

ROTAMÉTER VIZSGÁLATA

2011.02.14.

1. Bevezetés

A rotaméter az áramlási mennyiségmérők egyik fajtája. A rotamétert egyaránt lehet áramló folyadékok és gázok térfogatáramának mérésére használni, mégpedig kis (labor) méretektől ipari méretekig (10^{-8} m³/s-tól 3 m³/s-ig).

A rotaméter felfelé bővülő kör keresztmetszetű, skálabeosztással ellátott üveg-, néha fémcső, amelyben hengeres úszó van. A fluidum a csőben alulról felfelé áramlik, melynek hatására az úszó felemelkedik a rotamétercsőben. Az emelkedés mértéke függ a fluidum térfogatáramától.

A rotaméterről közvetlenül skálárész adatot lehet leolvasni, amely adat kalibrációt követően a fluidum térfogatáramának megállapítására használható. A kalibráció (térfogatáram – skálárész összefüggés) függ a rotaméteren keresztül áramló fluidum minőségétől, és annak hőmérsékletétől is (gázok esetében pedig annak nyomásától is).

Ha a célunk a rotaméter egy bizonyos fluidumra történő kalibrálása, akkor az könnyen elvégezhető az adott fluidum segítségével. Különböző térfogatáramokat beállítva le kell olvasni az úszó állását a rotaméterben, és meg kell határozni az ezekhez tartozó térfogatáramokat pl. köbözés segítségével.

Ha viszont a fluidum veszélyes vagy kényes, akkor célszerű a rotaméter kalibrálását valamilyen más fluidummal, pl. vízzel vagy levegővel elvégezni. Ezután a rotaméter más fluidumra is kalibrálható a mért értékek átszámításával. Az átszámítás megértéséhez szükség van az ülepedő részecskék dinamikájának megértésére.

1.1. Végtelen térben ülepedő részecske

A rotaméter működése egyetlen „részecske”, az úszó ülepedésén, illetve lebegtetésén alapszik. Egy ülepedő részecskére három erő hat: a lefelé irányuló gravitációs erő, a felfelé irányuló felhajtó erő és a (fluidum felfelé áramoltatása miatt) szintén felfelé irányuló közegellenállási erő. A részecske nyugvó fluidumban állandó sebességgel ülepszik, ha a rá ható erők kiegyenlítik egymást. Analóg módon, ha a fluidumot alulról felfelé a részecske ülepedési sebességével egyenlő sebességgel áramoltatjuk, és a részecskére ható erők kiegyenlítik egymást, akkor a részecske a lebeg.

A közegellenállás itt nem csősúrlódást, hanem a fluidumnak a részecske normálfelületéhez való ütközését és az oldalán való súrlódását jelenti. A rotamétercső fala abszolút sima, köszörült üveg-, vagy fémfelület, az azon történő súrlódási ellenállás a részecske által okozott ellenálláshoz képest elhanyagolható.

A részecske (jelen esetben az úszó) az alulról felfelé áramló fluidumban lebeg, ha a rá ható erők kiegyenlítik egymást:

$$\text{gravitációs erő} - \text{felhajtó erő} = \text{közegellenállási erő} \quad (1)$$

$$V_p \cdot \rho_p \cdot g - V_p \cdot \rho_f \cdot g = C_D \cdot A_{p,\perp} \cdot \frac{v^2 \cdot \rho_f}{2} \quad (2)$$

| | | | |
|------|----------|-----------------------|----------------------|
| ahol | V_p | a részecske térfogata | [m ³] |
| | ρ_p | a részecske sűrűsége | [kg/m ³] |

| | | |
|---------------|----------------------------|----------------------|
| ρ_f | a fluidum sűrűsége | [kg/m ³] |
| C_D | közegellenállási tényező | [-] |
| $A_{p,\perp}$ | a részecske normálfelülete | [m ²] |
| v | fluidum lineáris sebessége | [m/s] |

A (2) egyenletet átrendezve kifejezhetjük a fluidum lineáris sebességét, ami egyben a részecske ülepedési sebessége is:

$$v = \frac{1}{\sqrt{C_D}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_p \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g}{A_{p,\perp} \cdot \rho_f}} \quad (3)$$

A lineáris sebességet beszorozva az áramlási keresztmetszettel megkapjuk a fluidum térfogatáramát:

$$\dot{V} = (A_{cs\sigma} - A_{p,\perp}) \cdot v \quad (4)$$

ahol $A_{cs\sigma}$ a rotamétercső keresztmetszete az úszó aktuális helyzetében [m²]

A (3) egyenletet a (4) egyenletbe helyettesítve:

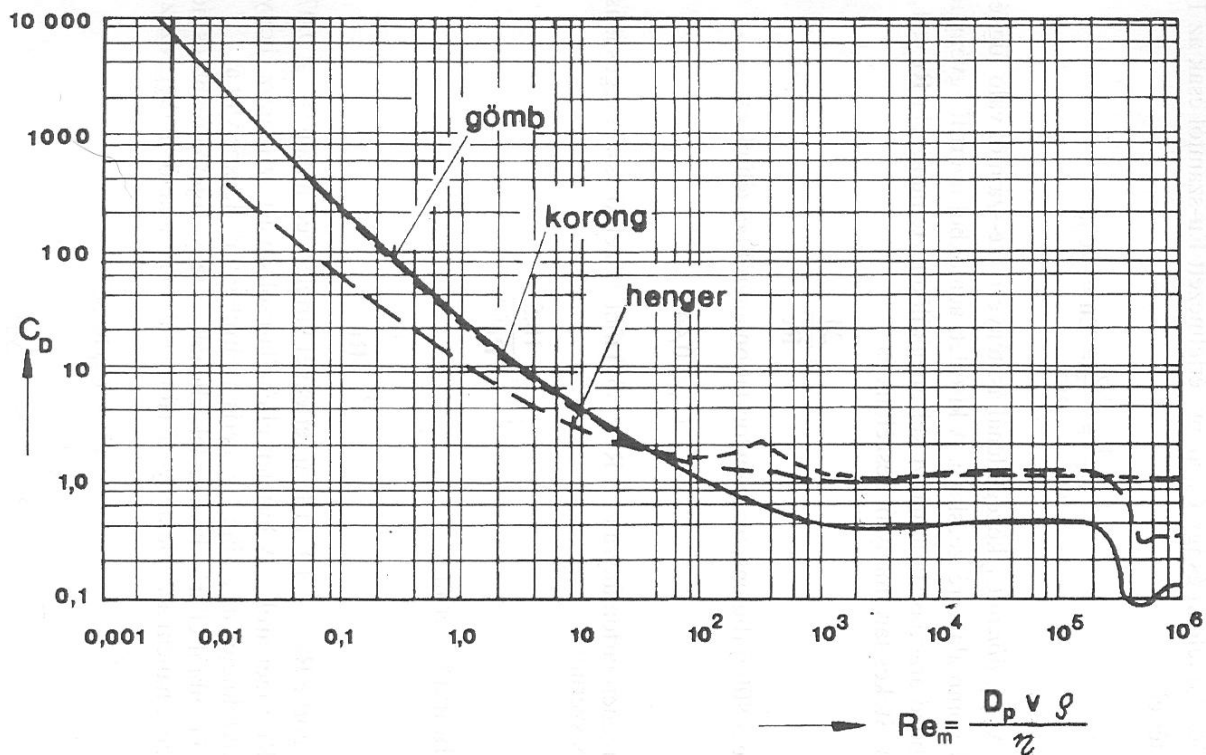
$$\dot{V} = (A_{cs\sigma} - A_{p,\perp}) \cdot \frac{1}{\sqrt{C_D}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_p \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g}{A_{p,\perp} \cdot \rho_f}} \quad (5)$$

Mivel az úszó súlya azonos fluidumban állandó, mellette a fluidum lineáris sebességének is állandónak kell lennie lebegés esetén. Ha a fluidum térfogatárama megnő, az állandó lineáris sebesség feltétele csak akkor teljesül, ha az úszó felemelkedik, mert ekkor az áramlási keresztmetszet (a rotamétercső és az úszó közötti körgyűrű területe) nagyobb lesz.

Általánosan, a C_D értéke a módosított Reynolds-számtól függ, lásd 1. ábra. A módosított Reynolds-szám esetén a jellemző méret helyébe a részecske átmérőjét helyettesítjük be:

$$Re_m = \frac{D_p \cdot v \cdot \rho_f}{\eta_f} \quad (6)$$

A (6) egyenletből látható, hogy Re_m értéke adott úszó és fluidum esetében csak a részecske ülepedési sebességétől függ. Az ülepedési sebesség azonban adott részecske/fluidum esetében állandó érték. Ha Re_m állandó, akkor C_D közegellenállási tényező is állandó, azaz C_D a rotaméter egyedi konstansa, ami az úszó alakjától és a fluidum minőségétől függ.



1. ábra C_D közegellenállási tényező értéke a módosított Reynolds-szám függvényében

A (2) egyenletből a részecske által okozott nyomásesés is kifejezhető. A nyomás az egységnyi felületre eső erő nagysága. Tehát jelen esetben a nyomásesést a közegellenállási erő egységnyi részecske normálfelületre eső értéke adja:

$$\Delta p = \frac{F_{\text{közegellenállás}}}{A_{p,\perp}} = C_D \cdot \frac{v^2 \cdot \rho_f}{2} \quad (7)$$

A részecske által okozott nyomásesés kifejezhető továbbá az ülepedő részecske súlyából, vagyis az (1) egyenlet bal oldalából:

$$\Delta p = \frac{V_p \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g}{A_{p,\perp}} \quad (8)$$

1.2. Falhatás

A fenti egyenletek csak arra az esetre vonatkoznak, amire kikísérletezték, azaz határtalan térben ülepedő testre. A rotaméter úszója (mint ülepedő test) nem határtalan fluidumban „ülepszik”, hanem a rotamétercső által határolt igen szűk térben. Az emiatt fellépő falhatás következtében a fenti C_D közegellenállási tényező módosul, mégpedig annál jobban, minél inkább „határolt a tér”. Azaz a rotamétercső aljában nagyobb a falhatás mint a tetején. Ha a rotaméter megfelelően magas lenne, és a rotamétercső eléggé kitágulna, akkor bizonyos magasságban a helyzet megközelítené a határtalan térben ülepedés esetét.

A falhatás figyelembe vétele miatt a C_D közegellenállási tényezőt nem a módosított Reynolds-szám, hanem a Reynolds-szám függvényében célszerű kifejezni:

$$Re = \frac{D_e \cdot v \cdot \rho_f}{\eta_f} \quad (9)$$

ahol D_e az egyenérték csőátmérő [m]

Rotaméter esetén az egyenérték csőátmérő:

$$D_e = 4 \cdot \frac{A}{K} = 4 \cdot \frac{A_{cső} - A_{úszó, \perp}}{K_{cső} + K_{úszó}} = 4 \cdot \frac{\frac{D_{cső}^2 \cdot \pi}{4} - \frac{D_{úszó}^2 \cdot \pi}{4}}{D_{cső} \cdot \pi + D_{úszó} \cdot \pi} = D_{cső} - D_{úszó} \quad (10)$$

ahol A áramlási keresztmetszet [m²]

K nedvesített kerület [m]

$D_{cső}$ a rotamétercső átmérője az úszó aktuális helyzetében [m]

$D_{úszó}$ az úszó átmérője [m]

A (10) és a (3) egyenletet a (9) egyenletbe helyettesítve megkapjuk a Reynolds-szám kifejezését a rotaméter esetén:

$$Re = \frac{(D_{cső} - D_{úszó}) \cdot v \cdot \rho_f}{\eta_f} = \frac{(D_{cső} - D_{úszó}) \cdot \frac{1}{\sqrt{C_D}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_p \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g}{A_{p, \perp} \cdot \rho_f}} \cdot \rho_f}{\eta_f} \quad (11)$$

Vegyük észre, hogy a Re szám értéke függ az úszó helyzetétől, és mivel $C_D = f(Re)$, ezért a közegellenállási tényező értékei is függ az úszó helyzetétől.

A Re_m és Re közötti összefüggést az alábbi egyenlet mutatja.

$$Re = Re_m \cdot \left(\frac{D_{cső}}{D_{úszó}} - 1 \right) \quad (12)$$

Tekintettel (12)-re látható, hogy Re értéke csak igen nagy térfogatáramoknál, azaz igen magas úszóállásnál közelíti meg Re_m (állandó) értékét, amiből adódik, hogy C_D értéke is csak ezen áramlási tartományban lesz állandó.

1.3. Kalibráció

A kalibráció célja a rotaméteren átáramló fluidum térfogatárama és az úszó állása közötti kapcsolat kísérleti meghatározása. A kimért összefüggés csak a kísérleti körülmények között igaz, a fluidum cseréje esetén a kalibrációt át kell számolni. Ehhez egy a felfelé is figyelembe vevő, a rotaméterre és az adott úszóra jellemző ülepedési diagramot kell készíteni, amely később felhasználható arra, hogy a mérnök a kalibrációs diagramot a kísérletétől eltérő körülmények között is alkalmazható legyen.

A mért térfogatáram és rotaméter skálárész értékek alapján a rotaméter geometriájának ismeretében a (4) egyenlet segítségével kiszámítható a méréshez használt fluidum sebessége.

A (3) egyenlet alapján a geometriai adatok és a fluidum jellemzőinek ismeretében minden mérési pontban kiszámítható az $\frac{1}{\sqrt{C_D}}$ kifejezés értéke. Az alábbi egyenlet segítségével pedig minden mérési pontban kiszámítható a $Re \cdot \sqrt{C_D}$ kifejezés értéke:

$$Re \cdot \sqrt{C_D} = \frac{(D_{cső} - D_{úszó}) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_p \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g}{A_{p,\perp} \cdot \rho_f}} \cdot \rho_f}{\eta_f} \quad (13)$$

Az így kapott $Re \cdot \sqrt{C_D} - \frac{1}{\sqrt{C_D}}$ értékpárokat diagramban ábrázolva egy, a rotaméterre jellemző kalibrációs diagramot kapunk. Ezen diagram segítségével más fluidumra is kiszámíthatóak összetartozó térfogatáram – rotaméter skálarész értékpárok.

Egy adott rotaméter skálarészhez a rotaméter és az úszó geometriai adatai, valamint az új fluidum jellemzőinek ismeretében a (13) segítségével kiszámítható $Re \cdot \sqrt{C_D}$ értéke. Az ezen értékhez tartozó $\frac{1}{\sqrt{C_D}}$ értéke leolvasható az előző lépésben előállított $Re \cdot \sqrt{C_D} - \frac{1}{\sqrt{C_D}}$ diagramból. $\frac{1}{\sqrt{C_D}}$ ismeretében már számítható a fluidum sebessége, illetve térfogatárama a (3), illetve az (5) egyenlet segítségével.

Ajánlott irodalom

Fonyó Zs., Fábry Gy.: Vegyipari Művelettani alapismeretek, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1998. pp 88-92.

2. Berendezés leírása

A berendezés felépítése a 2. ábrán látható. Az 1 szivattyú a 7 tartályból a 2 hőcserélőn keresztül a 3 túlfolyóval ellátott tartályba nyomja a vizsgálandó folyadékot. A túlfolyó miatt a folyadék térfogatárama állandó értéken tartható.

A rotaméteren átfolyó folyadék térfogatárama a 9, illetve 10 szelepek segítségével szabályozható, és a 4 lengőcsapon keresztül az 5 vagy 6 kalibrált mérőedényben mérhető. A mérőedényekből a folyadék a 8 átmenő csapokon keresztül a 7 tartályba folyik vissza.

Az áramoltatott folyadékot előírt hőmérsékleten való tartására szolgál a 2 cső a csőben hőcserélő, melyben víz áramoltatható. A termosztáló víz hőmérsékletének beállítása a 14 keverőedényben csapvíz gőzzel való keverésével lehetséges. A rotaméteren átáramló folyadék hőmérséklete a 15 hőmérővel mérhető.

A rotaméteren fellépő nyomásesés mérésére a 13 differenciál manométer van bekötve. A manométer folyadéka vízzel nem elegyedő szerves oldószer. Az így mért nyomásesés természetesen nem egyezik meg a (7) egyenletből számítható nyomáseséssel, mivel a mért nyomásesés a csatlakozó szerelvények nyomásesését is magában foglalja. Ennek pontos meghatározására egy külön mérősortozatot kellene végezni úszó nélkül, és minden pontban a

két nyomásesés különbsége adná az úszón fellépő nyomásesést. Az úszón fellépő nyomásesés meghatározásának másik módja, a mért nyomásesés ábrázolása a térfogatáram függvényében. Ez nulla mennyiségre extrapolálva megadja az úszón fellépő nyomásesést, mivel határértékben nulla sebességnél a szerelvényeknek nincs nyomásesése.

3. Mérés menete

Kapcsolja be a szivattyú motorját, és várja meg, hogy a túlfolyó edény megteljen. Jegyezze fel a keringetett víz hőmérsékletét! A szabályozó szelepek segítségével állítson be egy tetszőleges térfogatáramot: az úszó álljon a rotaméter valamelyik skálarészénél. Az így beállított skálarészénél mérje meg a kalibrált edényben 3000 cm^3 folyadék átfolyásához szükséges időt! A mérés közben jegyezze fel a manométeren leolvasható értékeket!

Legalább 6 különböző térfogatáramnál végezzen méréseket, úgy hogy azok a 100-400 skálarész-tartományt egyenletesen lefedjék. Az egyes térfogatáramoknál 2-2 köbözést kell végezni, és az adatok kiértékelése során az átlagolt értékekkel kell számolni.

A mérést két különböző fluidum hőmérséklet mellett kell elvégezni.

3.1. Kiértékelés

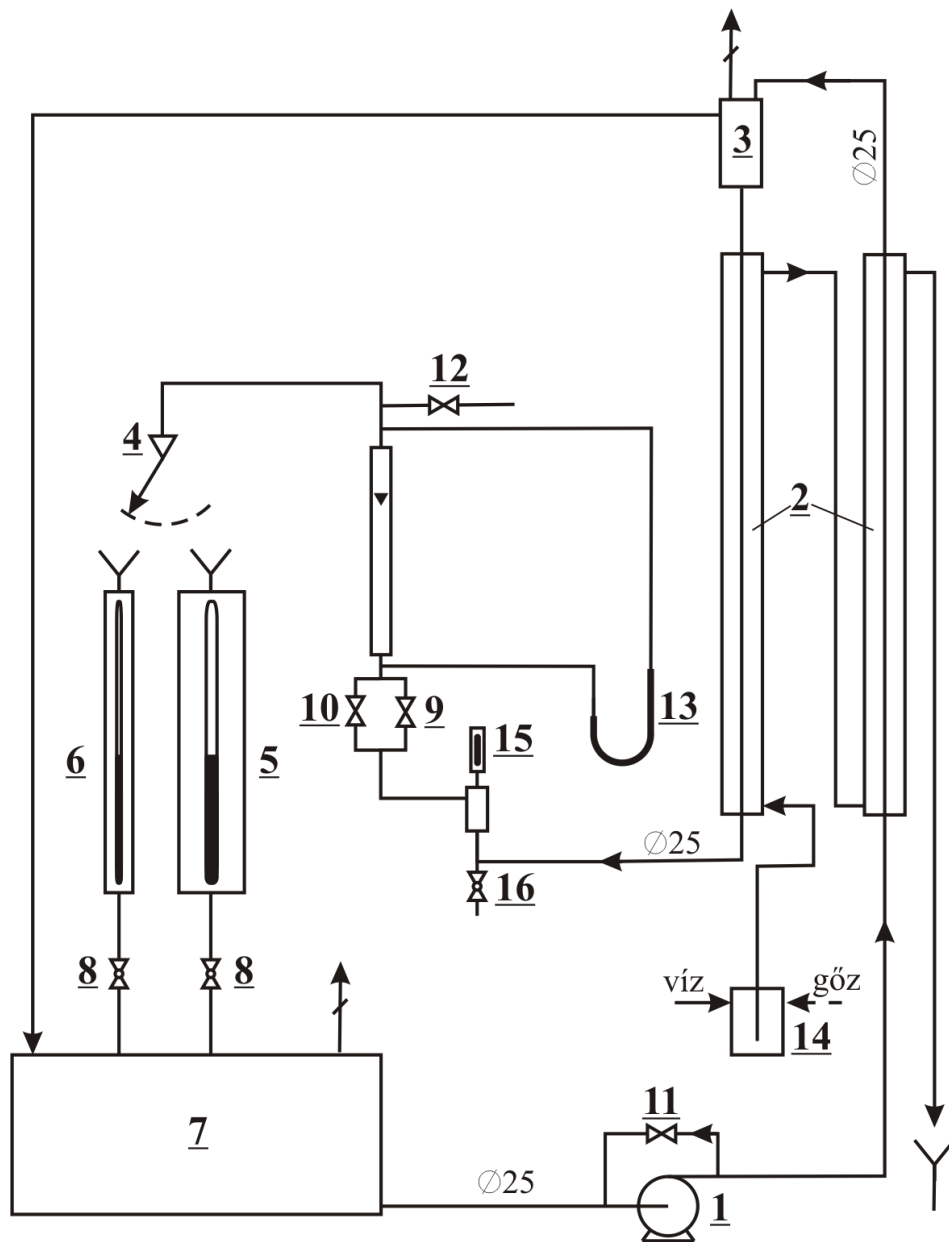
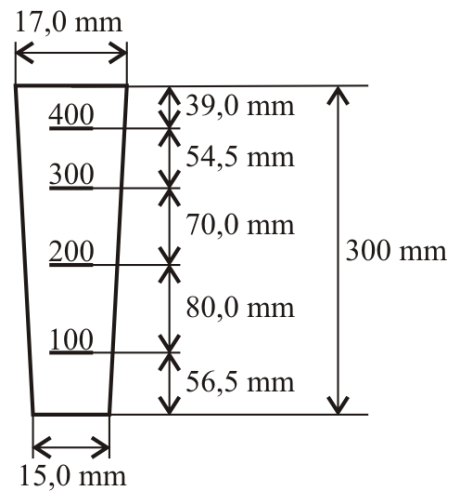
Az egyes térfogatáramokhoz tartozó köbözési adatokat átlagolása után ábrázolja az úszó állását (skálarész) a térfogatáram függvényében.

Az (5) egyenlet átrendezésével az $\frac{1}{\sqrt{C_D}}$, ill. az (13) egyenlet alapján a $\text{Re}\sqrt{C_D}$ értékei

kiszámíthatók a mért térfogatáramokhoz. A két adatsort egymás függvényében ábrázolva elkészíthető a rotaméter fluidum-független kalibrációs görbéje.

Az áramlási nyomásesés mértéke megállapítható a manométeren leolvasott szintkülönbségek segítségével. A számított nyomásesést ábrázolva a térfogatáram függvényében, és az így kapott görbét nulla térfogatáramra extrapolálva megállapítható az úszó nyomásesése a mérési adatokból. Ez a nyomásesés adat összehasonlítható a (8) egyenlet alapján számítható nyomáseséssel.

| Sz. | Megnevezés | Méret |
|-----|----------------------|-------------|
| 1 | Szivattyú | |
| 2 | Hőcserélő | |
| 3 | Túlfolyó edény | Ø200 × 700 |
| 4 | Lengő csap | |
| 5 | Mérőedény | Ø280 × 1000 |
| 6 | Mérőedény | Ø80 × 1000 |
| 7 | Fekvő hengeres edény | Ø450 × 1000 |
| 8 | Átmenő csap | Ø25 |
| 9 | Finom szab. szelep | Ø25 |
| 10 | Szabályozó szelep | Ø25 |
| 11 | By-pass szelep | Ø25 |
| 12 | Elzáró szelep | Ø25 |
| 13 | Manométer | |
| 14 | Keverő edény | |
| 15 | Hőmérő | |
| 16 | Átmenő csap | |



2. ábra Mérési berendezés és a rotamétercső méretei

3.1. Beadandó

1. Mérési jegyzőkönyv.
2. A fluidum térfogatárama a rotaméter skálarész függvényében ábrázolva.
3. A $\frac{1}{\sqrt{C_D}}$ értékek $Re \cdot \sqrt{C_D}$ értékek függvényében ábrázolva
4. A mért nyomásesés értékek a térfogatáram függvényében ábrázolva; az extrapolációval meghatározott nyomásesés és a számított nyomásesés.
5. Észrevételek.

Megjegyzések

A rotamétercső l magasságában a $D_{cső}$ rotaméter csőátmérő az alábbi képlettel számítható:

$$D_{cső}(l) = D_{cső,1} + m \cdot l \quad (14)$$

Ahol m értéke az L hosszúságú (magasságú) rotamétercső alján és tetején mérhető $D_{cső,1}$ és $D_{cső,2}$ átmérőkből számítható:

$$m = \frac{D_{cső,2} - D_{cső,1}}{L} \quad (15)$$

A rotaméter nyomásesése a manométerfolyadék szintkülönbségéből az alábbi módon számítható

$$\Delta p = (\rho_{kloroform} - \rho_f) \cdot g \cdot \Delta h \quad (16)$$

Ahol Δh a mért szintkülönbség a manométer két szárában.

4. Mérési jegyzőkönyv

Úszó méretei

$$D_{\text{úszó}} = \text{cm}$$

$$A_{\text{úszó},\perp} = \text{cm}^2$$

$$m_{\text{úszó}} = \text{g}$$

$$\rho_{\text{úszó}} = \text{kg/m}^3$$

Mérendő közeg

$$T_f = \text{°C}$$

$$\rho_f = \text{kg/m}^3$$

$$\eta_f = \text{Pas}$$

Manométerfolyadék

$$\rho_m = \text{kg/m}^3$$

| Skálarész | $V_f [\text{cm}^3]$ | $t [\text{min:sec}]$ | manométer | |
|-----------|---------------------|----------------------|-------------------|-------------------|
| | | | $h_1 [\text{mm}]$ | $h_2 [\text{mm}]$ |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |