

Fluidizáció

A fluidizáció mérés célja, hogy a hallgató a mérés elvégzése után **az alábbi tanulási eredményeket elérje:**

Minimum szint:

A hallgató

- képes egy félüzemi méretű készüléken eligazodni és a sematikus rajz alapján a mérőműszereket azonosítani
- rálátással rendelkezik a fluidizáció jelenségére, azonosítani tudja, hogy a mérés során mikor, melyik képletet felhasználva kell az oszlop nyomásesését meghatározni
- ismeri az összefüggést a töltött oszloprész magassága, a hézagterefogat és a hézagmentes töltetmagasság között
- ismeri és el tudja magyarázni a rotaméter és a mérőperem működési elvét
- kétfolyadékos differenciálmánométer számítását ismeri
- a mérés során a mérési adatokat jól dokumentáltan jegyzi fel és átlátható formában összesíti.
- mérési adatait más szakember számára érthető formában, a megfelelő egyenletek kiválasztásával és a mértékegységek helyes használatával értékeli ki és átlátható kivitelű jegyzőkönyvet készít.
- a számítási eredményeit összeveti a tapasztalati értékekkel és jelentős eltérés esetén keresi a hiba okát.

Optimális szint:

A hallgató

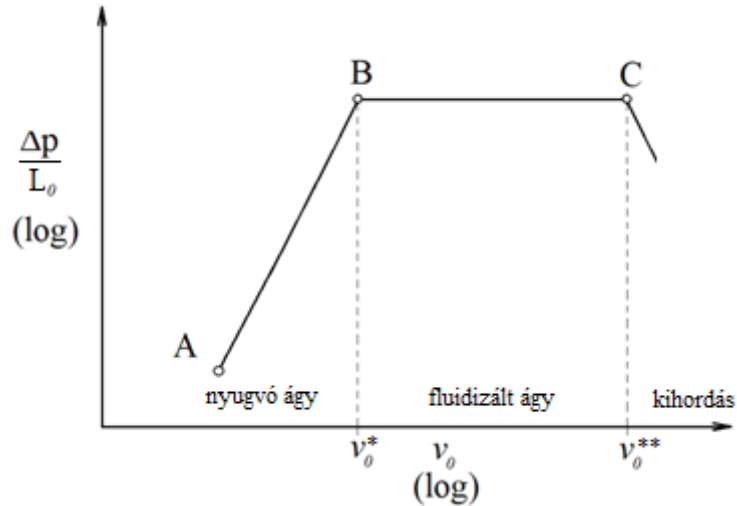
- az eredményeket összefüggéseiben, a gyakorlati tapasztalatai figyelembevételével értékeli, eltéréseket indokolja
- az értékelés során figyelembe veszi a mérőeszközök illetve a leolvasás „pontosságát”

A leiratban a felkészülést és a mélyebb megértést elősegítő *elgondolkodtató és ellenőrző kérdések zölddel vannak szedve.*

Elméleti összefoglalás

Fluidizáció során egy finom szemcséjű, porszerű szilárd anyagot alulról felfelé áramló fluidummal (gáz, folyadék) olyan lebegő állapotba hozunk és abban tartunk, amit a forrásban lévő folyadékhoz lehet leginkább hasonlítani. A fluidizáció nagyon intenzív érintkeztetést eredményez a szilárd és fluid fázis között. A fluidizáció tehát a töltött oszlopban történő áramlás egy speciális esete. A fluidizáció jelenségével a vegyiparban több helyen találkozhatunk. Példaként megemlítjük a fluidizációs szárítót, a fluidizációs pirit-pörkölőt, sőt több heterogén katalitikus reakció is fluidizált katalizátorszemcséken játszódik le.

Ha a töltött csőben áramló fluidum üres oszlopra vonatkoztatott áramlási sebességét (v_0) növeljük és közben mérjük a töltet nyomásesését, majd ezeket logaritmikus skálán ábrázoljuk, akkor - amennyiben a töltet felülről nincs ráccsal rögzítve - a következő görbét kapjuk [1]:



1. ábra

Az áramlási sebességet növelve a nyomásesés először a sebességgel arányosan növekszik, majd nagyobb áramlási sebességtartományban a sebesség kitevője fokozatosan növekedve eléri a 2 értéket, azaz a nyomásesés a sebesség négyzetével lesz arányos (turbulens tartomány). Az 1. ábrán az A és B pontok közötti szakaszon a nyugalomban lévő tölteten az áramlás turbulens, ezért a logaritmikus skálán ábrázolva az egyenes meredeksége 2. Amikor a sebesség növelésével elérjük a B pontot, az áramlási nyomásesés egyenlő lesz a rácsnyomással, a szemcsékre ható erők eredője zérus lesz, erőegyensúly alakul ki, a szemcsék lebegni kezdenek. Megkezdődik a fluidizáció.

A rácsnyomás a szemcsés réteg egységnyi rácsfelületre eső archimedesi súlya ([2] 102. old.):

$$\Delta p_r = L(1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho_f)g \quad (1)$$

ahol

L a fluidizált réteg magassága [m],

ε a fajlagos hézagtérfogat,

ρ_p a töltet sűrűsége [kg/m^3],

ρ_f a fluidum sűrűsége [kg/m^3].

A fajlagos hézagtérfogat definíciójából következik, hogy a töltet által elfoglalt oszlopmagasság, ha nem lenne hézag a szemcsék között, L_0 lenne (hézagmentes vagy redukált töltetmagasság).

$$L_0 = L(1 - \varepsilon) \quad (2)$$

Ez az érték állandó a fluidizáció során, tehát a nyomásesést egységnyi redukált töltetmagasságra is vonatkoztatjuk.

$$\frac{\Delta p_r}{L_0} = (\rho_p - \rho_f)g \quad (3)$$

Az áramlási nyomásesés a töltött oszlopok hidrodinamikai ellenállására levezetett összefüggés segítségével kiszámítható:

$$\frac{\Delta p}{L_0} = 4f_m \frac{1}{d_p} \frac{v_0^2 \rho_f}{2} \quad (4)$$

ahol v_0 az üres oszlopra vonatkoztatott áramlási sebesség, [m/s];

f_m a súrlódási tényező;

d_p a fluidizált részecskék átmérője, [m].

Az f_m súrlódási tényező értéke a Reynolds-szám függvénye, értéke nyugalomban lévő töltet esetén az $f_m Re_m^2 - Re_m$ diagramból határozható meg (2. ábra), ha ismerjük az áramlási sebességet és a relatív hézagterefogatot.

$$Re_m = \frac{d_p v_0 \rho_f}{\eta_f} \quad (5)$$

ahol η_f a fluidum dinamikai viszkozitása [Pas].

Az 1 ábrán a B pontnál a részecskék elválnak egymástól (megmozdulnak), és a fluidumban egyenként lebegnek. Ez a pont a fluidizáció kezdőpontja, az ehhez tartozó áramlási sebesség a kezdeti fluidizációs sebesség (v_0^*). Ha a sebességet tovább növeljük (B és C közötti szakasz), a fluid ágy kiterjed, L és ε növekszik, de a nyomásesés állandó marad.

Fluidizált állapotban tehát a részecskére ható erők egyensúlyban vannak, azaz az archimedesi súly egyenlő a közegellenállási erővel.

$$\frac{D^2 \pi}{4} L_0 (\rho_p - \rho_f) g = \frac{D^2 \pi}{4} L_0 4 f_m \frac{1}{d_p} \frac{v_0^2 \rho_f}{2} \quad (6)$$

ahol

D a fluidizációs cső belső átmérője, [m].

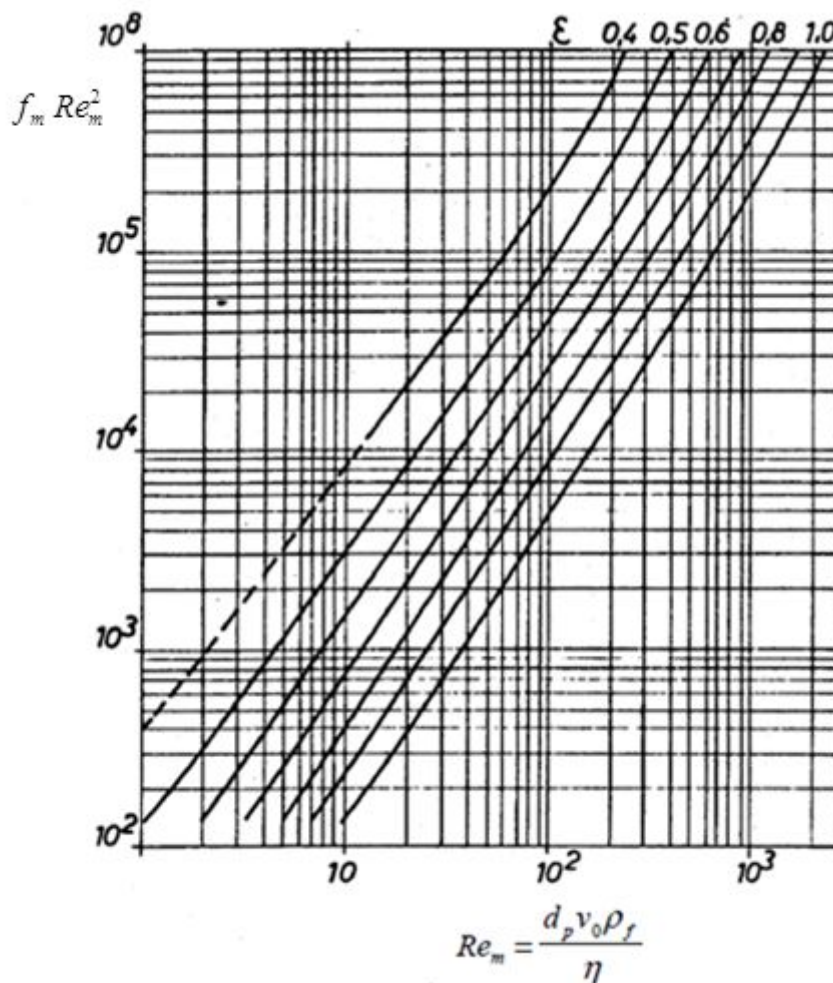
Az üres oszlopra vonatkoztatott v_0 áramlási sebességet a Reynolds-számból kifejezve és a (6) egyenlőségbe helyettesítve, átrendezés után megkapjuk $f_m Re_m^2$ kifejezését erőegyensúlyban (7), ez az érték nem függ a Reynolds számtól, csak a szemcseméret és a fluidum anyagi jellemzői határozzák meg értékét.

$$f_m Re_m^2 = \frac{d_p^3 (\rho_p - \rho_f) \rho_f g}{2 \eta^2} \quad (7)$$

Amikor a fellazulás eléri azt a mértéket (C pont az 1. ábrán), melynél már az egyes részecskék oly távol vannak egymástól, hogy a szemcse végtelen térben lebeg ($\varepsilon = 1$), elértük a kihordási sebességet (v_0^{**}). A sebességet tovább növelve valamennyi részecske távozik az oszlopból az áramló fluidummal együtt. Ideális esetben, ha nincs falhatás és a fluidum áramlási sebessége a teljes keresztmetszet mentén állandó, a C ponthoz tartozó áramlási sebesség megegyezik az egyedi test ülepedési határsebességével.

A fluidizáció kezdetéhez szükséges áramlási sebességet és a kihordási sebességet $f_m Re_m^2 - Re_m$ diagram segítségével határozhatjuk meg (2. ábra). A görbesereg paramétere a relatív hézagterefogat. A fenti diagram alapján a fluidum és a töltet tulajdonságainak ismeretében meghatározhatjuk a fluidizáció kezdetéhez szükséges Reynolds-számot és az ülepedési Reynolds-számot, amiből a kihordási sebesség (v_0^{**}) meghatározható. Gömb alakú töltet esetén a (7) egyenlettel számított $f_m Re_m^2$ értékhez és a 0,4-es relatív hézagterefogathoz tartozó pont x tengelyen vett vetülete a fluidizációhoz szükséges kezdeti Reynolds-szám, a számított $f_m Re_m^2$

értékhez és az 1-es relatív hézagterfogathoz tartozó pont x tengelyen vett vetülete pedig a kihordáshoz tartozó Reynolds-szám.



2. ábra

Ha fluidizált állapotban (erőegyensúlyban, vagyis a $Re_m^* < Re_m < Re_m^{**}$ tartományban) a nyomásesést a (4) egyenlettel akarjuk számítani, a számításához szükséges f_m érték a (7) összefüggésből határozhatjuk meg az adott Reynolds számhoz. Mivel erőegyensúlyban az áramlási nyomásesés megegyezik a rácsnyomással, és annak számítása sokkal egyszerűbb, ésszerűbb a (3) egyenlet használata.

Megjegyezzük, hogy nyugalomban lévő töltet áramlási nyomásesése az Ergun képlettel [2] is számítható, ha a relatív hézagterfogat nem haladja meg a 0,5 értéket.

$$\Delta p = v_0^2 \rho_f \left(\frac{L_0}{d_p} \right) \frac{1}{\varepsilon^3} \left[\frac{150(1-\varepsilon)}{Re_m} + 1,75 \right] \quad (8)$$

A fluidizáció gyakorlati alkalmazása

A fluidizált ágyaknak számos előnye van az álló ágyakkal szemben. Ha a töltet fluidizált állapotba kerül, folyadékhoz hasonlóan kezd viselkedni: a gázzal fluidizált szilárd anyag felszíne forró folyadékhoz hasonlít. A gázzal fluidizált ágyon lebegnek az ágynál kisebb

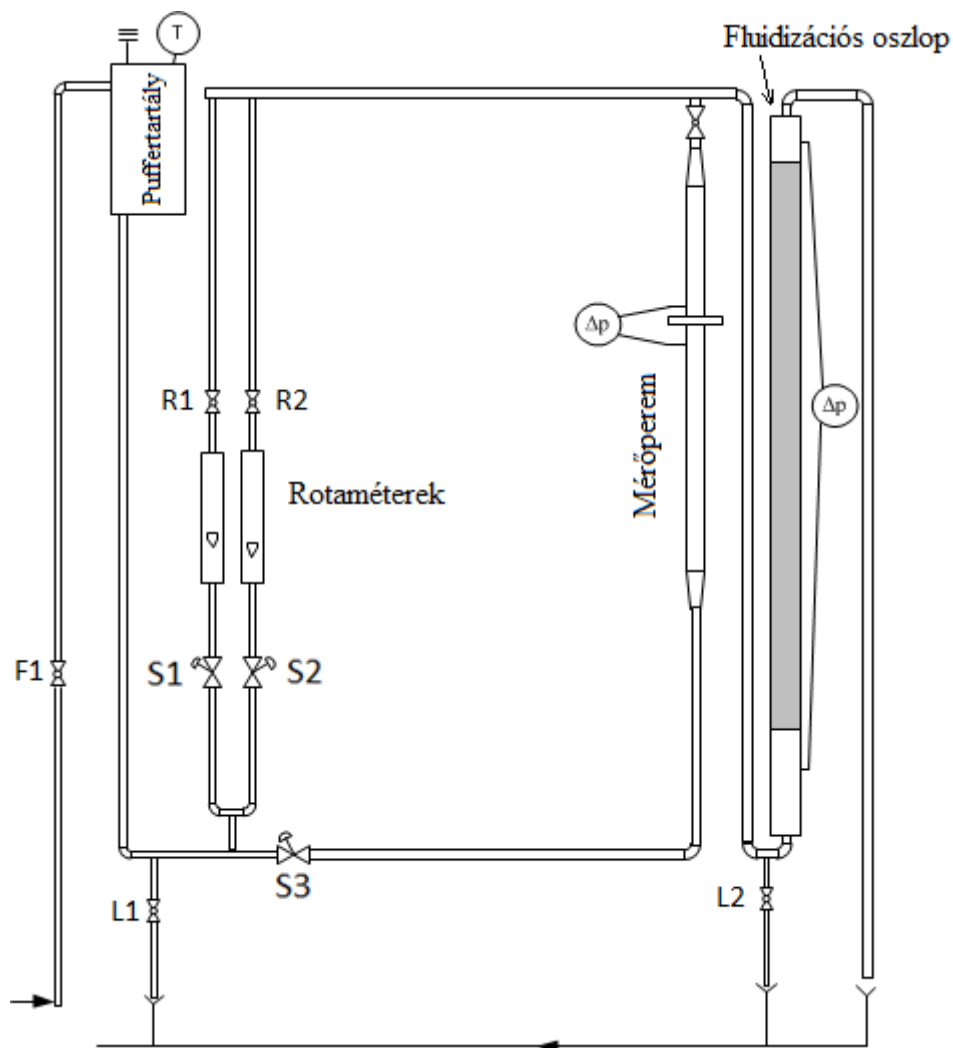
sűrűségű testek, a nagyobb sűrűségű testek pedig elsüllyednek. A fluidizált ágy folyadékszerű viselkedése lehetővé teszi, hogy a szilárd anyagot folyadékként kezeljük. Ily módon a szilárd anyag folyamatos adagolása és elvétele is lehetségessé válik.

A fluidizált ágy alkalmazásának nagy előnye az ágyon belüli szinte tökéletes keveredés, ami lehetővé teszi, hogy erősen exoterm vagy endoterm reakciónál is egyenletes hőmérséklet-eloszlást biztosítsunk. A kiváló keveredés miatt a szilárd-fluidum érintkeztetés is sokkal intenzívebb, mint álló ágyak esetén, ezért jobb hő- és anyagátadási tényezőkkel számolhatunk [1].

A fluidizáció legelterjedtebb alkalmazásai a gáz-szilárd fluidizációt alkalmazó rendszerek, például a kőolajiparban használt fluid katalitikus krakk (FCC), az élelmiszeriparban gyakran alkalmazott fluidizációs szárító és a szén égetésére kifejlesztett fluidizációs égetők. A folyadékkal fluidizált ágyak alkalmazásai közül érdemes megemlíteni a szennyvízkezelésnél alkalmazott fluidizált ágyas bioreaktort valamint a fluidizációs elektrolízist.

A mérés leírása

A mérőberendezés vázlatja a következő ábrán látható:



3. ábra

A fluidizáció jelenségét 54 mm belső átmérőjű plexi csőben tanulmányozzuk. A fluidizált töltet 3 mm átmérőjű üveggömbökből áll, amelyek sűrűsége 2500 kg/m^3 . A készülékben lévő töltet tömege 1 kg. A rotaméterek mérés határa 0-250 lit/h illetve 100-1000 lit/h. A mérőperem nagyobb átmérője (D) 5,1 cm, kisebb átmérője (d) 2 cm. A mérőperemen mért nyomásesésből a térfogatáram számítható. A laborgyakorlat során ezt a számítást nem kell elvégezni, a térfogatáramot (mérőperem esetén) kalibrációs diagram segítségével határozzák meg. A nyomásesés mérése az oszlopon és a mérőperemen kétfolyadékos differenciálmánométerrel történik, melyben a referenciafolyadék kloroform, sűrűségét a következő táblázat alapján számíthatjuk lineáris interpolációval (a referenciafolyadék hőmérséklete a labor hőmérsékletével egyenlő):

hőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$)	A referenciafolyadék sűrűsége (kg/m^3)
15	1498
20	1489
25	1480
30	1471

A mérés menete

1. Biztosítsuk, hogy az L1 és L2 csapok, valamint az S1, S2 és S3 szelepek zárt, az R1, R2 és a mérőperem után található csapok teljesen nyitott állapotban legyenek!
2. Nyissuk meg teljesen az F1 csapot!
3. Nyissuk meg lassan az S1 szelepet, és legalább 5 különböző rotaméter állásnál jegyezzük fel a térfogatáramot, a nyomásesést az oszlopon és az ágy magasságát!
4. Zárjuk az S1 szelepet, és ezzel egyidejűleg megnyitjuk az S2 szelepet, majd ismét legalább 5 különböző rotaméter állásnál jegyezzük fel a térfogatáramot, a nyomásesést az oszlopon és az ágy magasságát!
5. Amikor a térfogatáram megközelíti a 900 liter/órát (a fluidizált ágy magassága segít ebben), zárjuk az S2 szelepet és ezzel egyidejűleg megnyitjuk az S3 szelepet. Legalább 5 különböző nyomásesésnél jegyezzük fel a nyomásesést a mérőperemen, a nyomásesést az oszlopon és az ágy magasságát!
6. Biztosítsuk, hogy egyszerre mindig csak egy rotaméteren vagy mérőperemen haladjon át a teljes térfogatáram! A mérés során egyszer mérjük meg a víz hőmérsékletét és a laboratórium hőmérsékletét! Az egyes rotaméterek, illetve a mérőperem közötti váltás során a térfogatáramokat úgy változtassuk, hogy a vizsgált térfogatáramok között ne legyen átfedés az egyes mérőeszközök esetén.
7. A mérés végeztével zárjuk el az F1 csapot és az S3 szelepet!

A mérés kiértékelése

1. A töltet tömegének és sűrűségének ismeretében számítsuk ki a hézagmentes töltetmagasságot (L_0), a mért nyugalmi töltetmagasságból az $L_0 = L(1-\varepsilon)$ képlet alapján számítsuk ki a relatív hézagterfogatot!
2. A leolvasott hőmérséklet (egészre kerekítve) alapján határozzuk meg a víz sűrűségét, majd ennek felhasználásával minden mérési pontban határozzuk meg a manométeren mért szintkülönbségből az oszlop nyomásesését!

Az U csöves manométeren észlelt szintkülönbségből hogyan számítja ki a nyomáskülönbséget? Korábban milyen manométerrel találkozott és azt hogyan számolta? Vajon mi lehet az oka, hogy itt kétfolyadékos manométert alkalmaztunk?

3. A rotaméter, illetve a mérőperemen mért nyomásesések alapján határozzuk meg minden mérési pontra a térfogatáramot. (A mérőperemhez kalibrációs diagramot használnak.)

Fel tudna még sorolni térfogatáram mérésére alkalmas eszközt, módszert?

4. A térfogatáram adatokból számítsuk ki az üres oszlopra vonatkoztatott áramlási sebességet!
5. A mért ágymagasságokból L_0 ismeretében számítsuk ki minden mérési pontban a relatív hézagterfogatot!

Honnan, melyik mérési ponttól végzi el a számítást?

6. Ábrázoljuk diagramon az egységnyi hézagmentes töltetmagasságra vonatkoztatott nyomásesést ($\Delta p/L_0$) az üres oszlopra vonatkoztatott áramlási sebesség függvényében. Jelöljük a fluidizáció kezdetét, és olvassuk le az ehhez tartozó áramlási sebességet!

Milyen okai lehetnek a mért és számított értékek közötti eltérésnek?

7. Számoljuk ki a fluidizáció kezdetéhez szükséges áramlási sebességet az $f_m Re_m^2 - Re_m$ diagram segítségével. Hasonlítsuk össze ezeket az előző pontban leolvasott értékkel!
8. A fluidizációt megelőző mérési pontokban számítsuk ki a nyomásesést a (8) egyenlettel. Hasonlítsuk össze a mérési adatokkal!
9. A mért rácsnyomást hasonlítsuk össze a (1) egyenletből számított értékkel!
10. A kihordási sebességet (v_0^{**}) határozzuk meg az $f_m Re_m^2 - Re_m$ diagram segítségével!
11. Eredményeinket foglaljuk össze táblázatban!

Sor- szám	Mérő- eszköz	Rota- méter állítás [lit/h]	Mérőperem		W [lit/h]	v_0 [m/s]	L [m]	Töltet Δp					ε
			Δh [mm]	Δp [Pa]				mért			számított		
								Δh [mm]	Δp [Pa]	$\Delta p/L_0$ [Pa/m]	Δp [Pa]*	$\Delta p/L_0$ [Pa/m]*	mért L alapján**
1	Kisebb rotaméter												
2													
3													
4													
5													
6	Nagyobb rotaméter												
7													
8													
9													
10													
11	Mérőperem												
12													
13													
14													
15													

*Álló ágy esetén az (8) egyenlettel, fluidizált ágy esetén a (3) egyenlettel

** A (2) összefüggés segítségével

Kezdeti fluidizációs sebesség (v_0^*) [m/s]		Kihordási sebesség (v_0^{**}) [m/s]	
a mérési adatokból			
$f_m Re_m^2 - Re_m$ diagramról		$f_m Re_m^2 - Re_m$ diagramról	

Nyomásesések összehasonlítása		
mért rácsnyomás		Pa
számított rácsnyomás		Pa
relatív hiba		%

Irodalom

- [1] Wen-Ching Yang: Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems, Routledge, 2003
[2] Fonyó Zs., Fábry Gy.: Vegyipari művelettani alapismeretek, Nemzeti Tankönyvkiadó, 2004
[3] Tanszéki munkaközösség: Vegyipari fülüzemi praktikum, (átdolgozott kiadás), Egyetemi jegyzet, 65029, Műegyetemi Kiadó, 2000

A leíratot Kató Zoltán TDK dolgozata és a tanszéki munkaközösség korábbi munkái felhasználásával készítette:

Angyalné Koczka Katalin

Ellenőrizte: Csikor Zsolt

Kőrösi Márton

Melléklet: a víz sűrűsége és dinamikai viszkozitása a hőmérséklet függvényében

Hőmérséklet (°C)	Sűrűség (kg/m ³)	Viszkozitás (Pas)
8	999,85	0,0013663
10	999,70	0,0013077
12	999,50	0,0012337
14	999,25	0,0011699
16	998,95	0,0011093
18	998,60	0,0010339
20	998,21	0,0010027
22	997,77	0,0009553
24	997,30	0,0009113
26	996,79	0,0008708
28	996,24	0,0008330
30	995,65	0,0007977

Mérőcsoport: 1. 2. 3. 4.	Fluidizáció	Tankörvezető:
--------------------------------------	--------------------	---------------

Mérési adatok

A labor hőmérséklete: °C

A víz hőmérséklete: °C

Nyugalmi töltetmagasság: cm

Sorszám	Mérő- eszköz	Rotaméter állás [lit/h]	Mérőperem manométere		Az oszlop manométere		Ágymagasság [cm]
			h ₂ [mm]	h ₁ [mm]	h ₂ [mm]	h ₁ [mm]	
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							