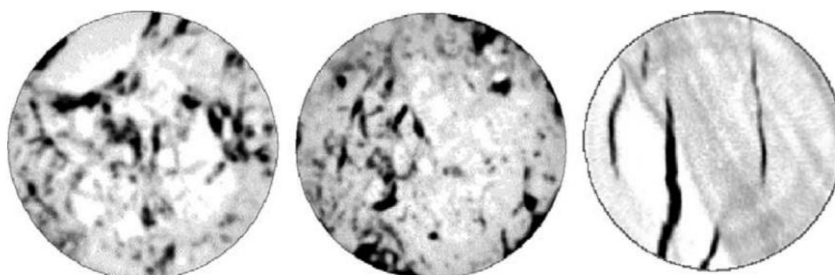
A 4. ábrán tömegmérésen alapuló megvalósítás látható. Ebben az esetben [8] a kiszorított folyadéktérfogat helyett a mért tömegek különbségéből számítható explicit képletek alapján az anyag porozitása.



4. ábra: Arkhimédészi módszer szerinti mérési pár [8]

2.7. Fény-, röntgen-, neutronszórás alapú módszer

A módszer [4] lényege, hogy a minta felülete adott fény-, röntgen-, vagy neutronnalábbal kerül besugárzásra, és a szórt, illetve keletkezett sugárzások detektálásával következtetni lehet a minta tulajdonságainak egy részére, többek között a porozításra.



2.8. Termoporozimetria és krioporozimetria

A mérési módszer a Gibbs-Thompson egyenleten alapul. Lényege, hogy adott a folyadék-kristály mérete és annak olvadáspontja alapján következtet a mintában jelenlévő pórusok méretére, méreteloszlására. A módszer [9] során, a minta folyadékfeltöltését követően a teljes mintát lefagyasztják. A kialakuló, különböző méretű folyadékkristályok olvadáspontja kis mértékben különböző, így olvadásuk nyomon követésével következtetni lehet azok térfogatára. Az eljárás szemcsés anyag pórusrendszerének vizsgálatára alkalmas.

2.9. Nyomáskülönbségen alapú porozitás mérés

A mérési eljárás ugyancsak térfogatkiszorításos módszeren alapul, szemcsés halmazok porozitásának meghatározására alkalmas. A megoldás [7] során több egymást követő mérés eredményének kiértékelésével számítható a porozitás. Az eddigi térfogatkiszorításos módszerekkel ellentétben ebben az esetben nem a rendszerbe kerülő plusz közeg mennyiségét mérjük. Ehelyett a mérés során a rendszerbe töltött halmaz mennyiségét és az általa létrehozott növekvő nyomásértékből következtetünk a porozitás értékére. Ezen a módszeren alapul a tanszéken jelenleg meglévő mérőállomás is, valamint számos piknométer is.

A mérés első lépése egy zárt, üres tartályban nyomás kialakítása egy kompressziótartály segítségével. Ezt követően a tartály különböző szintekre töltése mellett a kompressziótartály segítségével létrehozott új nyomásértékek összehasonlíthatóak az üres, referenciaállapottal. Az 1. számú melléklet a tanszéki állomáshoz tartozó mérés leírását és a kiértékelés menetét is tartalmazza. Ebben részletesen ismertetésre kerül a megvalósítás menete.

1. táblázat: Nyomáskülönbségen alapuló berendezések és fontosabb adataik:

Piknométer	Mintatartó térfogata	Pontosság	Mérési idő	Alkalmazott gáz	Gyártó	Link
G-DecPyc 2300 piknométer	10-20-65 cm ³	0,02% sűrűségre nézve	kevesebb, mint 5 perc	hélium (levegő, vagy nitrogén)	Gold APP Instruments	[10]
PMI PYC 100A piknométer	100 cm ³	0,05% sűrűségre nézve	kevesebb, mint 5 perc	hélium (levegő, vagy nem korrozív gáz)	PMI	[11]
Eijlelkamp féle piknométer	0-115 cm ³	leolvasási pontosság 1 cm ³	1 perc	levegő	Eijlelkamp	[12]
Ultrapyc 3000 piknométer	4,5-135 cm ³	0,02% sűrűségre nézve	kevesebb, mint 10 perc	levegő	Anton Paar Hungary Kft.	[13]
Belpycno piknométer	20-40-60-100-135 cm ³	0,01% sűrűségre nézve	N.I.	hélium (inert gáz)	Microtrac Retsch GmbH	[14]
PV-Pyc 200 piknométer	200 cm ³	0,01% sűrűségre nézve	N.I.	hélium, levegő	Instru-Quest Inc.	[15]
AccuPyc 1345 piknométer	1-2000 cm ³	0,02% térfogatra nézve	N.I.	hélium	Micromeritics Instrument Corporation	[16]
UGT lég-piknométer	2120 cm ³	0,01% sűrűségre nézve	N.I.	levegő, hélium	UGT	[17]
Bulkinspector piknométer	130/65/10 cm ³	0,02% sűrűségre nézve	N.I.	főképp hélium	Siebtechnik Tema	[18]

3. A MÉRÉSI MÓDSZER

A tervezési feladat olyan mérőállomás fejlesztését foglalja magába, mely képes egy egyedi kialakítású mérőtartályban egy szemcsehalmaz porozitás értékének meghatározására. Első lépés a mérési módszer megválasztása volt, melyhez a Tanszéken működő laboratóriumi porozitásmérő állomás kiindulópontként szolgált. A tervezett új állomás elméleti hátterét tekintve ugyanazzal a módszerrel dolgozik, mint a tanszéki állomás. Bizonyos számítások elvégzéséhez, várható mérési paraméterek becsléséhez is segítséget nyújtott a meglévő berendezés.

3.1. Tanszéki mérőállomás

A tanszéki mérőállomáshoz tartozó részletes mérési leirat és kiértékelési segédlet a tervezési feladat kiindulópontját jelentette. Az új tartály térfogata azonos nagyságrendben van, mint a laboratóriumi állomás tartálya, mely hasonlóság lehetővé teszi a tervezés során néhány segítő feltételezést.

A mérés során az ismert térfogatú mérőtartályban egy kompressziótartály segítségével hozható létre túlnyomás. Ennek értéke függ, a tartályban lévő szemcsehalmaz méretétől. Feltételezés, hogy amennyiben a meglévő tartály és az új tartály hasonló térfogatúak, valamint az adott állomásokon működő munkahengerek térfogata is közel azonos, és a mérés körülményei megegyeznek, úgy a mérések során várható túlnyomás értékek is azonos nagyságrendűek. Ez a feltételezés az új állomás méretezésének alapja.

A laboratóriumban működő mérés részletes segédlete az 1. számú mellékletben olvasható.

3.2. A munkahenger méretezése

A számítások során használt adatokat, paramétereket az 1. számú melléklet, valamint az 1. számú függelék tartalmazza. A tartály és a kompressziótartály térfogatának aránya 29:1, mely érték változatlan marad a tervezendő állomásra nézve. Az új tartály térfogatának ismeretében tehát kifejezhető a szükséges munkahenger térfogata. A térfogatok aránya segítségével pedig az új állomáson várható nyomás értéke is kiszámítható. Az új tartály térfogata annak geometriai paramétereiből az alábbi módon számítható:

$$A_{\text{tartály}} = A_{\text{tartály,belső}} - A_{\text{belsőhenger,külső}} \quad (1)$$

$$A_{\text{tartály}} = \frac{D_b^2 \pi}{4} - \frac{d_{h,k}^2 \pi}{4} = \frac{(175 \text{ mm})^2 \cdot \pi}{4} - \frac{(38 \text{ mm})^2 \cdot \pi}{4} = 0,02405 \text{ m}^2 \quad (2)$$

$$V_{tartály} = A_{tartály} \cdot H_{tartály} = 0,02405 \text{ m}^2 \cdot 0,35 \text{ m} = 0,00842 \text{ m}^3 \quad (3)$$

2. táblázat: A méretezéshez használt adatok összefoglalása

Paraméter	Érték	Mértékegység	Magyarázat
V	0,0035	[m ³]	A meglévő tartály térfogata
V _{AB}	0,00012	[m ³]	Kompressziótartály térfogata
V _{tartály}	0,00842	[m ³]	Az új tartály térfogata
p	5562,27	[Pa]	Létrehozott nyomás
V:V _{AB}	29:1	[1]	Térfogat arány

$$V_{munkahenger} = \frac{V_{tartály}}{29} = \frac{0,00842 \text{ m}^3}{29} = 0,00029 \text{ m}^3 \quad (4)$$

A tartályok hasonlóságából kiindulva azzal a feltételezéssel éltem, hogy a várható legnagyobb nyomásértéke becsülhető a tartályok térfogatarányának segítségével:

$$p_{várható} = p \cdot \frac{V}{V_{tartály}} = 5562,27 \cdot \frac{0,00842 \text{ m}^3}{0,035 \text{ m}^3} = 13378,83 \text{ Pa} \quad (5)$$

A munkahenger megválasztása során tehát a hasonlóság érdekében 290 cm³ térfogatú munkahenger választása javasolt. A munkahenger kiválasztására az 5. fejezetben térek vissza.

3.3. Elméleti hibaszámítás

A tervezendő állomás hibaszámítása a kvadratikus abszolút hiba képletével az alábbi módon végezhető el. A számítás során gondolatban az új állomáson végzett mérés eredményeit egy, a valóságban a laboratóriumi állomáson végzett méréssorozat adatsorával helyettesíttem. Ennek adatai a számolás követéséhez a 1. számú függelékben található. A porozitás kiszámításának képlete:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\left(\frac{p_0 + p_{mért,0}}{p_{mért,0}} - \frac{p_0 + p_{mért,1}}{p_{mért,1}} \right) V_{AB}}{V_{töltet,i}} \quad (6)$$

, ahol p_0 a légköri nyomás, $p_{mért,i}$ a nyomásmérővel érzékelt nyomás, V_{AB} a kompressziótartály, $V_{töltet,i}$ pedig a töltet térfogata.

A kvadratikus abszolút hiba képlete:

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial a_1} \Delta a_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial a_2} \Delta a_2\right)^2 + \dots} \quad (7)$$

, ahol y a porozitás kiszámítására alkalmas képlet (6), a_1 és a_2 pedig a mérés során közvetlenül mért értékek. Az (6) egyenletben ezek a p_0 , $p_{\text{mért},i}$, V_{AB} , valamint $V_{\text{töltet},i}$ értékek. A számítás során a 1. számú függelékben található önállóan végzett mérés eredményeit használtam és azt feltételeztem, hogy a tervezett állomáson hasonló adatokat lehetne mérni, mint a Tanszéken működőn.

Az alábbi táblázatban összefoglalt mérőműszer pontossági értékekkel határoztam meg a hiba értékét.

3. táblázat: Adatok a hibaszámításhoz

Paraméter	Pontosság	Mértékegység
p_0	100	Pa
$p_{\text{mért},0}$	0,5% FS*	Pa
$p_{\text{mért},1}$	0,5% FS*	Pa
V_{AB}	0,00001	m^3
$H_{\text{töltet},i}$	0,00002	m

*Megjegyzés: Amennyiben a beépített nyomásmérő pontossága 0,5% FS, úgy 100 mbar maximális mért érték esetén 50 Pa a megfelelő pontosság. A $H_{\text{töltet},i}$ mértékegysége azért méter dimenziójú, mert a töltet térfogatának hibáját annak magasságával közelítettem.

A hibaszámítás eredménye 50 mbar értékre:

$$\Delta \varepsilon = 0,0127, \text{ mely } \%-os \text{ értékben } 1,27 \%$$

A hibaszámítás eredménye 100 mbar értékre:

$$\Delta \varepsilon = 0,0245, \text{ mely } \%-os \text{ értékben } 2,45 \%$$

Ebből látható, hogy minél magasabb a töltet, a mérés annál nagyobb abszolút hibával képes csak megadni a porozitás értékét. A mérések számának növelésével azonban több információnk lesz, így pontosabb képet kapunk a halmaz porozitásának értékéről.

4. A VIZSGÁLT ANYAG

A mérés során alkalmazott töltet anyaga zeolit. A szemcseátmérő értéke 1,7-2,4 mm tartományba esik. Méretéből és szerkezetéből adódóan jó felületi megkötő képességgel rendelkező anyag. Felhasználása során töltet, szemcsehalmaz formájában van jelen. A szemcsehalmaz porozitása felhasználása során igen fontos paraméter, mert ez szoros kapcsolatban áll a betöltésnek hatékonyságával, időigényével.

A porozitás érték többek között függ a töltet állapotától, nedvességtartalmától, a töltés körülményeitől, és rázással, egyengetéssel történő tömörítés mértékétől is. Az alábbi képeken látható zeolit szolgál a mérés során a töltétként.



6. ábra: Töltétként szolgáló zeolit szemcsék

5. MÉRŐÁLLOMÁS MŰSZEREZÉSE

A laboratóriumi mérés során állandó hőmérsékleten történő nyomásváltozás nyomon követése, valamint térfogatmérés történik, mely a tervezett mérőállomás esetén is így marad. Ennek fényében a mérőállomáson szükséges tömeg-, nyomás- és térfogatmérés megvalósítása, továbbá szükséges a hőmérséklet folyamatos nyomon követése is.

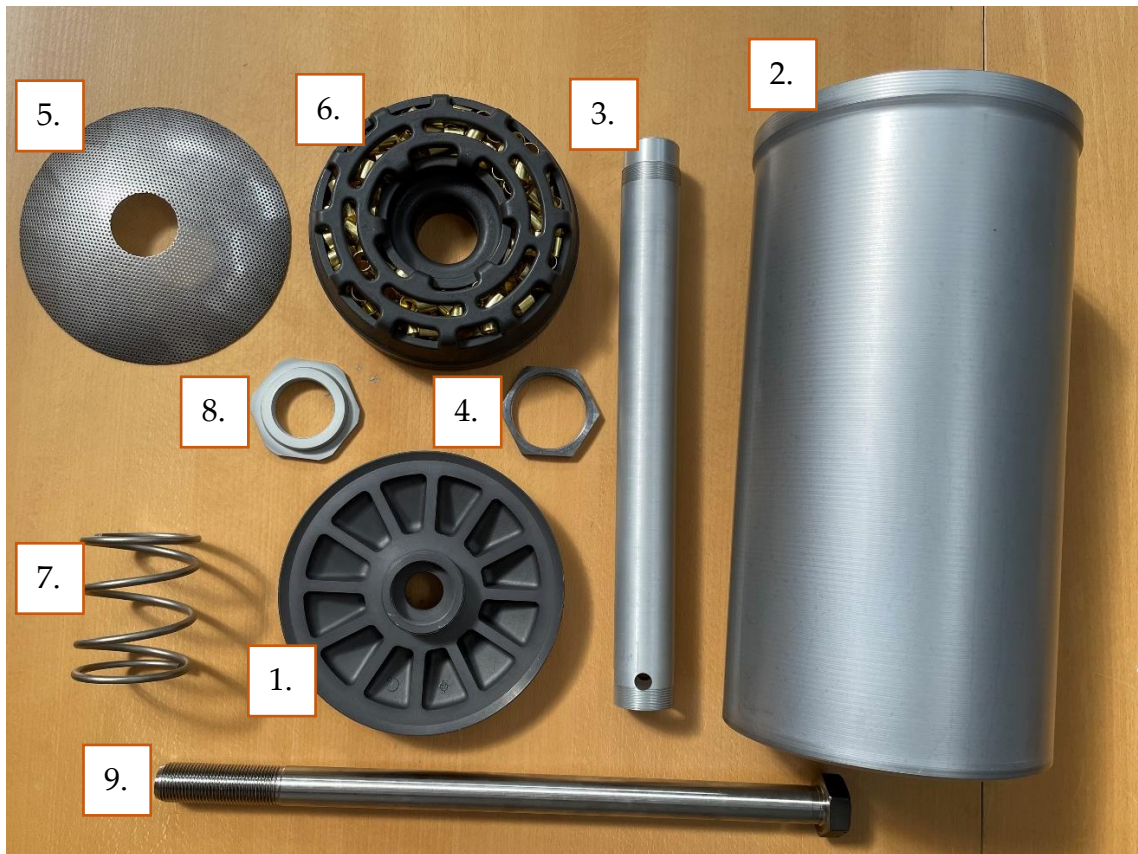
A műszerek megvalósítását nagyban befolyásolja a mérőtartály egységisége, az alábbiakban először ez kerül bemutatásra.

5.1. Mérőtartály

A mérés kivitelezéséhez a tartály egyedi formájából adódóan egyedi mérőállomás tervezésére van szükség. Az 4. képeken a fő alkatrészek láthatók, valamint látható a tartály összeszerelt állapotban.

Az alábbiakban a mérőtartály összeszerelésének leírása segítségével kerül bemutatásra a tartály formájából adódó tervezési feladat. Az 1-gyel jelölt tartályfenék belső menetes részébe csatlakozik a 3-as számmal jelölt kisebb átmérőjű üreges henger. (A lyukakkal ellátott vég kerül a becsavarásra.) A 2-es számú tartálytest a 4-es számmal jelölt anya segítségével kerül rögzítésre. A töltet távozását az üreges henger alsó lyukain az 5-tel jelölt domború rács akadályozza meg. A tartály megtöltött állapotában a töltet állandó térfogatát és a szemcsék mozgásának megakadályozását a 6-os számmal jelölt áramlástörő, elosztó szerepet is betöltő alkatrész segíti, melyet a 7-es számú rugó és azt a 8-as számú anya rögzíti és szorítja le. Az utóbbi anya a keskeny üreges henger felső menetes részéhez csatlakozik. A 9-es számú menetes szár nem a tartály egy alkatrésze, de a légmentes lezárás tervezése során szükséges alkatrész lesz.

Összeszerelés után jól látható, hogy a tartály nyitott a fenék oldalon, valamint a felső részen a tartálytest „tetején”, valamint a belső henger felső részén is. A mérés során a tartálynak teljesen zárt állapotban kell maradnia, így a tervezés során olyan fedelet, valamint záró megoldást kellett találni, mely kielégíti ezt a kritériumot.



7. ábra: A tartály fő alkatrészei, valamint összeszerelt állapota
 (1: tartályfenék, 2: tartály, 3: központi henger, 4: rögzítő anya, 5: domború rácslemez, 6: cseppfogó, 7: rugó, 8: rugóleszorító anya, 9: menetes szár)

5.2. Kompressziótartály

5.2.1. KRITÉRIUMOK, ELVÁRÁSOK

A laboratóriumi állomáson kompressziótartály szerepét egy vízzel tölthető tartály tölti be. A túlnyomás a zárt rendszerben a légtér összepréselésével jön létre, mely a jelenlévő víz térfogatának növelésével, tehát víz beadagolással történik. A túlnyomás értéke hidrosztatikai nyomásból vezethető le, mely a vízoszlop magasságából számítható. Részletesebb számítást az 1. sz. melléklet tartalmaz.

Hibaszámítás során megmutatkozott, hogy a mérés legnagyobb hibája a vízoszlop magasság pontatlanságából adódik, a meniszkusz leolvasása pedig további hibaforrásokat jelent, így javasolt más típusú megoldásra áttérni a túlnyomás létrehozásához.

Egy ilyen lehetőség pneumatikus munkahenger alkalmazása. A dugattyú alapállásból végállásba nyomása annak térfogatával egyező térfogatcsökkenést jelent a rendszerre nézve, az összenyomott légtér által létrehozott túlnyomás pedig nyomásmérővel mérhető.

A meglévő berendezésben a tartály és a kompressziótartály térfogatának aránya megközelítőleg 29:1. A korábbiakban már kifejtett gondolatmenet alapján, mely szerint ezt az arányt megtartva a várható nyomásérték az új mérőállomáson hasonló érték lesz az eddigiekhez tapasztalhatóhoz, a javasolt munkahenger térfogata kiszámítható.

Az adaptálandó tartály térfogata a 3.2. fejezetben számoltak szerint $8,42 \text{ dm}^3$. A kompressziótartály térfogata 290 cm^3 . Ha azt feltételezzük, hogy a mérés során létrejött nyomásértékek is hasonlóak lesznek, akkor $0,134 \text{ bar}$ túlnyomás létrehozására képes a munkahenger.

4. táblázat: A kompressziótartállyal szemben támasztott elvárások

Mérőtartály térfogata	$8,42 \text{ dm}^3$
Eredeti térfogatok aránya	29:1
Kompressziótartály térfogata	290 cm^3

Az általam választott és javasolt munkahenger az Emerson Electric által forgalmazott Profile cylinder ISO 15552, PRA series, melyből az alábbi táblázatban összefoglalt konstrukciók a megfelelőek. [19]

5.2.2. LEHETŐSÉGEK

5. táblázat: A javasolt dugattyú konfigurációk

Dugattyú átmérő	Rúd hossz	Csatlakozás		Térfogat	Létrehozott nyomás
		Menet	Rúd		
[mm]	[mm]			[m3]	[bar]
32	250	G 1/8	M10x1,25	0,000201	0,093
32	320	G 1/8	M10x1,25	0,000257	0,119
40	160	G 1/4	M12x1,25	0,000201	0,093
40	200	G 1/4	M12x1,25	0,000251	0,116
50	100	G 1/4	M16x1,5	0,000196	0,091
50	125	G 1/4	M16x1,5	0,000245	0,113
63	50	G 3/8	M16x1,5	0,000156	0,072
63	80	G 3/8	M16x1,5	0,000249	0,115
80	25	G 3/8	M20x1,25	0,000126	0,058
80	50	G 3/8	M20x1,25	0,000251	0,116
100	25	G 1/2	M20x1,25	0,000196	0,091

Az alábbi képen a típusba tartozó munkahenger látható.



8. ábra: A választott dugattyú [19]

5.2.3. JAVASLAT

A munkahenger kiválasztásának szempontja a megfelelő térfogaton túlmenően annak ára, belső átmérőjének és hosszának aránya és beépíthetősége. A dugattyú méretaránya a beépíthetőség mellett működtetési szempontból is fontos. Egy rövid, nagy átmérőjű dugattyú hirtelen, gyorsan hozza létre a túlnyomást, ezzel nagymértékben terhelve a tartályt, a fedelet, záróelemeket, a tömítést és a teljes állomást. Egy hosszabb, kis átmérőjű dugattyú ugyanezt a nyomást hosszabb idő alatt képes kialakítani, mely megnöveli a mérés idejét. Ebben az esetben azonban,

a nyitott állapotú dugattyú karja túlnyúlhat a berendezésen, így ennek nagyobb helyigényével kell számolni.

Ezek alapján a választott munkahenger a 5. táblázatban szereplő Profile cylinder ISO 15552 40/160.

6. táblázat: A javasolt dugattyú adatai

Dugattyú átmérő	Rúd hossz	Csatlakozás		Térfogat
[mm]	[mm]	Menet	Rúd	[m ³]
40	160	G 1/4	M12x1,25	0,000201

A munkahengerhez továbbá csatlakozót is kell biztosítani, amely lehetővé teszi a tartály és a munkahenger összekötését. Ehhez szintén az Emerson oldalán lehet az elem összeállítása során megfelelő csatlakozót választani. Javasolt csatlakozó a Straight push-in fitting QR2. [20]



9. ábra: Straight push-in fitting QR2 [20]

Emellett a dugattyú munkalapon való rögzítését is biztosítani kell, melyre az Emerson oldala számos lehetőséget kínál. Egyik ilyen az alábbi képen látható hajlított lemezes megoldás.



10. ábra: Első-hátsó dugattyú rögzítés [20]

Ez az elem a munkahenger után a legdrágább alkatrész, így, ha lehetőség van rá, a rögzítést érdemes saját gyártású lemezzel megoldani, amennyiben ennek előállítása olcsóbb. A választott munkahenger csatlakozóval, és a két rögzítő elemmel együtt nagyjából 60 000 Ft-ba kerül.

5.3. Nyomásmérő

5.3.1. KRITÉRIUMOK, ELVÁRÁSOK

A meglévő berendezésen elvégzett mérések kiértékelése során megállapítható a jelenlegi tartályban a kompressziótartály által létrehozott nyomás értéke, valamint számítható a kompressziótartály és a tartály térfogatának aránya. A tervezendő mérőállomáson az utóbbi arányt megtartva kiszámítható, hogy az adaptálandó tartályokhoz mekkora méretű kompressziótartály beépítésére van szükség.

A jelenlegi tartályon létrehozott nyomás értéke hasonló nagyságrendű értékben várható az új mérőállomás esetében is, amennyiben az új kompressziótartály és tartály térfogatának aránya hasonló a fent említetthez. Ezen az értéken az összekötő csövek, fedél és csatlakozók térfogata csökkent. Ezen adatból becsülhető, hogy mekkora mérési tartománnyal rendelkező nyomásmérő berendezés szükséges. Amennyiben az ajánlott kompressziótartály mérettel számolunk, úgy 8000-15000 Pa túlnyomás várható a tartályban, mely 80-150 mbar. Ennek mérése 0-350 mbar nyomástartomány között működő nyomásmérő berendezés javasolt.

5.3.2. LEHETŐSÉGEK

1. IntelliBee (JC Sensor) – JC624 általános célú relatív nyomástávadó



11. ábra: IntelliBee (JC Sensor) – JC624 nyomástávadó [21]

A javasolt nyomástávadó műszer konfigurációi az alábbi táblázatban láthatóak, a műszer költsége annak nyomástartományától és pontosságától függ. Speciális csatlakozók további kiegészítő költségekként jelenhetnek meg. Az alábbi táblázatban leírt konfiguráció ára 1%-os pontosság mellett bruttó 50000 Ft, míg 0,5%-os pontossággal ennél 5000 Ft-tal több. [21]

7. táblázat: A IntelliBee (JC Sensor) – JC624 nyomástávadó konfigurációi

Közeghőmérséklet (kompenzált)	-10-50 °C
Nyomástartomány (relatív)	0-1 bar
Mérési pontosság	0,5-1% FS
Csatlakozás	G 1/2" vagy G 1/4" külső menet
Elektromos kimenet lehetőségek	0-5V, 4-20 mA

2. IntelliBee (JC Sensor) – JC624 általános célú abszolút nyomástávadó



12. ábra: IntelliBee (JC Sensor) – JC624 nyomástávadó [21]

A javasolt nyomástávadó műszer konfigurációi az alábbi táblázatban láthatóak, a műszer költsége annak nyomástartományától és pontosságától függ. Speciális csatlakozók további kiegészítő költségekként jelenhetnek meg. Az alábbi táblázatban leírt konfiguráció ára 1%-os pontosság mellett bruttó 45000 Ft, míg 0,5%-os pontossággal ennél 5000 Ft-tal több. [21]

8. táblázat: A IntelliBee (JC Sensor) – JC624 nyomástávadó konfigurációi

Közeghőmérséklet (kompenzált)	-10-50 °C
Nyomástartomány (abszolút)	0-1,6 bar vagy 0-2,5 bar
Mérési pontosság	0,5-1% FS
Csatlakozás	G 1/2" vagy G 1/4" külső menet
Elektromos kimenet lehetőségek	0-5V, 4-20 mA

3. WT Sensor – PCM303 általános célú relatív nyomástávadó



13. ábra: WT Sensor – PCM303 nyomástávadó [21]

A műszer megfelelő konfigurációi az alábbi táblázatban láthatóak, a műszer költsége ugyancsak annak nyomástartományától és pontosságától függ. Kijelző, speciális csatlakozók további kiegészítő költségekként jelenhetnek meg. Az alábbi táblázatban látható kijelző nélküli konfiguráció ára bruttó 58000 Ft, míg LCD, illetve LED kijelzővel ennél 11000 Ft-tal, illetve 14000 Ft-tal több. [21]

9. táblázat: WT Sensor – PCM303 nyomástávadó konfigurációi

Közeghőmérséklet (kompenzált)	-10-50 °C
Nyomástartomány (relatív)	0-350 mbar
Mérési pontosság	0,5-1% FS
Csatlakozás	G 1/2" vagy G 1/4" külső menet
Elektromos kimenet lehetőségek	0-5V, 1-5V, 0,5-4,5V, 4-20 mA

4. Trafag – ECT16.0A nyomástávadó



14. ábra: Trafag – ECT16.0A nyomástávadó [22]

A műszer egy általam választott konfigurációja, a Trafag nyomástávadó G1/4" 0-16bar 4-20mA ECT16.0 A jellemzői az alábbi táblázatban láthatóak. Az alábbi konfiguráció ára bruttó 43000 Ft. [22]

10. táblázat: WT Sensor – PCM303 nyomástávadó konfigurációi

Közeghőmérséklet (kompenzált)	-25-125 °C
Nyomástartomány (relatív)	0-16 bar
Mérési pontosság	0,5% FS
Csatlakozás	G 1/2" vagy G 1/4" külső menet
Tápfeszültség	9...30V/DC
Elektromos kimenet lehetőségek	4-20 mA

5. A meglévő nyomásmérő- típuszám 5197A031



3. ábra: A meglévő nyomásmérő

A műszer jelenleg a tanszéki A jellemzői az alábbi táblázatban láthatóak.

11. táblázat: A meglévő nyomásmérő adatai

Nyomástartomány	0-100 mbar
Csatlakozó	6 mm

5.3.3. JAVASLAT

A javasolt nyomásmérő a meglévő műszer. Amennyiben ez nem bizonyul megfelelőnek az általam javasolt műszerek közül a WT Sensor – PCM303 nyomástávadó a legmegfelelőbb,

mivel ennek nyomástartománya a legszűkebb, és így a 0,5% FS pontosság ennél jelenti a legkisebb bevitt hibát.

12. táblázat: Távolságmérők adatainak összefoglalása

Nyomásmérő típusa	IntelliBee (JC Sensor) – JC624 relatív nyomástávadó	IntelliBee (JC Sensor) – JC624 abszolút nyomástávadó	WT Sensor – PCM303	Trafag – ECT16.0A	5197A031 típus-számú- tanszéki nyomásmérő
Mérési tartomány	0-1 bar	0-1,6 bar vagy 0-2,5 bar	0-350 mbar	0-16 bar	0-100 mbar
Mérési pontosság	0,5-1% FS	0,5-1% FS	0,5-1% FS	0,5% FS	-
Csatlakozó	G 1/2" és G 1/4" külső menet	G 1/2" és G 1/4" külső menet	G 1/2" és G 1/4" külső menet	G 1/2" és G 1/4" külső menet	6 mm gumicső
Ár	50000 Ft	45000 Ft	58000 Ft	43000 Ft	-

5.4. Távolságmérő

5.4.1. KRITÉRIUMOK, ELVÁRÁSOK

A távolságmérő kiválasztásakor figyelembe kell venni alkalmazhatóságának környezeti feltételeit, a műszer mérési tartományát és pontosságát, beépíthetőségét, radaros műszer esetén a félkúpszöget nagyságát, valamint a műszer árát. A legtöbb radaros szintmérő képes az elvárt környezeti feltételek mellett (légköri nyomás, 19-25 °C közötti hőmérséklet) mérést végezni, 0-10 méteres mérési tartományuk azonban nagyságrendekkel meghaladja a szükséges értéket. A műszer kiválasztása pontosság, beépíthetőség/alkalmazhatóság, valamint az ár összevetésével történt.

13. táblázat: A távolságmérővel szemben támasztott követelmények

Mérési tartomány	0-400 mm
Pontosság nagyságrendje	0,01-0,1 mm

5.4.2. LEHETŐSÉGEK

A mérés elvégzéséhez több megoldás is szóba jöhet. Az egyik távolságmérő szenzor beépítése a tartályfedélbe, a másik tolómérős távolságmérés megvalósítása a fedél zárása előtt.

Egyes beépíthető szenzorok:

1. Nivelco EchoTREK- SEV-380-2 ultrahangos szinttávadó



16. ábra: Nivelco EchoTREK- SEV-380-2 ultrahangos szinttávadó [22]

A műszer jellemzői alábbi táblázatban láthatóak, a szintmérő ára bruttó 315000 Ft. [22]

14. táblázat: Nivelco EchoTREK- SEV-380-2 ultrahangos szinttávadó adatai

Mérési elv	Ultrahangos
Üzemi hőmérséklet	-25-70 °C
Nyomás (abszolút)	0,5-30 bar
Mérési tartomány	0-6 m
Sugárzási kúpszög	5°
Pontosság	A mért távolság 0,2%-a
Kimenő jel	4-20 mA
Tápfeszültség	12-36V/DC

2. Digitális műanyag tolómérő 0-150/0.01 mm - Insize:



17. ábra: Insize tolómérő [23]

Ez a műszer a táblázatban összefoglalt műszaki adatokkal rendelkezik. Ára 5600 Ft, azonban a mérési tartománya maximum 150 mm. [23]

15. táblázat: Az Insize tolómérő adatai

Mérési tartomány	0-150 mm
Leolvasás	0,01 mm
Pontosság	0,01 mm

3. BERGER mélységmérő 300/0,02mm



18. ábra: BERGER mélységmérő [24]

Ez a műszer az előzőhöz képest jóval nagyobb, 300 mm-es felső mérési határral rendelkezik, a táblázatban találhatóak a műszaki adatok. Ára nagyjából 15000 Ft. Amennyiben a 300 mm még mindig nem elegendő, ennél nagyobb műszerre van szükség, ellenkező esetben ezt ajánlanám a méréshez. [24]

16. táblázat: BERGER mélységmérő adatai

Mérési tartomány	0-300 mm
Pontosság	0,02 mm

5.4.3. JAVASLAT

A távolság méréshez alkalmazható eszközök összehasonlítása során a vizsgált szempontok a mérési tartomány, a pontosság és az ár volt a kulcsfontosságú szempont. Ezek alapján a BERGER mélységmérő javasolt. Az összehasonlítást összefoglaló táblázat az alábbiakban látható.

17. táblázat: Távolságmérők adatainak összefoglalása

Távolságmérő típusa	Nivelco EchoTREK- SEV-380-2	Insize tolómérő	Berger mélységmérő
Mérési tartomány	0-6 m	0-150 mm	0-300 mm
Pontosság	Mért érték 2%-a	+/-0,01 mm	+/-0,02 mm
Ár	315000 Ft	5600 Ft	15000 Ft

5.5. Hőmérő

5.5.1. KRITÉRIUMOK, ELVÁRÁSOK

A hőmérő műszer kiválasztása során a kritérium csupán az, hogy a műszer képes legyen a laboratórium hőmérsékletén, 18-25°C-on mérni 0,1°C pontossággal.

5.5.2. LEHETŐSÉGEK

1. Nivelco THERMOCONT TFP-121-0, TFP -122-0 és TFP -221-0



19. ábra: Nivelco THERMOCONT - TFP-121-0 hőmérő [25]

Az alábbi táblázat a Nivelco THERMOCONT – TFP hőmérők három típusának jellemzőit foglalja össze, név szerint a TFP-121-0, TFP -122-0 és TFP -221-0 típusokét. A műszerek ára 18000 Ft és 25000 Ft között mozog típustól függően. [25]

181. táblázat: Nivelco THERMOCONT - TFP-121-0/122-0/221-0 hőmérők adatai

Üzemi hőmérséklet	-50-200 °C
Érzékelő típusa	PT100
Szonda átmérő	121-0/122-0: 6 mm 221-0: 8 mm
Max. mérőáram	5mA
Érzékelési osztály	MSZ EN 60751 szerinti "B" osztály
Pontosság	+2,3 °C
Benyúlási hossz	121-0/221-0:60 mm 122-0: 100 mm
Kábelhossz	0,6 m
Elektromos csatlakozás	teflon bevonatú; 0,35 mm ² érkeresztmetszetű vezeték

2. Correge hőelem

A hőelem 2,5 mm átmérőjű, így egy roppantógyűrű segítségével könnyen rögzíthető. A műszerek ára 13000 Ft. A műszer adatai az alábbi táblázatban olvashatóak. [26]



20. ábra: Correge hőelem [26]

19. táblázat: Correge hőelem fontosabb adatai

Max. hőmérséklet	600 °C
Termoelem típusa	J
Szonda átmérő	2,5 mm
Szonda hossza	35 mm
Kábelhossz	0,6 m

5.5.3. JAVASLAT

A beépítés során a fedélben egy roppantógyűrű tartja majd a hőelemet, melynek belső átmérője 3 mm. A javasolt hőmérő így annak átmérője, valamint az ára alapján a Correge hőelem.

5.6. Mérleg

5.6.1. KRITÉRIUMOK, ELVÁRÁSOK

A mérleg kiválasztásának szempontja a megfelelő mérési tartomány, mely nagyjából 0-30 kg. A tartomány felső határa nem pontos, mert a tartály teljesen megtöltött állapota kb. 30 kg, a cseppfogó, rugó, fedél és egyéb elemek pedig további tömegként jelennek meg. A mérleg

kiválasztásának továbbá annak pontossága is fontos. Érdeemes a lehető legnagyobb pontosságú mérleggel dolgozni. A tanszéken jelenleg több mérleg is található, ezeket összehasonlítva került kiválasztásra a javasolt berendezés.

5.6.2. LEHETŐSÉGEK

1. Sartorius AG – LA1200S



21. ábra: Sartorius AG – LA1200S mérleg

A mérleg mérési tartománya maximum 1200 g, mely túl kicsi ahhoz, hogy alkalmas legyen a mérés megvalósításához. Pontossága 0,001 g, mely nagyon kedvező érték, azonban a mérési tartomány kizárja jelen mérleg alkalmazását.

2. Sartorius AG – FCG34EDE-P0CE



22. ábra: Sartorius AG – FCG34EDE-P0CE

Mérési tartománya 0-34 kg, pontosság értéke pedig a mért tömeg függvényében változik; 0-8 kg között 0,1 g, 8-16 kg között 0,2 g, 16-34 kg között 0,5 g. Ez a mérési tartomány valószínűleg megfelelő, azonban fontos megjegyezni, hogy a tartály teljesen töltött állapotban kb. 30 kg. Fedéllel és tömítést biztosító elemekkel együtt teljesen megtöltött állapotban már lehetséges, hogy ez a mérleg nem képes a mérés megvalósítására.

3. Sartorius AG – Signum 1 – SIWADCP-1-65-S



23. ábra: Sartorius AG – Signum 1 – SIWADCP-1-65-S

A mérleg mérési tartománya 0-65 kg, mely meghaladja az előzőekben említett 30 kg-os kritikus értéket. Az eszköz pontossága 1 g. Ez a mérleg mindenképpen megfelelő a mérés elvégzésére.

5.6.3. JAVASLAT

Az összehasonlítás alapján a javasolt mérleg a Sartorius AG – Signum 1 – SIWADCP-1-65-S. Az összefoglalás az alábbi táblázatban is olvasható.

20. Táblázat: Mérleg összehasonlítás

Mérleg típusa	Sartorius AG – LA1200S	Sartorius AG – Signum 1 – SIWADCP-1-65-S	Sartorius AG – Signum 1 – SIWADCP-1-65-S
Mérési tartomány	0-1,2 kg	0-34 kg	0-65 kg
Pontosság	0,001 g	0,1 g; 0,2 g; 0,5 g	1 g

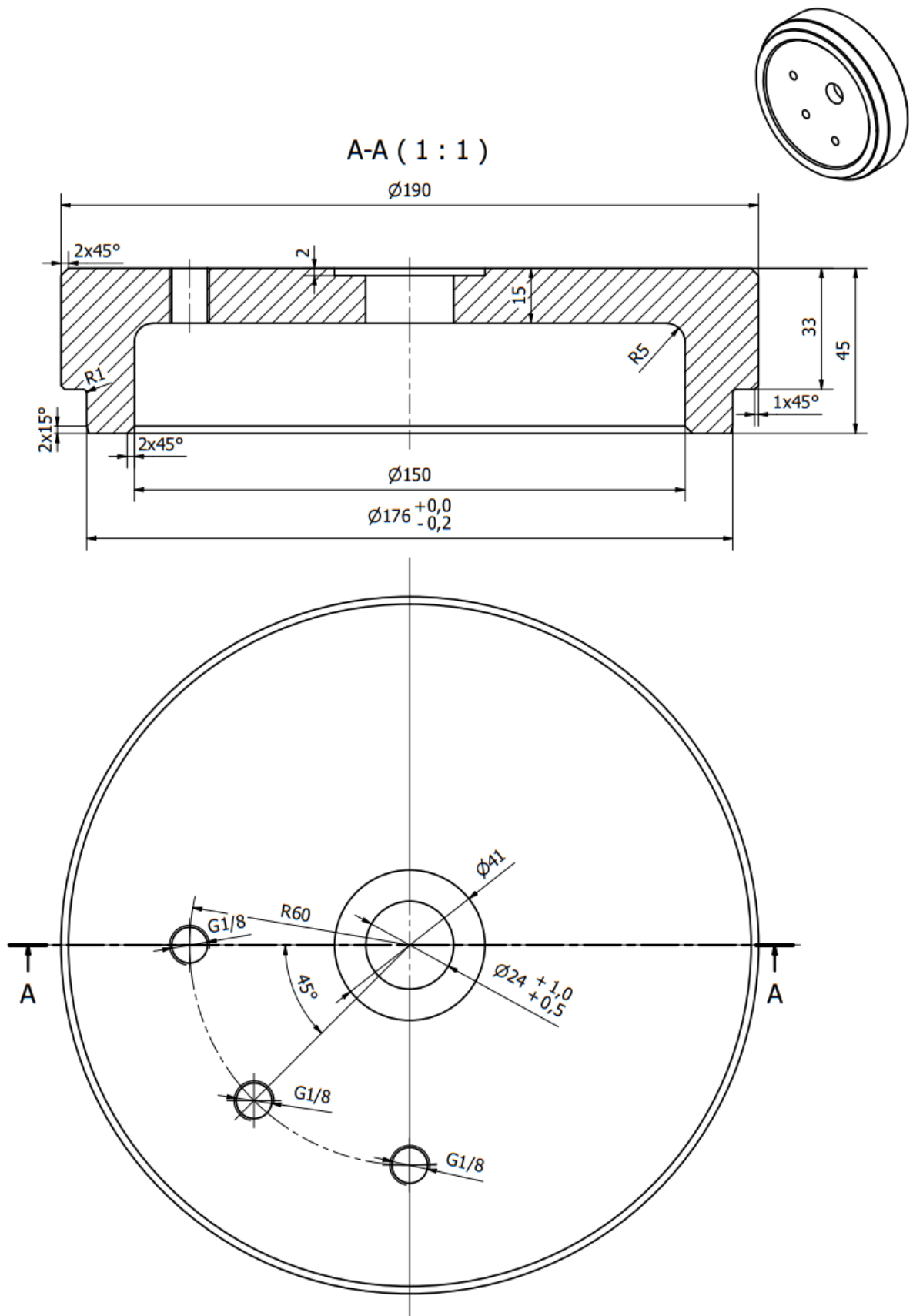
6. A MÉRŐÁLLOMÁS TERVEZÉSE

A tervezési feladat a tömítés kivitelezésének kérdésével foglalkozott először, és megoldásként az alábbiakban bemutatott tartályfedél, és ennek rögzítése lett megtervezve. Továbbá a teljes mérőállomás-alátámasztáshoz 3D modell készült, mely a működés vizualizálását is hivatott segíteni.

6.1. Tartályfedél

A tömítés megvalósításához a 23. ábrán látható tartályfedél tervét készítettem el. A fedél 176 mm-es peremével a tartály felső részébe helyezhető, melyben található egy 90 mm sugarú gumigyűrű. Ehhez hozzászorulva biztosítja a fedél ezen a részen a tömítést. A fedél közepén lévő kivágás pereme a tartály központi hengerére fekszik fel, és tömítés, valamint a menetes szárra húzott zártfejű anya oldja meg itt a tömítést.

A fedélen látható három furat a nyomásmérő, hőelem, valamint a dugattyú csatlakozói, melyek közül célszerű a dugattyú csatlakozóját középre tenni, mivel ennek csöve merevebb, mint az elektromos vezetékek, így azokat ehhez lehet erősíteni gátolva a kábelek összegabalyodását.



24. ábra: A fedél alkatrészrajza

A tartályfedél legyártása történhet egy tömör, 245 mm átmérőjű poliamid hengerből.



25. ábra: A poliamid rúd képe [27]

A termék 500 mm hosszúságú darabjának ára 18990 Ft. Ez egy bőven túlméretes tömb a konkrét alkatrész legyártásához. [27]

6.2. Az alátámasztás

A tartály alátámasztását 18 mm vastag bútorlapra erősített PVC áttoló karmantyú és abba erősített PVC dugó biztosítja. A munkalapon keresztül, középen egy olyan lyuknak kell lenni, amely elég széles ahhoz, hogy a tartály alján található anya elférjen benne, valamint szerelés során az befogható legyen egy kulccsal, így az általam ajánlott lyukátmérő 44 mm.

6.2.1. PVC TÁMASZTÓELEMENK

A PVC elemek közül a 200 mm belső átmérőjű karmantyú és az ebbe illő dugó felel meg a feladatnak. A karmantyú magasságából fakadóan felső felén elhelyezett O-gyűrűjével képes biztosítani a tartály függőleges helyzetben való megtámasztását. A két lapelemre a tartályhoz rögzített alsó anya magassága miatt van szükség.



26. ábra: PVC dugó és karmantyú [28]

A PVC dugót a bútorlaphoz 3 db facsavar rögzítheti, melyek nagyjából 70 mm távolságra már lehetnek a bútorlapon kifűrt lyuk középpontjától. Ekkor ugyanis biztosan nem érintkeznek a tartály alsó részével, nem esnek elég közel hozzá.

6.2.2. MUNKAHENGER FOGÓ

A mérőállomás összeállításához szükséges valamilyen módon a dugattyú szárának alap helyzetbe visszahúzása, miután a mérés befejeződött. Ennek egyik legegyszerűbb módja egy csillag alakú marokanya felcsavarozása.

A szükséges M16-os menetre például az alábbi fogó csavarható fel. [29]

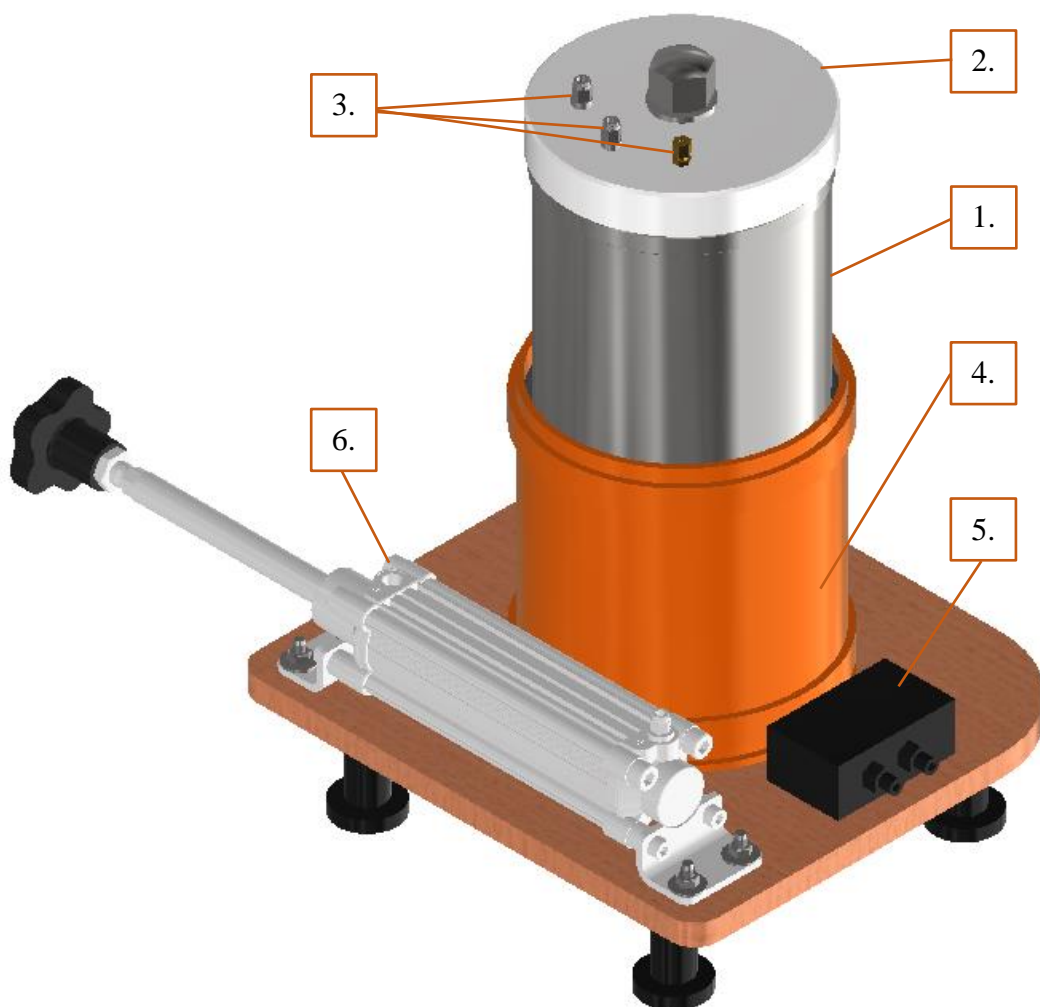


274. ábra: A csillag alakú marokanya [29]

7. A 3D MODELL

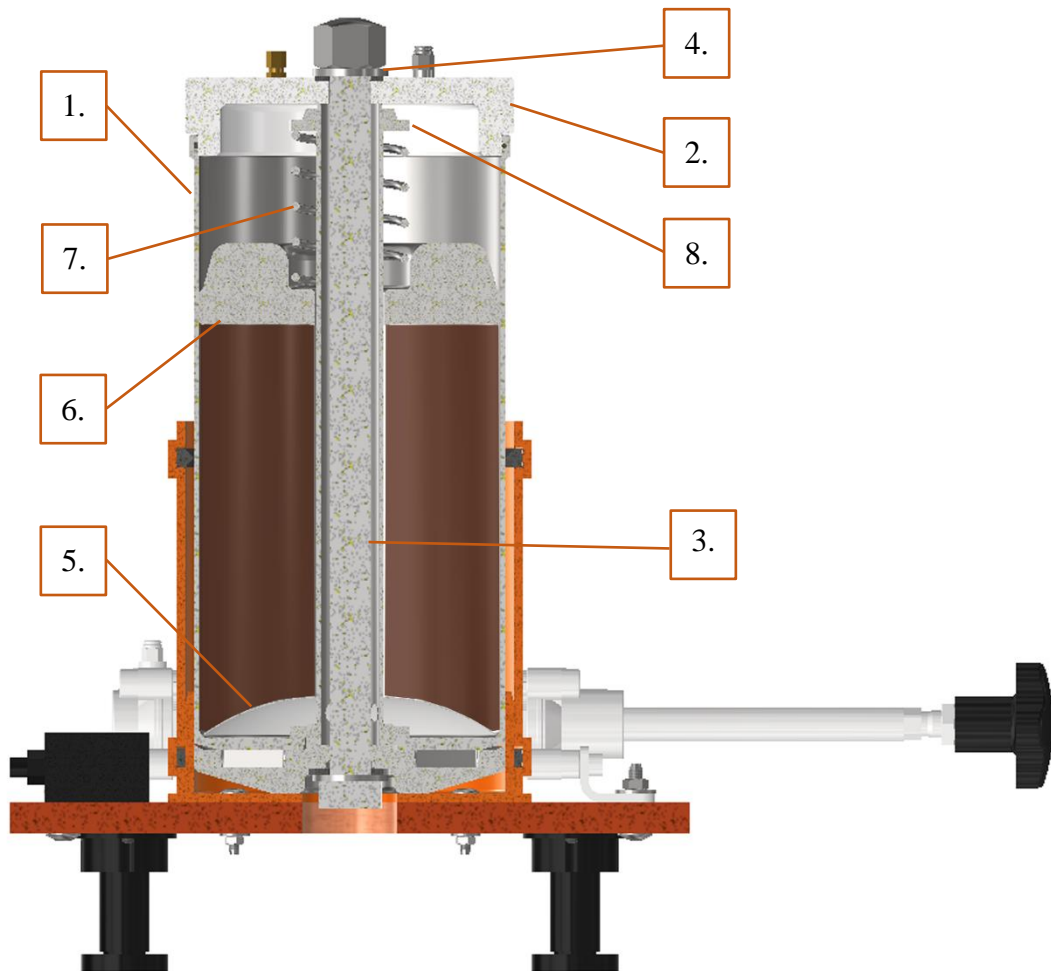
Az elkészített modell tartalmazza tehát a rendelkezésre álló és méréshez használt tartályt, a hozzá tartozó fedelet és tömítéseket, valamint rögzítő alkatrészeket. Emellett a mérőállomás összeállított alátámasztása, a munkahenger, valamint a mérőműszerek is a modell részét képezik. A nyomásmérő feketedobozként van jelölve, a csatlakozók megtalálhatóak a megfelelő helyen azonban a gumicsöves összeköttetést nem tartalmazza a modell.

Továbbá munkám során létrehoztam a 2. függeléként csatolt összeállítási rajzot, a fedél alkatrész rajzát, továbbá az alátámasztás törzsrajzát is. A 28-29. ábrák segítségével a 3D modell került bemutatásra.



28. ábra: A tervezett mérőállomás 3D modellje

(1: mérőtartály, 2: fedél, 3: csatlakozók, 4: alátámasztás, 5: nyomásmérő szenzor, 6: munkahenger)



29. ábra: A 3D modell metszete, a tartály belső részében a töltet helye barnával jelölve (1: mérőtartály, 2: fedél, 3: menetes szár, 4: rögzítés, tömítés, 5: domború rácslemez, 6: cseppfogó, 7: leszorító rugó, 8: rugórögzítő anya)

8. A TERVEZETT ÁLLOMÁS LEIRÁSA

A mérés elvégzéséhez szükség van az állomás összeszerelésére. Egy elvégzendő mérési sorozat egy üres, referencia-állapotra, valamint több töltött tartályállapotra végzett mérésből áll. A mért adatok kiértékelése szolgáltatja a mérés során a porozitás értékét.

8.1. Összeszerelés

A mérés kezdetén össze kell állítani a mérőállomást. Ehhez rendelkezésre kell állnia az alátámasztásnak, mely a bútorlapra rögzített PVC dugóból, és az arra helyezett PVC karman-tyúból áll. Továbbá a bútorlap aljára rögzített négy állítható magasságú bútorláb biztosítja a későbbi szerelés egyszerűsítése érdekében az állomás megemelését. Érdemes a szerelést a mér- leg közelében végezni, mivel a töltött tartály tömege akár 30 kg is lehet.

Az összeállítás első lépése a tartály összeszerelése. Ehhez a tartály különálló fenék ré- szére kell felhelyezni a hengeres tartálytestet, majd ezt rögzíteni kell a megfelelő anyával. Ezt követően a tartályfenék menetes részébe lyukakkal ellátott végével lefelé be kell csavarni a keskenyebb központi hengert. A tartály felső részén meg kell bizonyosodni arról, hogy a belső oldalon a 90 mm sugarú gumigyűrű a helyén van.

Következő lépésként a menetes szárra sorban az alátétet majd a tömítést kell elhelyezni, és ezt együtt az alátámasztás közepén kivágott nyílásba kell állítani, hogy a szál függőleges helyzetben legyen. Ezt követően lehet óvatosan a tartályt is ráhúzni, ekkor a tartály fenéke a PVC dugóra fekszik fel.

Ezután a tartály belsejébe óvatosan be kell helyezni a domború perforált lemezt. Ez az elem akadályozza meg, hogy a tartályba töltött zeolit a belső henger lyukain távozzon.

A szerelés menete itt kettévágzik. Amennyiben az első, „üres” mérést végezzük, a tar- tályba be kell helyezni a domború perforált lemezre a cseppfogót, valamint a rugót és az azt leszorító anyát is, mert ezek jelenlétére szükség van a nulladik, „üres” mérés esetén is.

Töltött állapot mérése előtt a tartályt mérlegre kell helyezni. Ezt követően megtörténhet a zeolit töltet beadagolása és elegyengetése. Célszerű a tartály óvatos rázásával egyengetni a halmazt. A töltet tömegét fel kell jegyezni. A megfelelő töltet mennyiségének beadagolása után annak tetejére kell helyezni a tartályhoz tartozó cseppfogó alkatrészt és a rugót. A két elemet a megfelelő anya központi hengeren való rögzítésével lehet leszorítani. Ez az összeállítás bizto- sítja, hogy a mérés során a halmaz állandó térfogatú marad.

Üres mérés során, valamint töltött állapotban is a következő lépés a fedél felhelyezése, amely előre rögzítve tartalmazza a hőmérőt, a nyomásmérő csatlakozóját, valamint a munkahenger csatlakozóját. A fedelet egy tömítés és egy alátét felhelyezése után a menetes szár alulról befogása mellett a zárt anya meghúzásával lehet rögzíteni. A tartály legkülső élére fel kell fektetnie a fedélnek, ekkor belül, a tartály keskenyebb hengeréhez szorul a megfelelő fedélrész. Ez utóbbi azonban kívülről nem látható.

A 2. számú függelékben az általam készített összeszerelési rajz látható.

8.2. Mérés menete

A mérés megkezdése előtt be kell csatlakoztatni a munkahengerből, valamint a nyomásmérőből érkező csöveket a fedélben található két csatlakozóba.

A mérés előtt fel kell jegyezni az uralkodó légköri nyomás értékét. Az összeszerelést követően a mérési sor megkezdhető. A munkahenger teljesen nyitott állapotból zárt állapotba tolasásával a tartályban nyomás jön létre. Ennek értékét kell feljegyezni, folyamatosan figyelve, hogy a hőmérséklet értéke állandó marad-e. Az „üres” mérést követően a munkahenger alap helyzetbe állítása, szétszerelés, töltés és összeszerelés után a mérés megismétlendő sorban növekvő töltetmennyiségek mellett. Minden egyes mérési sor esetén fel kell jegyezni a tartályba kerülő töltet tömegét, a töltet magasságát, vagy tartály felső karimájától vett távolságát, és a megfelelő nyomásértéket. A feljegyzett adatok az alábbi kiértékelés szerint dolgozandóak fel.

8.3. Kiértékelés

A feljegyzett nyomásértékekből a kompressziótartály térfogatának ismeretében meghatározhatóak az alábbi térfogatértékek:

$$V_0 = \frac{p_0 + p_{mért,0}}{p_{mért,0}} V_{AB} \quad (8)$$

$$V_{hézag,i} = \frac{p_0 + p_{mért,1}}{p_{mért,1}} V_{AB} \quad (9)$$

ahol p_0 jelöli a légköri nyomást, $p_{mért,i}$ pedig a létrehozott nyomást. V_{AB} a kompressziótartály térfogata. A töltet által elfoglalt, „tömör” térfogatrész számítására felírható:

$$V_0 - V_{hézag,i} = \left(\frac{p_0 + p_{mért,0}}{p_{mért,0}} - \frac{p_0 + p_{mért,1}}{p_{mért,1}} \right) V_{AB} \quad (10)$$

$V_0 - V_{hézag,i}$ tulajdonképpen a V_0 azon térfogatrésze, amit a betöltött anyag foglal el. A $V_{hézag,i}$ a hézagterfogat.

A töltet halmazának teljes térfogata a távolságmérésből számítható a tartály belső geometriájának ismeretében:

$$A_{tartály} = A_{tartály,belső} - A_{belsőhenger,külső} \quad (11)$$

$$A_{tartály} = \frac{D_b^2 \pi}{4} - \frac{d_{h,k}^2 \pi}{4} = \frac{(175 \text{ mm})^2 \pi}{4} - \frac{(38 \text{ mm})^2 \pi}{4} = 0,02405 \text{ m}^2 \quad (12)$$

Ebből pedig a töltet halmazának térfogata:

$$V_{töltet,i} = A_{tartály} H_{töltet,i} \quad (13)$$

$H_{töltet,i}$ értéke a távolságmérés segítségével adható meg az alábbi egyenlet alapján, ahol Δh a mért távolság értéke.

$$H_{töltet,i} = H_{tartály} - \Delta h \quad (14)$$

Ebből a porozitás értéke számítható:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\left(\frac{p_0 + p_{mért,0}}{p_{mért,0}} - \frac{p_0 + p_{mért,1}}{p_{mért,1}} \right) V_{AB}}{V_{töltet,i}} \quad (15)$$

A számítás elvégezhető sűrűségek összevetésével is, amennyiben a tartályba töltött anyag tömege, vagy annak sűrűsége ismert. Ennek levezetése elvégezhető az 1. mellékletben található levezetés követésével.

9. ÖSSZEFOGLALÁS

A feladat során megtervezett mérőállomás szemcsés anyagalmaz porozitásának, valamint halmaz- és szemcsesűrűségének meghatározására alkalmas. A szakirodalomkutatás során, bemutatásra kerültek a szemcsés anyagok porozitásának meghatározására alkalmas mérési berendezések és azok elméleti háttere. Mivel, külső tartály porozitásának meghatározása alkalmas berendezés megtervezése volt a cél, ezért a nyomáskülönbségen alapuló mérési módszer alapján került megtervezésre az új berendezés. A tervezés a Tanszéken meglévő, üzemelő porozitásmérő állomás vizsgálatának segítségével indult el. A laboratóriumi mérések során vizsgált anyag zeolit volt. A tervezés kiindulási pontját képezték, a zeolit felhasználásával végzett mérésekkel kapott eredmények. A meglévő és a tervezett mérőállomás tulajdonképpen a nyomás-kialakítás módjában, valamint lényeges geometriai kialakításokban tért el.

A tervezési feladat egyrészt egy egyedi kialakítású tartály tömítési kérdésével foglalkozott. A tömítés megoldására egy fedél lett megtervezve, mely biztosítja a mérés során alkalmazandó mérőszenzorok és a pneumatikus rendszer csatlakozását, valamint magát a tömítést is. A tervezés másik része a mérőállomás kialakításával foglalkozott. Ehhez a részhez a méréshez szükséges mérőszenzorok kiválasztása, a nyomást kialakító munkahenger méretezése és megválasztása, valamint egy mérőállomás alátámasztás megtervezése tartozott. Az alátámasztás biztosította a mérés során a tartály függőleges, stabil megtámasztását.

A TDK dolgozat, előzetes számításokat is tartalmaz a várható mérés hibájára, valamint bemutatja a tervezett berendezés 3D modelljét, a gyártáshoz és összeszereléshez szükséges műszaki rajzokat. A mellékletben csatolt segédlet mintájára, egy előzetes mérési és kiértékelési segédletet, valamint egy összeszerelési útmutatót is készítettem a tervezett berendezéshez.

10. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] „Mictotrac MRB,” 2023. [Online]. Available: <https://www.microtrac.hu/hu/termekek/gas-adsorption-measurement/mercury-porosimetry/belpore/#:~:text=A%20higany%2Dporozimetria%20a%20legink%C3%A1bb,anyagba%20val%C3%B3%20nyom%C3%A1sf%C3%BCgg%C5%91%20bepr%C3%A9sel%C3%A9s%C3%A9n%20alapul.>
- [2] J. Nael-Redolfi, E. Keita és N. Roussel, „Water absorption measurement of fine porous aggregates using an evaporative method: Experimental results and physical analysis,” *Elsevier*, p. 1, 2018.
- [3] Mikrajuddin Abdullah and Khairurrijal Physics of Electronic Materials Research Division, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Bandung Institute of Technology, „A Simple Method for Determining Surface Porosity Based on SEM Images Using OriginPro Software,” *Indonesian Journal of Physics*, 2009.
- [4] R. M.-A. J. P. L. H.-E. H. Taud, „Porosity estimation method by X-ray computed tomography,” *Journal os Petroleum Science and Engineering*, 2004.
- [5] A. Keller, „High Resolution, Non-destructive Measurement and Characterization of Fracture Apertures,” *Pergamon*, 1998.
- [6] P. Inc., „Perm Inc. TIMP Laboratory - Laboratory Porosity Measurement,” Perm Inc., [Online]. Available: <https://perminc.com/resources/fundamentals-of-fluid-flow-in-porous-media/chapter-2-the-porous-medium/porosity/laboratory-porosity-measurement/#:~:text=Imbibition%20method%3A&text=This%20property%20is%20used%20to,has%20the%20tendency%20to%20imbibe..> [Hozzáférés dátuma: 02 10 2023].
- [7] F. Andreola, C. Leonelli, M. Romagnoli és M. Paola, „Techniques Used to Determine Porosity,” *American Ceramic Society Bulletin*, 2000.
- [8] O. A. P. P. F. A. I. K. C. G. C. D. Thibaut de Terris, „Optimization and comparison of porosity rate measurement methods of Selective Laser Melted metallic parts,” 2019.
- [9] T. I. A. K. V.-P. L. W. M. D. Majda, „Application of thermoporometry for characterization of mesoporous silicon: In search for probe liquid aimed at large pores,” 2017.
- [10] „goldapp.com,” [Online]. Available: https://www.goldapp.com.cn/product-details?product_id=57.
- [11] „pmiapp.com,” [Online]. Available: <https://pmiapp.com/products/pyc-100a/>.
- [12] „eijkelkamp.com,” [Online]. Available: <https://en.eijkelkamp.com/products/laboratory-equipment/air-pycnometer-according-to-langer.html>.
- [13] „anton-paar.com,” [Online]. Available: https://www.anton-paar.com/corpen/products/details/ultrapyc/?utm_source=directindustry.com&utm_medium=product-placement&utm_campaign=hq_directindustry.productentry_online-portal&utm_content=C-00031727.
- [14] „microtrac.com,” [Online]. Available: <https://www.microtrac.com/products/gas-adsorption-measurement/density-measurement/belpycno-l/>.
- [15] „thermopycnometer.com,” [Online]. Available: <https://www.thermopycnometer.com/pvpyc200.html>.
- [16] „micromeritics.com,” [Online]. Available: <https://www.micromeritics.com/accupyc-ii/>.

- [17] „ugt-online.de,” [Online]. Available: <https://www.ugt-online.de/produkte/sale/luftpyknometer> .
- [18] „bulkinspector.com,” [Online]. Available: https://www.bulkinspector.com/wp-content/uploads/2021/11/wb230e_st_pycnometer-1.pdf .
- [19] E. Aventics, „Profile cylinder ISO 15552, PRA series,” 2022.
- [20] E. Aventics, „Aventics, Emerson Compressed Air Tubing and Fittings,” 2022. [Online]. Available: <https://www.emerson.com/en-hu/catalog/automation/fluid-control-pneumatics/fittings-tubing/aventics-qr1-en-gb?fetchFacets=true#facet:&partsFacet:&modelsFacet:&facetLimit:&searchTerm:&partsSearchTerm:&modelsSearchTerm:&productBeginIndex:0&partsBeginIndex:0&>.
- [21] „Techmen.hu,” 2015. [Online]. Available: https://www.techmen.hu/nyomasmeres_132/nyomas_tavado_-_wt_sensor_301.
- [22] „aqua-filt.hu,” 2012. [Online]. Available: <https://www.aqua-filt.hu/ar/trafag-nyomastavado-g1-4-0-16bar-4-20ma-ect16-0a/>.
- [23] „M & B Calibr,” 2023. [Online]. Available: https://www.mbcaltibr.hu/digitalis-tolomerok/digitalis-muanyag-tolomero-0-150-0-01-mm-insize/?gclid=Cj0KCQjw4NujBhC5ARIsAF4Iv6cSxdAHTAhAcBwBvTVV5IEUCZZXLQNZzkYa8jYtwYvwTqq7YMFsgc4aAmV3EALw_wcB.
- [24] „szerszampiusz.hu,” 1990. [Online]. Available: https://szerszampiusz.hu/berger-melysegmero-300002mm?utm_source=google_shopping&utm_medium=cpp&utm_campaign=direct_link&gclid=Cj0KCQjw4NujBhC5ARIsAF4Iv6caF1oTWdrKCqb7Yma3bbuqXLD4eRRkKh5jB_nfyxRhJ6GExB0CiesaApjZEALw_wcB.
- [25] N. I. E. ZRT., „NIVELCO Termékkatalógus 2019,” 2019.
- [26] „RS.hu,” [Online]. Available: <https://hu.rs-online.com/web/p/hoelemek/5477764>.
- [27] „Gash Gépalkatrész Shop,” [Online]. Available: <https://gepalkatreszshop.hu/Poliamid-rud-O245x110-6-Kg>.
- [28] BTHFitting, „BTH Termékkatalógus”.
- [29] „norem.hu,” 2023. [Online]. Available: <https://norem.hu/hu/Term%C3%A9kek+%C3%A1ttekint%C3%A9se/H%C3%BCvelyk-rendszer%C5%B1-cikkek/06000-inch/Foganty%C3%BAk-%C3%A9s-gombok-colos/Csillagmarkolatok-DIN-6336-szer%C5%B1-nemesac%C3%A9l-ac%C3%A9lelemek-colos/p/agid.23507>.
- [30] „Sparkfun.com,” [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/15569>.
- [31] „Chapter 6- The Reservoir,” Elements of Petroleum Geology, 2015.
- [32] „gepalkatreszshop.hu,” [Online]. Available: <https://gepalkatreszshop.hu/Poliamid-rud-O245x110-6-Kg>.
- [33] „norem.hu,” [Online]. Available: <https://norem.hu/hu/Term%C3%A9kek+%C3%A1ttekint%C3%A9se/H%C3%BCvelyk-rendszer%C5%B1-cikkek/06000-inch/Foganty%C3%BAk-%C3%A9s-gombok-colos/Csillagmarkolatok-DIN-6336-szer%C5%B1-nemesac%C3%A9l-ac%C3%A9lelemek-colos/p/agid.23507>.

11. FÜGGELÉK

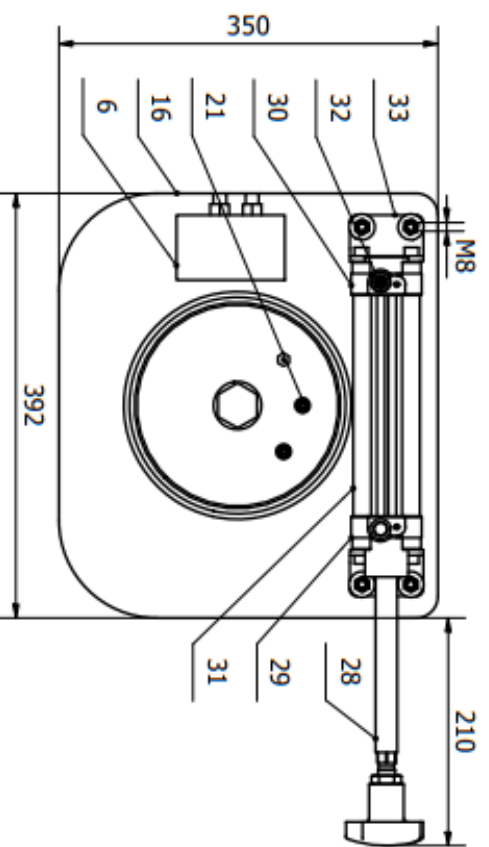
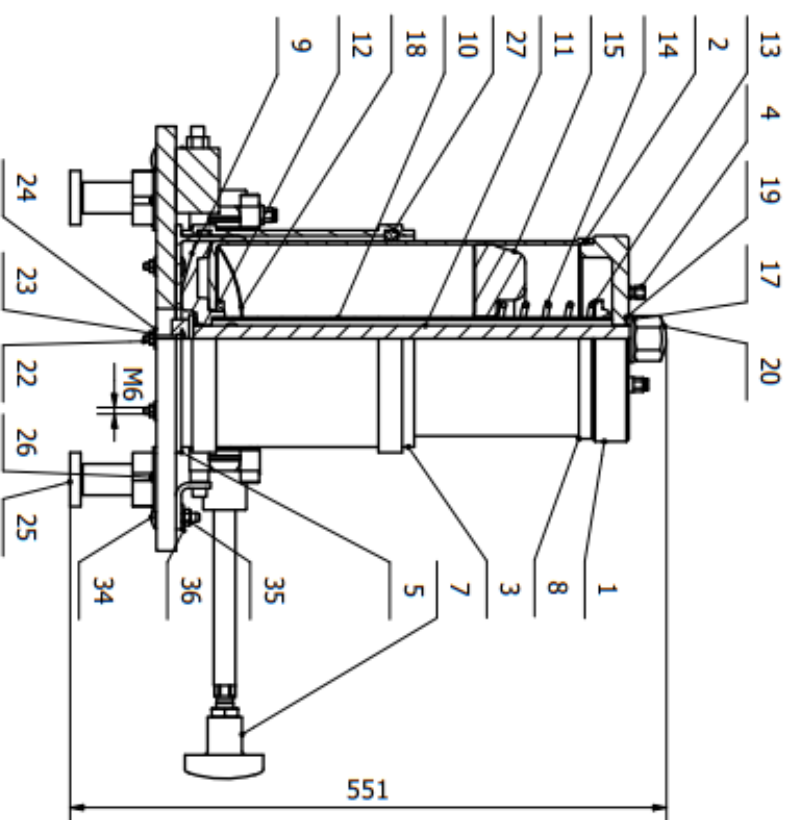
1. Függelék: Önálló mérés a tanszéki állomáson

Mérés	p_0 [kPa]	m_i [g]	h_{hiba} [mm]	Δh_i [mm]	V_i [m ³]	$\rho_{mért,i}$ [Pa]
1.	102,3	0	6	413	0	3992,67
2.	102,3	914,3	6	447	0,00098	4326,21
3.	102,3	2145,2	6	507	0,00244	4914,81
4.	102,3	3035	6	573	0,00347	5562,27

2. Függelék: Az összeszerelési rajz

PARTS LIST

ITEM	QTY	PART NUMBER	MATERIAL	MASS	DESCRIPTION
1	1	Tető	ABS	0,722 kg	
2	1	O-gyűrű	Rubber	0,003 kg	
3	1	Karmanthű	PVC	1,017 kg	KG 200 átlóló karmanthű
4	1	Roppantógyűrű	Brass	0,004 kg	
5	1	PVC dugó	PVC	0,461 kg	200 mm
6	1	Nyomásmérő	ABS	0,262 kg	
7	1	Munkahenger fogó	ABS	86,529 g	
8	1	Tartály	Stainless Steel	5,711 kg	
9	1	Tartályfenék	Stainless Steel	3,120 kg	
10	1	Tartály belső henger	Stainless Steel	0,833 kg	
11	1	Főcsavar	Stainless Steel	0,207 kg	M24x436
12	1	Alsó csavar	Stainless Steel	0,065 kg	Belső henger rögzítő
13	1	Felső csavar	Stainless Steel	0,191 kg	Rugó leszorító
14	1	Rugó	Stainless Steel	0,128 kg	
15	1	Abszorber egység	Stainless Steel	7,066 kg	
16	1	Bútorlap	Wood (Oak)	1,791 kg	Vastagság 18 mm
17	2	Alátét M24	Stainless Steel	0,033 kg	M24
18	1	Domború lemez	Stainless Steel	0,021 kg	
19	2	Tömítés M24	Rubber	0,002 kg	d40/24- 3 mm
20	1	Hattapú anya M24	Steel, Mild	0,177 kg	M24
21	2	Gumicső csatlakozó	Stainless Steel	0,015 kg	d6 mm - G 1/8
22	3	Kapupántcsavar	Steel, Mild	0,012 kg	M6x35
23	3	Hattapú anya M6	Steel, Mild	0,003 kg	M6
24	3	Alátét M6	Steel, Mild	0,003 kg	M6
25	4	Bútorláb	ABS	0,096 kg	
26	16	Facecavar	Steel	0,002 kg	4x16
27	1	Karmanthű tömítés	Rubber	0,044 kg	
28	1	Munkahenger rúd	Stainless Steel	1,309 kg	
29	1	Hengerfej	Stainless Steel	0,824 kg	
30	1	Hengerfedél	Stainless Steel	0,760 kg	
31	1	Munkahenger	Stainless Steel	1,651 kg	
32	1	Gumicső csatlakozó	Stainless Steel	0,021 kg	d6 mm - G 1/8
33	2	Munkahenger rögzítő	Stainless Steel	0,191 kg	
34	4	Kapupántcsavar M8	Stainless Steel	0,024 kg	M8x40
35	4	Hattapú anya M8	Steel	0,005 kg	M8
36	4	Alátét M8	Steel	0,006 kg	M8

Designed by
Szezmán Dávid

Checked by

Approved by

Date
2023. 08. 15.

Összeállítási Rajz

Edition
Sheet
1 / 1

12. MELLÉKLET

Szemcsés anyag porozitás mérési segédlet - Dr. Poós Tibor, Budapest, 2023.

SZEMCSÉS ANYAG POROZITÁS

mérési segédlet



Mérés helyszíne: D114 Laboratórium

Készítette: Dr. Poós Tibor

Budapest, 2023. március 09.

1 A mérés célja

A mérés célja a kiválasztott szemcsés anyag halomsűrűségének meghatározása, majd a szemcsesűrűség meghatározása a porozitásmérő berendezés segítségével. Ezután az anyag porozitásának számítása.

2 Elméleti háttér

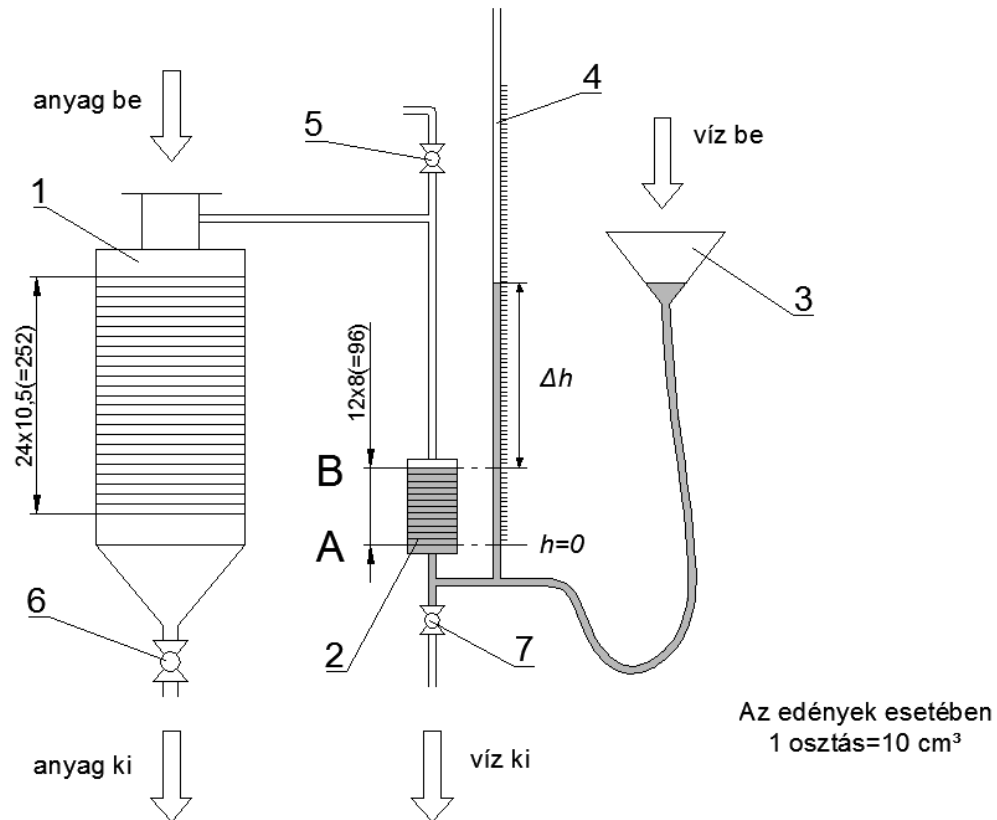
A vegyiparban gyakran alkalmazunk olyan készülékeket, amelyeknek belsejét golyókkal, tölteléktestekkel, különleges alakú vagy szabálytalan részecskékkel, ill. nagy felületű testekkel töltünk ki. A töltött csövek, oszlopok vagy ágyak feladata általában az, hogy növelje a fázisok érintkezési felületét. A leggyakoribb ilyen készülékek a töltetes oszlopokkal és ágyakkal üzemelő adszorpciós, desztillációs, abszorpciós, extrakciós berendezések és a heterogén katalitikus reaktorok. Emellett szemcsehalmazt alkothatnak különböző műveletek alapanyagai, pl: aktív szén, termények, vagy a szűrés közben kialakuló iszaplepeny is.

A szemcsék vagy tölteléktestek között hézagok, üregek, kis csatornák, kapillárisok vannak. Ezekben áramlik a fluidum, levegő, vagy valamilyen gáz. A szemcsék általában nem mozognak, illetve, ha az áramló közeg megmozdítja a halmazt, az már bolygatott, azaz lazított ágy, majd fluidizált ágy és végül pneumatikusan szállított halmaz lesz.

2.1 A mérőberendezés

A porozitás mérésére alkalmazható egyik berendezés a Hofsäss-féle légpiknométer, amely gáztágulási elven működik. A készülék a műszerbe zárt levegő térfogatának meghatározását teszi lehetővé. Vázlata a 1. ábrán látható.

A mérendő anyag a nagyméretű, $\sim 2,5 \text{ dm}^3$ mérőedényben (1) helyezkedik el. Ez egy légvezetéken keresztül kapcsolatban van a kisméretű, $0,96 \text{ dm}^3$ kompressziótartállyal (2), melyben a kívánt vízszint beállítása történik. A vízszint beállítására a tölcser (3) emelésével és szükség esetén víz beletöltésével van lehetőség. Mind a mérőtartály, mind a kompressziótartály skálázva van, ahol egy osztásköz 10 cm^3 térfogatnak felel meg. A tölcser egy flexibilis csővel csatlakozik a kisméretű kompressziótartályhoz és a berendezés többi eleméhez. Mérés közben a vízszint leolvasása a milliméter skálával ellátott mérőcső (4) segítségével történik. A mérés kezdeti értékeinek beállításakor a felső gömbcsapot (5) nyitva kell tartani, hogy biztosított legyen a rendszerben a légköri nyomás. A mérés további részében ezt zárt állapotban kell tartani. A tárolóedény alján elhelyezett gömbcsap (6), és a mérőedény alatt lévő gömbcsap (7) csak a rendszer tisztítását és leürítését szolgálják, így a mérés során zárt állapotban vannak.



1. ábra. A berendezés vázlata

(1 – mérőedény, 2 – kompressziós tartály, 3 – tölcser, 4 – skálázott mérőcső, 5 – légkörre nyitott gömbcsap, 6 – mérőedényhez tartozó csap, 7 – kompressziós tartályhoz tartozó csap)

2.2 A mérési módszer

A különböző anyagok porozitásának meghatározása két lépésben történik. Először meg kell mérni az adott anyag halomsűrűségét, majd ezt követően a szemcsék tényleges sűrűségét.

2.2.1 Halmazsűrűség mérése

A halomsűrűség (halmazsűrűség) valamely szemcsés vagy darabos anyag tömegének és a hézagokat, üregeket, pórusokat is tartalmazó térfogatának hányadosa:

$$\rho_H = \frac{m}{V+V_h} \quad (1)$$

Amíg valamely szemcsés anyag sűrűsége állandó érték, addig halomsűrűsége az anyag-halmaz elrendeződéséből következően két határérték között változik. Ha a mérést közvetlenül a mérőedénybe öntést követően végezzük, a halomsűrűség alsó határértékét kapjuk. Ha az edényben az anyagot összetömörítjük, a felső határértéket kapjuk meg.

A mérés során mérőedénybe adott térfogatú anyagot kell betölteni, aminek utána digitális mérleg segítségével megmérjük a tömegét vagy mérőhengerbe rakunk ismert tömegű mintát és leolvassuk a hozzá tartozó térfogatot. Ezt a mérést csak egyszer kell elvégezni.

2.2.2 Sűrűség mérése

A sűrűség definíció szerint egyenlő egy test tömegének és térfogatának hányadosával:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

A szemcsék tömege ismert a halomsűrűségéből, a feladat a térfogatuk megmérése. Ezt közvetett úton tudjuk megtenni, az általuk kiszorított levegő térfogatának meghatározásával. Ha megmérjük a műszerbe zárt levegő térfogatát anyag nélkül, majd a behelyezett anyaggal együtt, a két levegő-térfogat különbsége megadja a szemcsék térfogatát.

A laboratóriumi mérés első lépése az anyag nélküli, üres mérőtartállyal (1) történő mérés. Ezután a mérés megismétlésre kerül a mérendő anyag betöltésével.

2.2.2.1 Mérés anyag nélkül

- Az üres mérőműszeren elzárjuk a (6)-os és (7)-es gömbcsapot, az (5)-öst pedig nyitott állásban hagyjuk. A mérőedény (1) tetejére ráhelyezzük a tömítőgyűrűt, majd a kupakot és triclamp bilincsel rögzítjük.
- A tölcserbe (3) vizet töltünk (~250 ml) addig, amíg a kompressziótartályban (2) el nem éri a vízszint az 'A' jelzést (legalsó szintjelző horony) és a mérőcsövön 0-t. Közben ügyelni kell rá, hogy a flexibilis csőben ne maradjanak légbuborékok. A tölcser az alsó pozícióban van.
- Pontos szintbeállítás után zárjuk az (5)-ös gömbcsapot, ezzel bezárjuk a levegőt a rendszerbe.
- A tölcser emelésével és a tölcserből elfogyó víz folyamatos pótlásával (még ~250 ml) a folyadék szintjét a kompressziótartályban 'B' jelre állítjuk (legfelső szintjelző horony). Ezzel összenyomjuk a bezárt levegőt. Fontos, hogy a tölcserben mindig maradjon víz, hogy ne kerülhessenek légbuborékok a rendszerbe.
- Leolvassuk, és feljegyezzük a skálázott mérőcsövön (4) a vízszintet.
- Először a (7)-es, majd az (5)-ös csap nyitásával leengedjük a felesleges vizet a rendszertől. A tölcser újra alsó helyzetbe állítjuk.

2.2.2.2 Mérés anyaggal

A mérés menete megegyezik az előzőekben leírtakkal azzal a különbséggel, hogy a mérőedénybe (1) a kupak rögzítése előtt belehelyezzük az ismert tömegű anyagot. Törkedni kell rá, hogy lehetőleg minden szemcse a tartályba jusson. Mérés után a mérőedény a (7)-es gömbcsapon keresztül üríthető. A mérést több, ismert tömegű anyaghalmozra is el kell végezni. A mérés befejezéseként a rendszert vízzel át kell mosni, a csapot pedig nyitott állásban hagyni.

2.3 A kiértékelés módszere

Az (5)-ös csap zárásakor a rendszerbe zárt levegő nyomása légköri, azaz p_0 , térfogata pedig V_0 . Miután a kompressziótartályban a folyadék szintjét 'B' jelre állítottunk, a belső levegő összenyomódott $V_0 - V_{AB}$ térfogatra, ahol V_{AB} az 'A' és 'B' jelek közti térfogat. Ez a kompressziótartály geometriai kialakítása alapján adott műszerállandó. A kompresszió izotermikusnak tekinthető, mert a keletkező hő a környezet folyamatosan elvezeti. Ezáltal felírható a belső tér kompresszió utáni nyomása:

$$p = p_0 + \rho_v \Delta h_0 g \quad (3)$$

Az izoterm állapotváltozásra felírható összefüggés:

$$p_0 V_0 = (p_0 + \rho_v \Delta h_0 g)(V_0 - V_{AB}) \quad (4)$$

Ebből az üres műszerbe zárt levegő térfogata:

$$V_0 = \frac{p_0 + \rho_v \Delta h_0 g}{\rho_v \Delta h_0 g} V_{AB} \quad (5)$$

Ezután következik a mérés a műszerbe helyezett szemcsés anyaggal. Ekkor a skálázott mérőcsőről leolvasható értékből Δh_i számítható. A bezárt levegő térfogata:

$$V_i = \frac{p_0 + \rho_v \Delta h_i g}{\rho_v \Delta h_i g} V_{AB} \quad (6)$$

A két térfogat, (5)-ös és (6)-os egyenlet különbsége megadja a vizsgált anyag térfogatát. Ismert m_i tömegű anyag térfogata tehát:

$$V_0 - V_i = \left(\frac{p_0 + \rho_v \Delta h_0 g}{\rho_v \Delta h_0 g} - \frac{p_0 + \rho_v \Delta h_i g}{\rho_v \Delta h_i g} \right) V_{AB} \quad (7)$$

Melyben a törteket tagokra bontva, előjelre ügyelve kapjuk a (8)-as egyenletet:

$$V_0 - V_i = \left(\frac{p_0}{\rho_v \Delta h_0 g} + 1 - \frac{p_0}{\rho_v \Delta h_i g} - 1 \right) V_{AB} \quad (8)$$

Közös nevezőre hozást követően az alábbi alakra írható át az egyenlet:

$$V_0 - V_i = \left(\frac{p_0 \rho_v \Delta h_i g - p_0 \rho_v \Delta h_0 g}{\rho_v \Delta h_0 g \rho_v \Delta h_i g} \right) V_{AB} \quad (9)$$

Az érthetőség érdekében határoljuk el a törtet a következő módon:

$$V_0 - V_i = \left(\frac{p_0}{\rho_v \Delta h_0 g} \frac{\rho_v \Delta h_i g}{\rho_v \Delta h_i g} - \frac{p_0}{\rho_v \Delta h_0 g} \frac{\rho_v \Delta h_0 g}{\rho_v \Delta h_i g} \right) V_{AB} \quad (10)$$

A p_0 számlálójú törtet ekkor kiemelve, és a különbség tagjaiban egyaránt a $\rho_v g$ taggal egyszerűsítve felírható a következő alak:

$$V_0 - V_i = \frac{p_0}{\rho_v \Delta h_0 g} \left(\frac{\Delta h_i}{\Delta h_i} - \frac{\Delta h_0}{\Delta h_i} \right) V_{AB} \quad (11)$$

Ebből már csak egyszerű átrendezés eredménye az alábbi egyenlet:

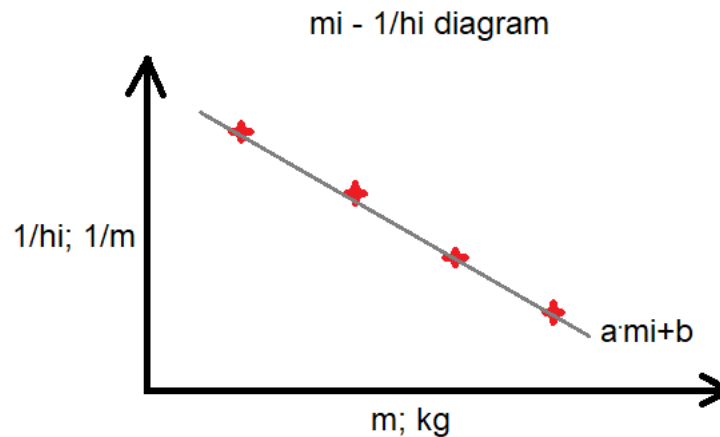
$$V_0 - V_i = \frac{p_0}{\rho_v \Delta h_0 g} \frac{\Delta h_i - \Delta h_0}{\Delta h_i} V_{AB} \quad (12)$$

Ebből meghatározható az anyagsűrűség a (12)-es egyenlet segítségével:

$$\rho = \frac{m_i}{V_0 - V_i} = \frac{m_i}{V_{AB}} \frac{\rho_v \Delta h_0 g}{p_0} \frac{\Delta h_i}{\Delta h_i - \Delta h_0} \quad (13)$$

A mérési hibák csökkentése érdekében több, különböző tömegű anyagmintára is el kell végezni a mérést, és a sűrűséget lineáris regresszióval kell közelíteni.

A (8)-as egyenletet átrendezve a mérőcsőben lévő vízszint kitérésének reciproka a vizsgált tömeg lineáris függvénye.



2. ábra. $m_i - \frac{1}{\Delta h_i}$ - diagram

$$\frac{1}{\Delta h_i} = - \frac{\rho_v g}{\rho p_0 V_{AB}} m_i + \frac{1}{\Delta h_0} = a m_i + b \quad (14)$$

$m_i - \frac{1}{\Delta h_i}$ diagramban ábrázolva a mért pontokat, megkaphatjuk a pontokra illesztett elsőfokú trendvonal a meredekségét. Ez alapján a keresett, átlagos sűrűségérték:

$$\rho_{\text{átl}} = - \frac{\rho_v g}{a p_0 V_{AB}} \quad (15)$$

Ezután a halmazsűrűség következik: a halomsűrűség számításakor a szemcsék térfogatán kívül a szemcsék közötti – általában levegővel kitöltött – térfogatot is figyelembe vesszük. Meghatározása az (1) egyenlet szerint történik.

Míg valamely szemcsés anyag sűrűsége állandó érték, halomsűrűsége az anyag konszolidációjával két szélső érték között változik.

A kiértékelés második része a porozitás (ε) meghatározása. Definíció szerint a porozitás – vagy relatív hézagtérfogat – a szemcsék közötti hézagtérfogatnak az össztérfogathoz viszonyított aránya:

$$\varepsilon = \frac{V_h}{V+V_h} \quad (16)$$

Ez nagymértékben függ a szemcsék alakjától, ill. az ágy mozgatójától. Ha különböző méretű és alakú, nem szabályosan rendezett szemcsehalmazról van szó, a porozitás csökkenhet, azonban, ha szálkás vagy kagyló alakú szemcsékből áll a halmaz, a porozitás növekedhet. Ugyancsak növeli a porozitást, ha vibrálással vagy fluidizálással bolygatjuk a szemcseágyat.

A porozitás meghatározásához vagy térfogatokat, vagy sűrűségeket kell mérnünk, hiszen a (16)-es összefüggés felírható sűrűségekkel is:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V}{V+V_h} = 1 - \frac{\frac{V}{m}}{\frac{V+V_h}{m}} = 1 - \frac{\frac{1}{\rho}}{\frac{1}{\rho_H}} = 1 - \frac{\rho_H}{\rho} \quad (17)$$

3 Jegyzőkönyv tartalmi követelményei

3.1 Számítások

- Adott tömegű minta sűrűségét (ρ)
- Átlagos sűrűséget lineáris regresszió alapján ($\rho_{\text{átl}}$)
- Halomsűrűséget (ρ_H)
- Az anyag porozitását az átlagos sűrűség és a halmazsűrűség alapján (ε)

3.2 Diagramok

- $m_i - \frac{1}{\Delta h_i}$ diagram

4 Jelölések jegyzéke

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
a	meredekség	kg/m

g	nehézségi gyorsulás; 9,81	m/s^2
h	a mérőcsőben a vízszint elmozdulása	m
m	az anyag tömege	kg
p	nyomás	bar
V	az anyag térfogata	m^3

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
ε	porozitás	1
ρ	sűrűség	kg/m^3

Indexek, kitevők

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
AB	a műszeren 'A' és 'B' jelek közötti érték
$\acute{a}lt.$	átlagos érték
i	általános futóindex (egész szám)
h	hézagterfogatra jellemző érték
H	halomsűrűségekre jellemző érték
v	vízre jellemző érték
0	üres mérőedényre vonatkoztatott érték

5 A felhasznált eszközök listája

1. táblázat. Mérés során felhasznált eszközök, berendezések, műszerek

Berendezés/mérőeszköz megnevezése	Gyártmány	Típus
1. mérőedény (vízhez)		~250 ml
2. mérőedény (anyaghoz)		mennyiségtől függ
vödör		~5 l
mérni kívánt anyag(ok)		
nyomásmérő		
mérleg		
hőmérő		
törőlapír vagy törülköző		

6 Mellékletek

Számításhoz szükséges adatok:

- Kompressziótartály belső átmérője: Ø40 mm
- 'A' és 'B' jelölések közti magasság: 96 mm
- Légköri nyomás: 101 300 Pa (ha nincs mérve nyomásmérővel)
- Víz sűrűsége: 1000 kg/m³ (ha nincs kiszámítva tömegből és térfogattól)

7 Magyar-angol szakkifejezések

A mérésben szereplő fontosabb szakkifejezések angol megfelelői.

átmérő	diameter	porozitás	porosity
kieresztési	to vent	pórus	pore
kompressziótartály	compression tank	sűrűség	density
mérés	measurement	szilárd anyag	soil
nehézségi gyorsulás	acceleration due to gravity	szelep	valve
nyomás	pressure	szemcseméret	grain size
		térfogat	volume
		tömeg	mass

8 Felhasznált irodalom

Fonyó Zs, Fábry Gy: Vegyipari művelettani alapismeretek, Nemzeti Tankönyvkiadó Rt., 2004

kkft.bme.hu. Szemcsés szilárd anyag porozitásának mérése, http://kkft.bme.hu/sites/default/files/Szemcses_szilard_anyag_porozitasanak_merese.pdf

Ha a segédlettel kapcsolatban kérdése, javaslata van, vagy esetleg hibát talált benne, kérjük mindenképpen jelezze a Tanszéken, vagy a poos.tibor@gpk.bme.hu e-mail címen.