

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
KÖZLEKEDÉSMÉRNÖKI KAR
REPÜLŐGÉPEK ÉS HAJÓK TANSZÉK

Hő- és áramlástan II.

(BMEKORHA195)

Laboratóriumi gyakorlatok jegyzet

Ez a jegyzet a korábban használt **HŐ- ÉS ÁRAMLÁSTECHNIKA 1. Laboratóriumi gyakorlatok** című segédlet átdolgozott, aktualizált változata. A jegyzet átdolgozásában segítettek a tárgyat oktató tanszéki dolgozók.

Szerkesztette:
György Dávid Gábor
Jankovics István
Gál István

Kiadva:
2023. szeptember 20.



H5. Hőszugárzás vizsgálata

1. A mérés célja

A mérés célja különböző finomságú sugárzó felületek feketeségi fokának összehasonlítása.

2. A méréshez áttanulmányozandó anyag

Műszaki Hő- és Áramlástan II. 17.51. és 17.52 fejezetek (235-252. o.).

3. A mérés leírása

3.1. Elvi alapok

Valamely test sugárzóképeségén a felületegységen időegység alatt kibocsátott energiát értjük:

$$E = \frac{\dot{Q}}{A} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Az abszolút fekete test sugárzóképesége a Stephan-Boltzmann törvény szerint:

$$E_0 = c_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

ahol $c_0 = 5,67 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$.

Egy tetszőleges test sugárzóképesége és az ugyanolyan hőmérsékletű fekete test sugárzóképeségének hányadosa a feketeségi fok:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0}$$

melyből következik, hogy a szürke test sugárzóképesége

$$E = \varepsilon \cdot E_0$$

Az egész test által időegység alatt kibocsátott energia

$$\dot{Q} = E \cdot A = \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 \cdot A$$

ahol A a sugárzó test névleges felülete.

3.2. A mérőberendezés és a mérés ismertetése

A mérőberendezés kialakítását a H5.1. ábra szemlélteti. Az 1, illetve 2 jelű, függőleges helyzetű sugárzó lapok (átalakított villamos főzőlapok) egyike sima, a másik érdes felületű. Elhelyezésük olyan, hogy a kialakuló szabad konvekció a két lapnál hasonló legyen.

Mindkét lap közepén azonos módon beépített (3, 4) hőelem van, a sugárzó felület hőmérsékletének érzékelésére. A hőmérsékletek megjelenítésére [°C] mérőhely átkapcsolóval (5) vezérelt digitális kijelző műszert (6) alkalmazunk.

A sugárzó lapok hőmérséklete a fűtőáramkörbe épített toroid transzformátorokkal (7, 8) szabályozható, az időegység alatt bevezetett energia szintén mérőhely átkapcsoló (9) után elhelyezett teljesítménymérővel (10) mérhető.

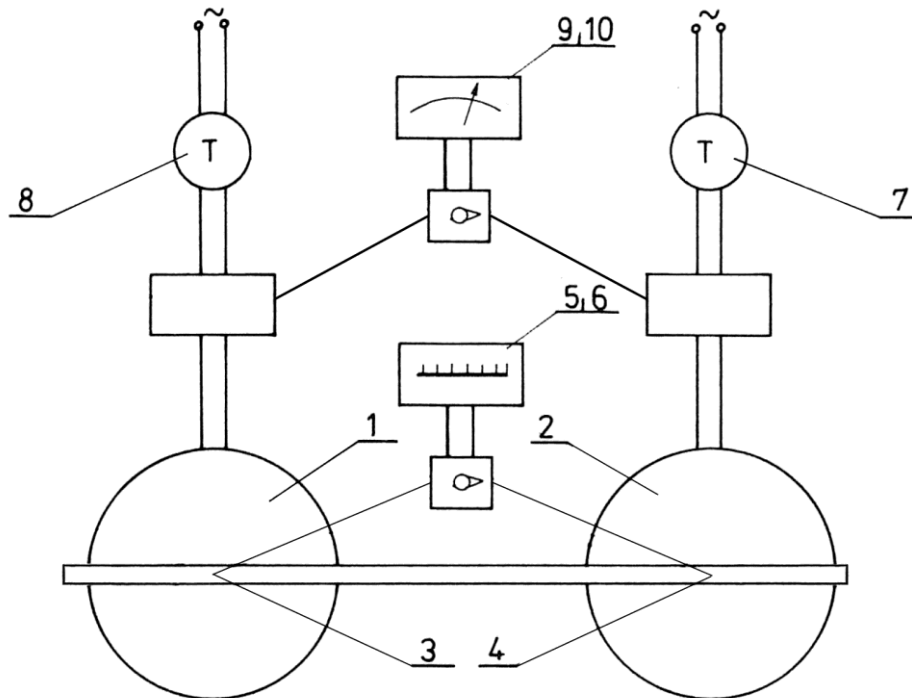
A sugárzó lapok hátsó felülete szigetelt, így a bevezetett energia döntő hányada a függőleges, kör alakú sugárzó felületen és az ahhoz csatlakozó rövid hengerpalást felületen távozik sugárzás és hőátadás útján.



A berendezés bekapcsolása után a toroid transzformátorok forgatógombját elforgatva mindkét lap esetében azonos – először 100W – fűtőteljesítményt állítunk be.

Megvárjuk az állandósult üzemmód kialakulását (amikor a felületek hőmérséklete időben nem változik), majd a hőmérséklet kijelzőn a mérőhely átkapcsoló használatával leolvassuk a felületek hőmérsékletét. Ezután a megjelölt teljesítményértékeknél (200W, 300W, 400W, 500W) a műveletet megismételjük.

A felfűtési folyamat gyorsítható, amennyiben a folyamat elején nagyobb fűtési teljesítményt alkalmazunk, majd egy közbenső hőmérséklet érték elérése után állunk vissza a vizsgálandó teljesítményre.



H5.1. ábra

4. Értékelés

Az időegység alatt bevezetett energia (mért teljesítmény) egy része szabad konvekció útján jut a környezetbe, ezért a

$$\dot{Q}_1 = \varepsilon_1 \cdot c_0 \cdot A \cdot \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \quad (1)$$

$$\dot{Q}_2 = \varepsilon_2 \cdot c_0 \cdot A \cdot \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \quad (2)$$

egyenletek csak a hőátadással átszarmaztatott hőmennyiségek elhanyagolásával volnának helytállóak.

Ezen pontatlanság kiküszöbölése céljából tekintsük úgy, hogy a bevezetett elektromos teljesítmény teljes egészében sugárzás formájában távozik a lapokból. Az (1) és (2) egyenletekből határozzuk meg az így értelmezett *fiktív* feketeségi fokok értékét:

$$\varepsilon_1' = \frac{\dot{Q}_1}{c_0 \cdot A} \cdot \left(\frac{100}{T_1} \right)^4$$



$$\varepsilon_2' = \frac{\dot{Q}_2}{c_0 \cdot A} \cdot \left(\frac{100}{T_2} \right)^4$$

Vezessük be a következő jelöléseket:

Teljesítmény (W)	Fiktív feketeségi fok (-)		Hőmérséklet (K)	
	1. lap	2. lap	1. lap	2. lap
100W	ε'_{11}	ε'_{21}	T_{11}	T_{21}
200W	ε'_{12}	ε'_{22}	T_{12}	T_{22}
300W	ε'_{13}	ε'_{23}	T_{13}	T_{23}
400W	ε'_{14}	ε'_{24}	T_{14}	T_{24}
500W	ε'_{15}	ε'_{25}	T_{15}	T_{25}

H5.1. táblázat

Képezzük rendre az

$$\frac{\varepsilon'_{1j}}{\varepsilon'_{25}} = \frac{\dot{Q}_j}{\dot{Q}_5} \cdot \left(\frac{T_{25}}{T_{1j}} \right)^4$$

$$\frac{\varepsilon'_{2j}}{\varepsilon'_{15}} = \frac{\dot{Q}_j}{\dot{Q}_5} \cdot \left(\frac{T_{15}}{T_{2j}} \right)^4, \quad j = 1 \dots 5$$

hányadosokat. Így felépíthetők az $\frac{\varepsilon'_{1j}}{\varepsilon'_{25}} = f_1(T)$ és $\frac{\varepsilon'_{2j}}{\varepsilon'_{15}} = f_2(T)$ (3)

függvények.

A szabad konvekció $T=T_{\text{környezet}}$ esetén szűnik meg, ezért grafikus vagy numerikus extrapolációval határozzuk meg a (3) függvényeket $T=T_{\text{környezet}}$ esetén. Ebben az egy pontban a fiktív és a valóságos feketeségi fokok megegyeznek.

Az így nyert (számított vagy leolvasott) érték azonban még nem a valós feketeségi fok, hanem (a normálás miatt) a k_1 és k_2 tényezők:

$$k_1 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{25}} \quad \text{és} \quad k_2 = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_{15}}$$

Ezek segítségével azonban feketeségi fokok viszonya már meghatározható:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{k_1 \cdot \varepsilon_{25}}{k_2 \cdot \varepsilon_{15}} = \frac{k_1}{k_2} \cdot \left(\frac{T_{15}}{T_{25}} \right)^4$$

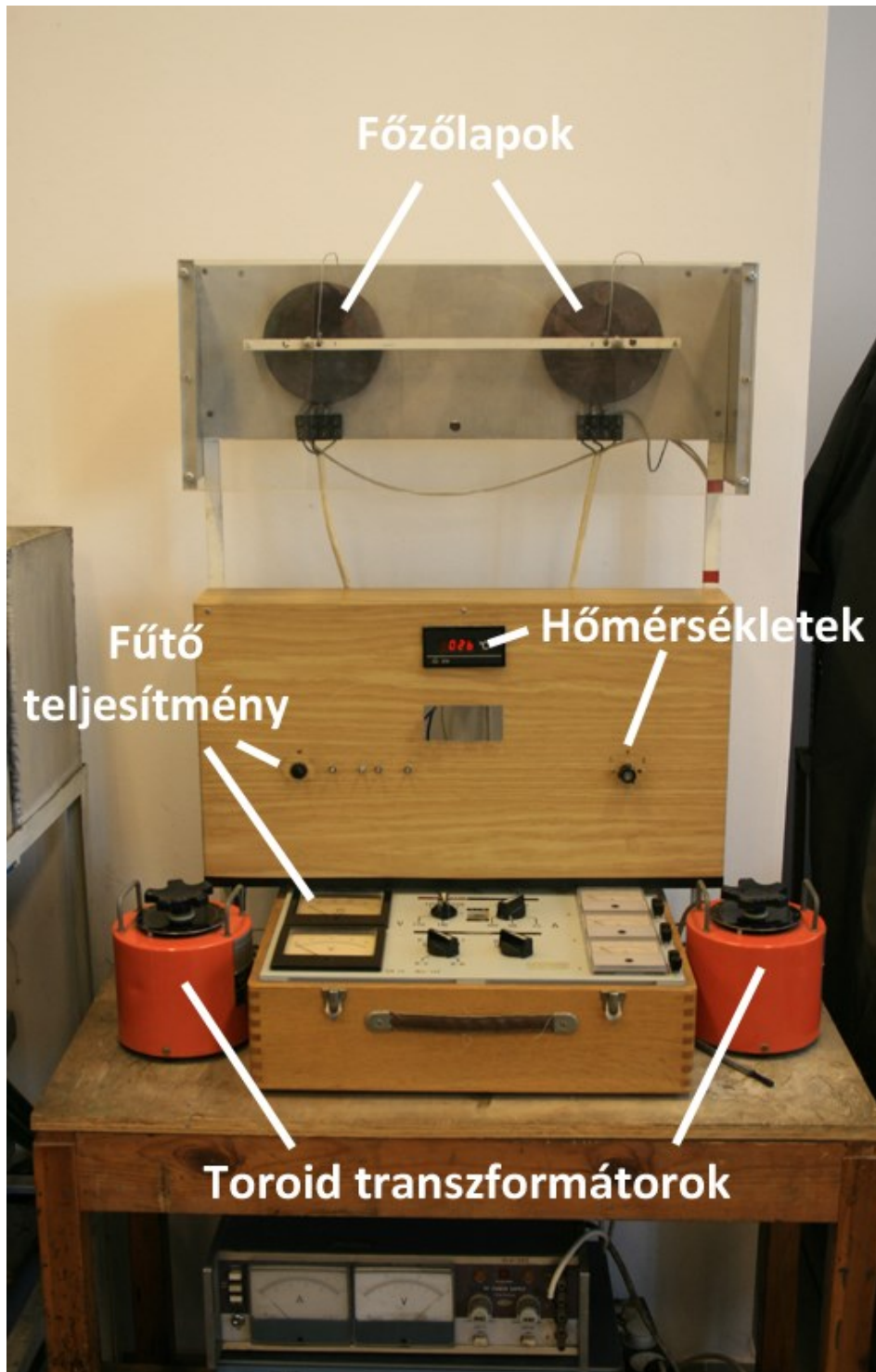
5. A jegyzőkönyv

A jegyzőkönyv tartalmazza

1. a mérés adatait,
2. az értékelés eredményeit a diagrammal együtt,
3. mérési eredmények értékelését.



6. Melléklet



H6. Vízszintes cső hőátadásának vizsgálata

1. A mérés célja

A mérés célja végtelen vízszintes hengerfelület szabad konvekció (természetes áramlás) útján történő hőleadásának vizsgálata, a hőátadási tényező számítására szolgáló általános érvényű összefüggés meghatározása.

2. A méréshez áttanulmányozandó anyag

Műszaki Hő- és Áramlástan II. 17.3 fejezet (188-209. o.).

3. A mérés leírása

3.1. Elvi alapok

Hőátadásnak nevezzük azt a jelenséget, amelynél a hőenergia egy szilárd fal és egy közeg (gáz vagy folyadék) érintkezési felületén áramlik keresztül.

Ha a közeg mozgása kizárólag sűrűségkülönbségből adódó felhajtóerő következménye, természetes vagy szabad konvekcióról beszélünk.

A hőátadással átadott hőáramot a

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (t_f - t_k)$$

alakú Newton-féle egyenlettel határozhatjuk meg, ahol α a hőátadási tényező [$W/m^2 \cdot K$], A a hőátadás felülete [m^2], t_f a fal felületének hőmérséklete [$^{\circ}C$], t_k a közeg főtömegének hőmérséklete [$^{\circ}C$].

Ebben az egyszerű egyenletben legnagyobb nehézséget az α hőátadási tényező meghatározása jelenti, melynek értékét befolyásolják a közeg áramlási viszonyai, hőfizikai jellemzői és a felület geometriai kialakítása.

Az α értékének analitikai módszerrel történő meghatározása csak néhány egyszerű feladatban lehetséges. A legtöbb gyakorlati esetben a hőátadási tényezőt mérési eredmények hasonlóságelmélet alapján történő feldolgozása útján nyert félempirikus, dimenziótlan hasonlósági számokból álló, úgynevezett kritériumos egyenletek segítségével lehet kifejezni. Ezekben az egyenletekben a függő változó a Nusselt-szám (Nu), a három független változó pedig a Reynolds-szám (Re), Grashof-szám (Gr) és a Prandtl-szám (Pr):

$$Nu = \frac{\alpha \cdot x}{\lambda}$$

$$Re = \frac{w \cdot x}{\nu}$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot x^3 \cdot \Delta T}{\nu^2}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a}$$

ahol	w	áramlási sebesség [m/s]
	ν	kinematikai viszkozitás [m^2/s]
	β	térfogati hőtágulási tényező (gázoknál $\beta = \frac{1}{T}$) [$\frac{1}{K}$]
	ΔT	hőmérséklet-különbség [K]



- a hőmérséklet-vezetési tényező
 λ hővezetési tényező $[W/m \cdot K]$

Az áramlás típusától függően, kifejezetten szabad áramlás esetén a Reynolds-szám, míg kényszerített áramlásnál a Grashof-szám elmarad az összefüggésekből.

Természetes konvekció esetén a hőátadás leggyakrabban fellelhető kritériumos egyenlete

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n \cdot K$$

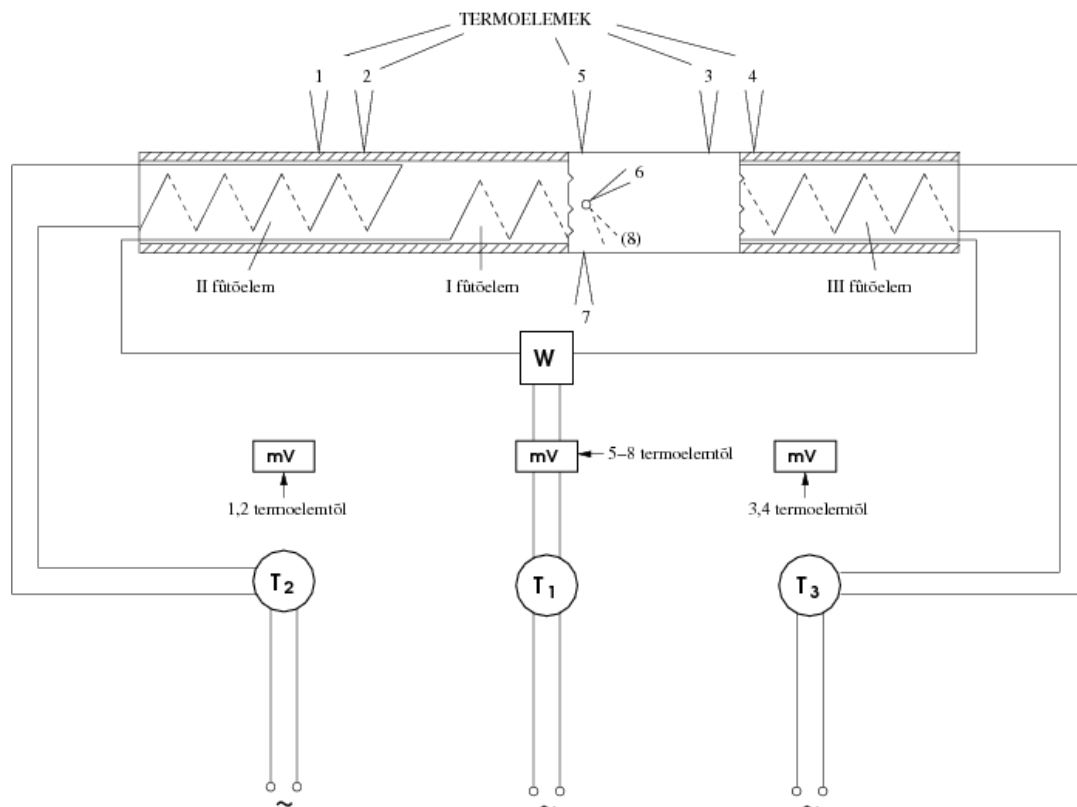
alakú.

Itt a c állandót és az n kitevőt kísérleti eredményekből határozzák meg hasonló geometriájú felületekre, a K tényező pedig további korrekciót tesz lehetővé.

A hőmérsékletfüggő mennyiségeket az egyenlethez minden esetben megjelölt vonatkoztatási hőmérsékletre kell kiszámítani.

3.2. A mérőberendezés ismertetése

A kísérleti berendezést mutatja a H7.1. ábra, melynek fő része az 1050 mm hosszú 56/ 50 átmérőjű acélcső, melynek középső l = 385 mm hosszú önálló, szabályozható fűtéssel (I) rendelkező szakasza a tulajdonképpeni mérési szakasz.



H6.1. ábra

A csővégek felé irányuló hőáramlás kiküszöbölésére szolgálnak a II és III számú kompenzáló fűtőtestek, melyek segítségével biztosítható az 1 és 2, valamint a 3 és 4 mérési helyek azonos hőmérséklete. Állandósult üzemmód esetén így a mérési szakaszba bevezetett fűtőteljesítmény megegyezik a szakasz felületén távozó hőmennyiséggel.

Az 1-2, illetve 3-4 hőelemek kapcsolása olyan, hogy azok a jelzett pontok közötti hőmérséklet-különbséggel arányos termofeszültséget adnak, tehát azonos hőmérsékletek esetén a két szélső millivolt-mérőnek zérust kell mutatnia.

A mérési szakasz felületén elhelyezett és sorba kapcsolt 5, 6, 7, 8 számú hőelemek a felületi átlaghőmérséklet és a környezeti hőmérséklet különbségével arányos termofeszültséget



szolgáltatóknak, melynek értéke a középső millivolt-mérőn olvasható le. (A másik forrasztási pont ugyanis a környezet hőmérsékletén van.)

A bevezetett fűtési teljesítményeket toroid transzformátorokkal külön-külön szabályozhatjuk.

A beépített hőelemek J típusúak, anyaguk vas-konstantán, tehát a négy sorba kapcsolt hőelem feszültségéből a fal átlaghőmérséklete:

$$t_f = t_k + \frac{U[mV]}{0,206}$$

3.3. A mérés lefolytatása

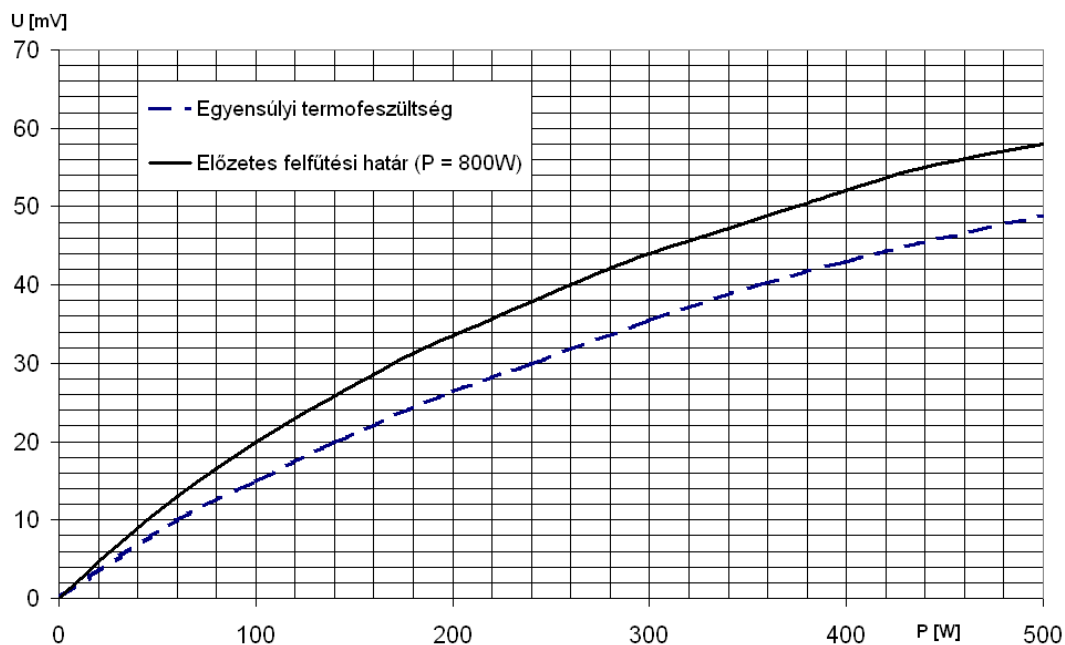
A középső toroid transzformátor (T1) segítségével a teljesítménymérőn beállítjuk a vizsgálandó fűtési teljesítményt (P).

Ezzel egyidejűleg a két szélső kompenzáló fűtőtest szabályzó transzformátorainak (T2, T3) forgatógombját a középsővel azonos helyzetbe állítjuk. A mérés során ügyelünk arra, hogy a két szélső kijelző nullát mutasson. Negatív szám megjelenése esetén az adott helyen a kompenzáló fűtést fokozni, míg ellenkező esetben csökkenteni kell.

A mérési szakasz közepén elhelyezett, sorba kapcsolt 5-8 számú hőelemeken létrejövő termofeszültség értékét (U) leolvassuk a középső millivolt-mérőn, és rögzítjük a jegyzőkönyv ide vonatkozó táblázatában. A leolvasás akkor következhet, ha a berendezés az állandósult állapotot elérte, amit a középső millivolt-mérőn leolvasható érték változása 0,04mV/min (0,01mV / 15 sec) alá csökken. Ekkor leolvassuk a környezet hőmérsékletét is.

A mérést 100W, 200W, 300W, 400W és 500W teljesítményen végezzük el.

A felfűtési folyamat gyorsítható, amennyiben a folyamat elején nagyobb fűtési teljesítményt alkalmazunk, majd egy közbelső termofeszültség érték elérése után állunk vissza a vizsgálandó teljesítményre. Az egyes fűtési teljesítményekkel elérhető egyensúlyi termofeszültséget, valamint az ajánlott előzetes felfűtési határt a H7.2. ábra tartalmazza.



H6.2. ábra

4. Értékelés

A mérési szakasz által a környezetnek időegység alatt átadott hőmennyiség állandósult állapotban megegyezik a bevezetett fűtési teljesítménnyel (P). Ez a hőmennyiség hőátadás és hőszugárzás útján jut a környezetbe, vagyis



$$P = P = \dot{Q}_h + \dot{Q}_s$$

A sugárzással kibocsátott energia Stefan-Boltzmann törvénye alapján

$$\dot{Q}_s = \varepsilon_{\text{red}} \cdot c_0 \cdot \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right] \cdot A$$

határozható meg,

ahol ε_{red} a hengerfelület és a környezet redukált feketeségi foka, ($\varepsilon_{\text{red}} = 0,735$)
 c_0 az abszolút fekete test sugárzási tényezője ($c_0 = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4$)
 A a mérési szakasz felülete ($A = 0,0677 \text{ m}^2$)

A hőátadással átszarmaztatott hőmennyiség

$$\dot{Q}_h = P - \dot{Q}_s$$

Másrészt Newton egyenlete alapján

$$\dot{Q}_h = \alpha \cdot A \cdot (t_f - t_k),$$

melyből a globális hőátadási tényező

$$\alpha = \frac{\dot{Q}_h}{A \cdot (t_f - t_k)}$$

Ezután meghatározzuk a hasonlósági számokat:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot d^3 \cdot \Delta t}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot d^3 \cdot \Delta t}{(t_k + 273) \cdot \nu^2}$$

A hővezetési tényező (λ), a kinematikai viszkozitás (ν), valamint a Prandtl-szám értékét a Műszaki Hő- és Áramlástan példatár F.14 függelékéből vehetjük.

A

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n$$

alakú általános kritériumos egyenletet a c és n állandók meghatározása céljából írjuk logaritmikus alakba:

$$\ln(Nu) = \ln c + n \cdot \ln(Gr \cdot Pr)$$

A mérési és az azokból számított eredményekre a legkisebb négyzetek módszerét alkalmazva kapjuk:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^s [\ln(Gr \cdot Pr)]_i \cdot \sum_{i=1}^s [\ln(Nu)]_i - s \cdot \sum_{i=1}^s [\ln(Gr \cdot Pr)]_i \cdot [\ln(Nu)]_i}{\left\{ \sum_{i=1}^s [\ln(Gr \cdot Pr)]_i \right\}^2 - s \cdot \sum_{i=1}^s [\ln(Gr \cdot Pr)]_i^2}$$

$$c = \exp \left\{ \sum_{i=1}^s [\ln(Nu)]_i - n \cdot \sum_{i=1}^s [\ln(Gr \cdot Pr)]_i / s \right\}$$



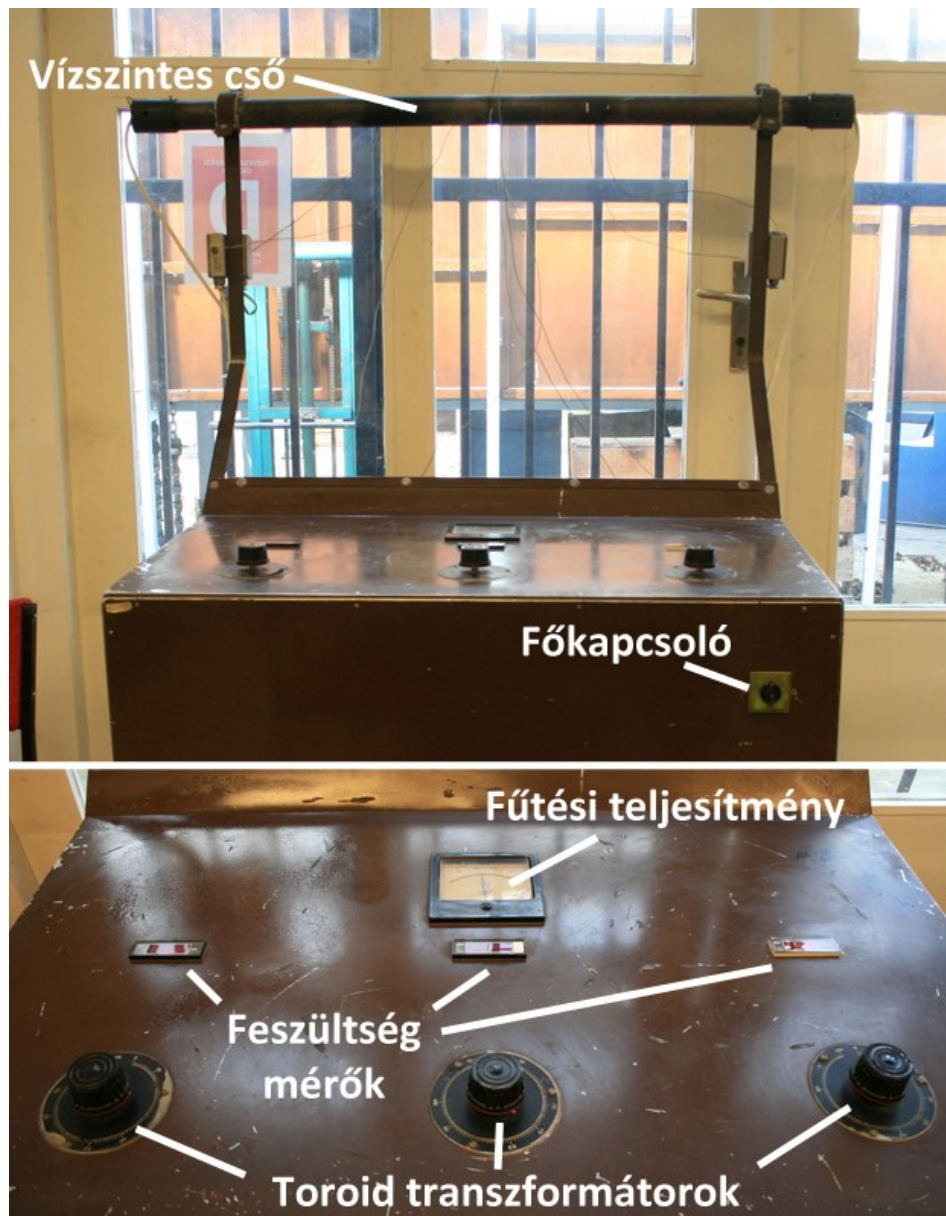
ahol i a mérés sorszáma
 s az összes mérési pont (üzemmód) száma, $s \geq 3$.

5. A jegyzőkönyv

A jegyzőkönyv tartalmazza

1. táblázatosan a mérési és számított eredményeket
2. a kiértékelést
3. az $\ln(Nu) = f[\ln(Gr \cdot Pr)]$ diagramot, feltüntetve a mérésből számított pontokat,
4. a mérés tanulságait.

6. Melléklet



H7.



H2. A vízgőz tenziógörbéjének kísérleti meghatározása

1. A mérés célja

Az alábbi mérésorozatot az anyagban részletezett berendezéssel a vízgőz tenziógörbéjének felvétele, a párolgáshő meghatározása céljából végezzük el. A kísérlet során tapasztalhatjuk a telítési nyomás és hőmérséklet közötti kapcsolatot, azaz a folyadék forrási állapotának nyomástól függő kialakulását. Így világossá válik előttünk, például a kuktában való főzés lényege, és megérthetjük a kavitáció folyamatát. A telítési nyomás és hőmérséklet közötti kapcsolat ismerete különösen fontos a gőztermelés folyamata, valamint a gőzkörfolyamatokat megvalósító hőerőgépek (pl. gőzüzemű hűtőgép, gőzturbina) vizsgálatakor.

2. A méréshez áttanulmányozandó anyag

Műszaki hő- és áramlástan I/2. kötet (J7724a)

11.22. A gőzök termodinamikája

a) A gőzképződés folyamatának vizsgálata, 499-505. o.

c) A vízgőz jellemző állapotai, 508-514. o.

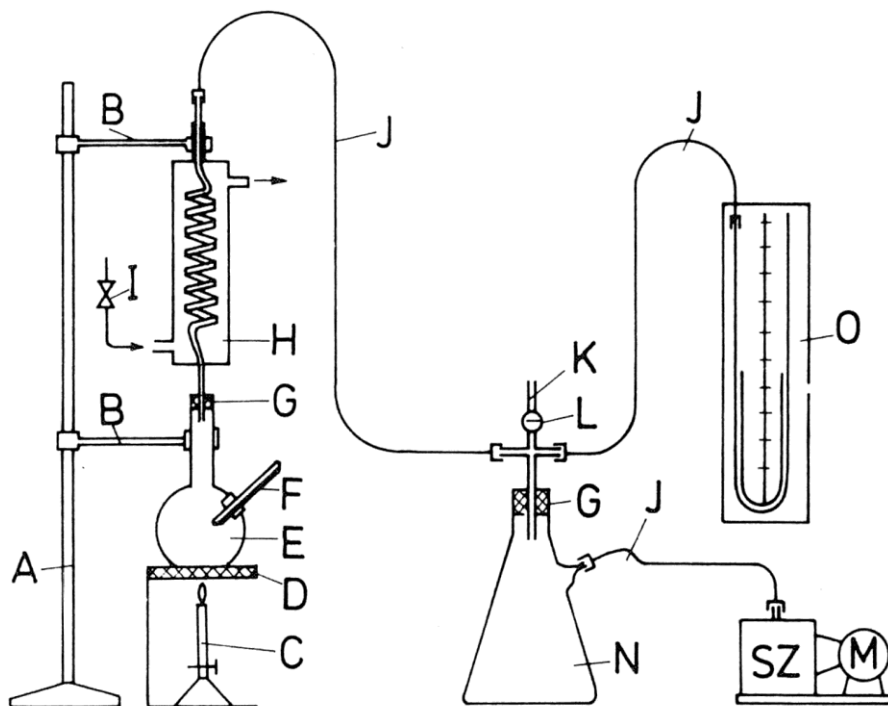
h) A Clausius-Clapeyron egyenlet, 529-532. o.

i) Kavitáció, 532-536. o.

3. A mérés leírása

3.1. A mérési berendezés

A vízgőz tenziógörbéjét a H2.1. ábrán látható berendezés segítségével határozhatjuk meg. Az E jelű lombikban lévő kb. 50 cm³ víz hőmérsékletét a C jelű Bunsen-égő (vagy bármilyen hőforrás) segítségével lehet változtatni. A rendszerben atmoszférikus, vagy annál kisebb nyomás létesíthető. A környezeti nyomást a K kiegyenlítő csonkon keresztül az L jelű kiegyenlítő csappal biztosíthatjuk, a környezeti nyomásnál kisebb nyomás pedig az M villanymotorral hajtott légszivattyúval (Sz) hozható létre a rendszerben.



H0.1. ábra

Az E lombikban uralkodó mindenkoros nyomáskülönbség a higanyal töltött U-csöves manométeren (O), a hőmérséklet pedig az F jelű bothőmérőn olvasható le.



A javasolt kis mennyiségű vízzel hosszabb kísérlet is elvégezhető, ha a melegítés közben elpárolgott vízgőzt lecsapatjuk (kondenzáljuk), és ismét visszafolyatjuk a lombikba. (A kis víztömeg pedig a kísérletsorozat gyorsabb elvégzését teszi lehetővé kis hőtehetetlensége folytán.) Erre a célra szolgál a H jelű hűtő. A hűtést a hűtő spirálja körül áramoltatott, a fali csaptelepből (I) származó vízmennyiség biztosítja.

Az N jelű szívópalack a hűtőspirálon átszívott vízgőz, valamint az U-csöves manométerből esetlegesen átkerülő higany szivattyú előtti lecsapatására, illetve összegyűjtésére szolgál. A az állvány, B a tartókar, D az alap, G a gumitömítés és J a csatlakoztató gumicsövek jele.

3.2. A mérés elve

A vizet melegítve, annak meghatározott állapotában megindul a gőzképződés. A gőzképződés alatt a lombikban a gőz és a folyadékfázis egyidejűleg egymás mellett van jelen. Ezt az állapotot telítési állapotnak nevezzük. Azt, hogy a telítési állapot milyen hőmérsékleten következik be, a víz fölött uralkodó nyomás egyértelműen meghatározza. A telítési állapotokhoz tartozó nyomás- és hőmérséklet-értékeket ezen berendezés segítségével határozhatjuk meg. A bothómérőn a telítési hőmérséklet (T_s) függvényében ábrázolva a telítési nyomásértékeket (p_s) az úgynevezett tenziógörbét (gőznyomásgörbét) kapjuk.

A kísérlet során a maximális vákuummal (legkisebb nyomással) kezdve célszerű haladni az atmoszférikus nyomás felé. A javasolt nyomáscsökkenés-értékek kb. 720-0 Hgmm, kb. 120 Hgmm lépcsőkkel. Így 6 mérési pont alakul ki.

3.3. A mérés elvégzése

A mérést a következőképpen hajtjuk végre.

A Bunsen-égőt működtetve elkezdjük a kb. 50 cm³ vízmennyiség melegítését.

A lombikban először a lehető legkisebb nyomást hozzuk létre. Ehhez először is a csapot nyitott állásba forgatjuk, ezután beindítjuk a légszivattyút. Ezt mindenképp nyitott csap mellett tesszük meg! Ezután a csapot teljesen elzárjuk. Amint a szivattyú a lehetséges legkisebb nyomást létrehozta, a manométeren leolvasható érték már nem változik, így le lehet olvasni a nyomáskülönbséget. Amint a lombikban stabil forrás alakul ki, leolvashatjuk a hőmérsékletet.

Ezután a csap finom nyitásával változtatjuk a nyomást a következő értékre, majd újra megvárjuk a stabil forrást, és elvégezzük a leolvasásokat.

A többi mérési pont hasonlóképpen vehető fel, az utolsónál azzal a különbséggel, hogy a környezeti nyomásnál értelemszerűen nincs szükség a légszivattyúra.

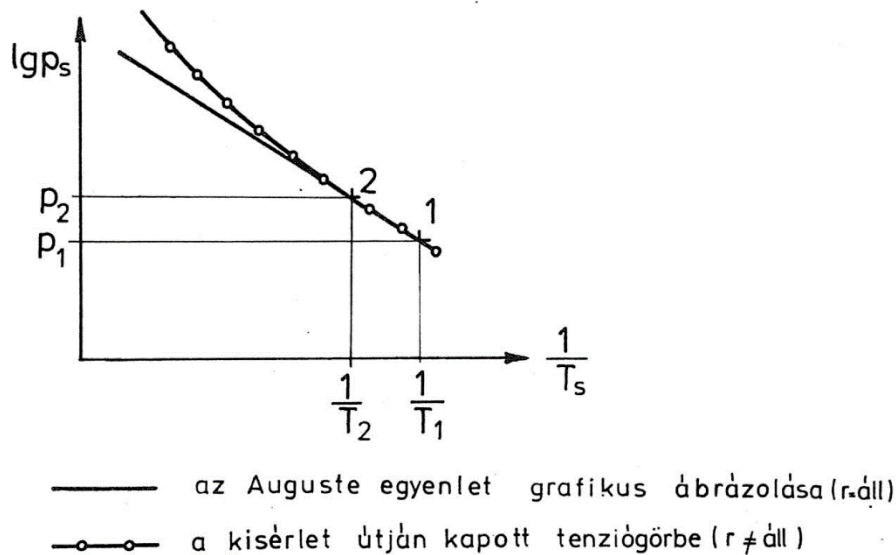
A mért adatokat és a számított értékeket a méréshez kiadott jegyzőkönyvben kell feljegyezni.

A tenziógörbe itt ismertetett felvételét Ramsay-Joung módszernek nevezik.

4. Értékelés

A fenti táblázatból látható, hogy a kísérlet eredményeként kapott telítési nyomásokat $l p_s$ értékre, míg a telítési hőmérsékleteket $\frac{1}{T_s}$ értékre kell átalakítani. Az így nyert értékeket ábrázoljuk a H2.2. ábrán látható diagramban, melynek a függőleges tengelyén az $l p_s$, vízszintes tengelyén az $\frac{1}{T_s}$ értékeket vesszük fel. Megrajzolva az egyes mérési pontokat, a vízgőznek az August-féle egyenlethez alkalmazható tenziógörbét kapjuk (H0.2. ábra).





H0.2. ábra

Az August-féle egyenletet a Clausius-Clapeyron egyenletből vezethetjük le, melynek eredménye:

$$\ln p_s = -\frac{r}{R} \cdot \frac{1}{T_s} + C$$

- ahol r a párolgáshő középértéke [J/kg],
 R a vízgőz gázállandója ($R = 461,65 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$),
 C integrálási állandó.

Az összefüggést 1 kmol anyagmennyiségre, nem túlságosan nagy nyomásváltozásokra írtuk fel. Az utóbbi feltétel miatt a párolgáshő állandónak vehető fel. Az August-féle egyenlet lineáris függvénykapcsolatot fejez ki, ezért a grafikus ábrázolása egyenest ad. Ezzel szemben a felvett tenziógörbe az $\frac{1}{T_s}$ tengely felől nézve enyhén homorú (H0.2. ábra). De ennek a görbének kis szakaszát (1-2) egyenesnek fogadhatjuk el a párolgáshő számszerű meghatározása céljából. Az August-egyenletet írjuk fel a kis szakasz végpontjaira:

$$2,31 \lg \left(\frac{p_{s_2}}{p_{s_1}} \right) = \frac{r}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{s_1}} - \frac{1}{T_{s_2}} \right)$$

Ebből a párolgáshő meghatározható $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$ mértékegységben:

$$r = \frac{2,31 \lg \frac{p_{s_2}}{p_{s_1}} \cdot R}{\frac{1}{T_{s_1}} - \frac{1}{T_{s_2}}}$$

A fenti képlettel meghatározhatjuk a vízgőz párolgáshőjét a kísérletileg felvett tenziógörbe két közeli pontjában ismert állapotjelző-értékek p_{s_i}, T_{s_i} behelyettesítése útján.



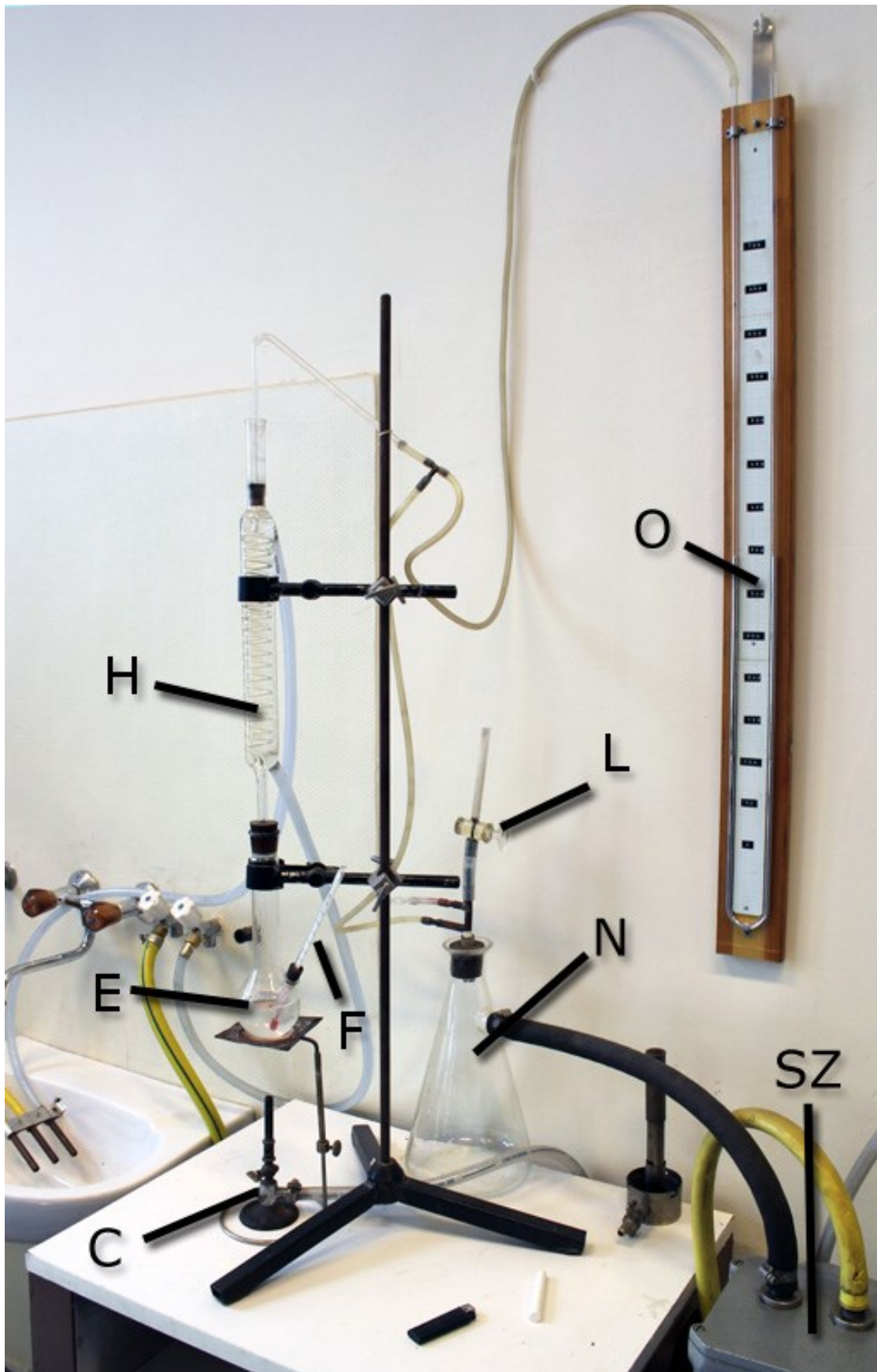
5. A jegyzőkönyv

A jegyzőkönyv tartalmazza

5. A mért értékeket és a számított eredményeket
6. Az értékelést
7. A tenziógörbét tartalmazó ábrát
8. Az r párolgáshő számítását
9. Az eredmények bírálatát, összevetve a gőztáblázatban található értékekkel.



6. Melléklet



H8. Gázturbina körfolyamat

1. A mérés célja

A mérés célja megismerni a gázturbinás körfolyamatot egy állandósult állapotbeli üzemi pontban történő működtetés segítségével.

2. A méréshez áttanulmányozandó anyag

Műszaki Hő- és Áramlástan jegyzet 10.15 és 10.2 fejezetek.

3. A mérés leírása

3.1. A berendezés felépítése

Legfontosabb eleme (H8.1. ábra) a K centrifugális kompresszorból és T centripetális turbinából álló turbótöltő, melyet az É égéstér kapcsol össze egymással. A K-T turbótöltő csúszócsapágyait az O hűtött olajtartályból elszívott és az O_{sz} olajszivattyú segítségével a csapágyakhoz szállított olaj keni. Az üzemmeleg olaj hőmérséklete legalább 70-80 °C, ennél hidegebb olajjal a berendezés nehezen indul. Üzemmeleg állapotban a kenőolaj hőmérsékletének kedvező értéke 85-95 °C.

3.2. A berendezés indítása és üzeme

A V ventilátor segítségével a Mé mérőperemen keresztül a K-T egységbe levegőt juttatunk, a forgórész forogni kezd.

Az I indító-üzemanyagtartályból a Bsz benzinszivattyú segítségével indító benzint juttatunk az É égéstérbe, melyet az M mágneses nagyfeszültségű generátorral létrehozott szikrával az égéstérben meggyújtunk. A benzin égését a turbina előtti 3 pontban elhelyezett hőelemek segítségével érzékeljük, a T₃ hőmérséklet növekszik.

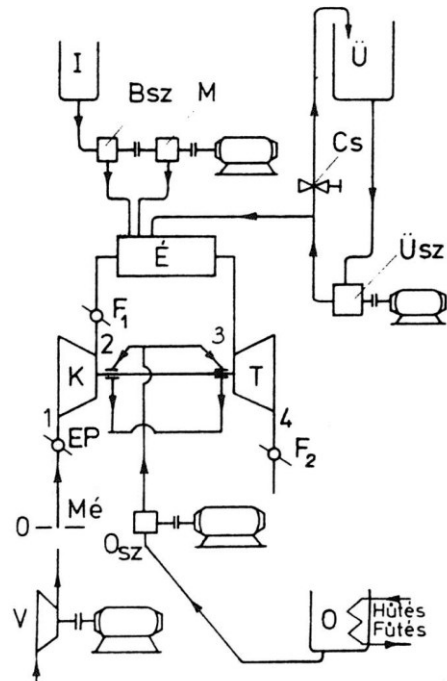
A K-T egység fordulatszámát elektronikus fordulatszám-mérővel mérjük. Az égés beindulása után az Ü üzemanyag-tartályból az Üsz üzemanyag-szivattyú s a Cs szabályzó csap segítségével óvatosan annyi tüzelőanyagot (gázolajat) porlasztunk az égéstérbe, hogy a t₃ hőmérséklet 500-600 °C közötti legyen.

A betüzelés hatására a forgórész gyorsulni kezd, és kb. $n = 24000$ ford/perc értéknél önjáróvá válik, a turbina képes annyi teljesítményt leadni, amennyi a kompresszor forgatásához szükséges. A V ventilátor ezután lekapcsolható.

Jelen mérés során, mivel csak egy munkapontot mérünk, mindössze a Cs szabályzó csap állításával történik a kívánt fordulatszám beállítása, a terheléseket imitáló F₁ és F₂ fojtások, valamint az EP előperdítő lapátsor teljesen nyitott helyzetben maradnak.

3.3. Mérési helyek a berendezésen

A kompresszor által beszívott \dot{m}_{lev} [kg/s] levegő mennyiségét a szabadból szívó Mé mérőperem segítségével mérjük. A mérőperemen létrehozott $\Delta p_{mé}$ nyomásesést víz-manométerrel határozzuk meg. A beszívott levegő mennyiségének meghatározása a mérőperemen létrejövő nyomásesés ismeretében a Bernoulli-egyenlet felhasználásával történik:



H8.1. ábra



$$\dot{m}_{lev} = \alpha \cdot \frac{d_{mé}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p_{mé}}$$

A mérőperem adatai a következők:

$$\alpha = 0,6, \quad d_{mé} = 70mm$$

A mérőperemen értelmezhető ρ sűrűséget jó közelítéssel egyezőnek vehetjük a ρ_0 környezeti sűrűséggel, amelyet a környezeti p_0 nyomás és T_0 hőmérséklet ismeretében számolhatunk:

$$\rho \approx \rho_0 = \frac{p_0}{R \cdot T_0}$$

ahol R a levegő specifikus gázállandója, $R = 287 \text{ J/kgK}$.

A környezeti p_0 nyomást barométerrel, a T_0 hőmérsékletet pedig higanyos hőmérőn kell a mérés során egyszerűen leolvasni.

A berendezésen kialakított nyomásmérési pontok:

- p_1 , kompresszor előtt, víz-manométer,
- p_2 , kompresszor után, higany-manométer,
- p_3 , turbina előtt, higany-manométer,
- p_4 , turbina után, víz-manométer,

A berendezésen kialakított hőmérsékletmérési pontok:

- T_2 , kompresszor után, hőelem,
- T_3 , turbina előtt, hőelem,
- T_4 , turbina után, hőelem,

A hőelemek által mért hőmérsékleteket mérőhely-átkapcsolóval ellátott digitális hőmérséklet-kijelzőn lehet leolvasni.

A fordulatszámot elektronikus impulzusszámlálóval mérjük. Az impulzusokat a K-T egység tengelyvégén található mágneses csavar szolgáltatja, amely egy elektromos tekercs előtt forog. A tekercsben a csavar változó mágneses terének következtében váltakozó feszültség indukálódik, amely a számlálóegységbe kerül. A kijelző közvetlenül fordulatszámot jelez.

A turbina utáni t_4 hőmérséklet mért értéke a turbinaház igen nagy mértékű hőszugárzása miatt nem reális. Ez különösen nagy t_3 hőmérsékletek és kis fordulatszámok esetében van így. Ezért a mért t_4 értékét nem használjuk fel az értékelésnél, mert ezzel irreálisan kedvező értéket kapnánk a turbina hatásfokára (gondoljuk meg, miért).

3.4. A mérés elvégzése, a mért értékek

Teljesen nyitott fojtószelepállásnál és 0 fokra állított előterelő lapátsorral mérjük a következő mennyiségeket:

$$t_0 = t_1, t_2, t_3, t_4, \Delta h_{mé}, h_0, \Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3, \Delta h_4.$$

A mért eredményeket a jegyzőkönyv ide vonatkozó táblázatában rögzítjük. Az adott keresztmetszetek nyomásait, illetve hőmérsékleteit a következő összefüggések szerint határozzuk meg a mért mennyiségekből:

$$T = t + 273 \quad [K]$$

$$p_0 = \rho_{Hg} \cdot h_0 \cdot g$$

$$p = p_0 + \rho_f \cdot \Delta h \cdot g$$



Az utolsó képlettel az 1, 2, 3 és 4 keresztmetszetekben uralkodó nyomás határozható meg. A képletben a ρ_f az aktuális mérőfolyadék sűrűsége. Vigyázzunk, a képlet helyes kiértékeléséhez szükséges, hogy a kompresszor előtti Δh értékek előjele negatív legyen!

4. Értékelés

Az értékelés során először a mért értékekből számítással meg kell határozni az egyes nyomások értékeit.

A közvetlenül mért és számított mennyiségek ismeretében a gázturbina működésével kapcsolatos további fontos jellemzők is meghatározhatóak, úgy mint kompresszor és turbina nyomásviszonyok, valamint hatásfokok, illetve a gázturbinán áthaladó munkaközeg tömegárama. Ezeket a következő összefüggésekkel határozhatjuk meg:

$$\pi_k = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_0 + \rho_{Hg} \cdot \Delta h_2 \cdot g}{p_0 + \rho_{v\acute{e}z} \cdot \Delta h_1 \cdot g} \quad (\Delta h_1 < 0!)$$

$$\pi_t = \frac{p_3}{p_4} = \frac{p_0 + \rho_{Hg} \cdot \Delta h_3 \cdot g}{p_0 + \rho_{v\acute{e}z} \cdot \Delta h_4 \cdot g} \quad (\Delta h_4 > 0!)$$

$$\eta_s^k = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{\pi_k^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{\frac{T_2}{T_1} - 1}$$

A turbina izentrópius hatásfoka a kompresszoréhoz hasonlóan lenne számítható, ha a T_4 hőmérsékletet megbízhatóan tudnánk mérni. Az értékelés szempontjából érdemes kiszámítani a mért értékekkel a turbina izentrópius hatásfokát:

$$\eta_s^t = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}} = \frac{1 - \frac{T_4}{T_3}}{1 - \frac{1}{\pi_t^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}}$$

A nem megbízható T_4 mérés miatt a turbina hatásfoka a K-T egység egyensúlyi egyenletéből kiindulva írható fel, amely a kompresszor és turbina teljesítmények egyenlőségén alapul. A kis mennyiségű betáplált tüzelőanyag okán feltételezhetjük, hogy a két gépen áthaladó munkaközeg tömegárama egyenlő, ezzel az egyensúlyi egyenlet a technikai munkák egyenlőségére redukálható, vagyis

$$c_{pk} \cdot (T_2 - T_1) = c_{pt} \cdot (T_3 - T_4),$$

mely az ismert összefüggések alkalmazásával így írható:

$$c_{pk} \cdot T_1 \cdot \left(\pi_k^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\eta_s^k} = c_{pt} \cdot T_3 \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi_t^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \right) \cdot \eta_s^t$$

Itt a turbina izentrópius hatásfokán kívül minden más mennyiség mérhető, vagy becsülhető, így az átalakítás után kaphatjuk:



$$\eta_s^t = \frac{c_{pk} \cdot T_1 \cdot \left(\pi_k^{\frac{\kappa_k-1}{\kappa_k}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\eta_s^k}}{c_{pt} \cdot T_3 \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi_t^{\frac{\kappa_t-1}{\kappa_t}}} \right)}$$

- ahol κ_k a kompresszor munkaközegére (levegő) érvényes adiabatikus kitevő, $\kappa_k = 1,4$
 κ_t a turbina munkaközegére (égéstermék) érvényes adiabatikus kitevő, $\kappa_t = 1,34$
 c_{pk} a kompresszor munkaközegére (levegő) érvényes állandó nyomáson vett fajhő, $c_{pk} = 1004,5 J/kg \cdot K$
 c_{pt} a turbina munkaközegére (égéstermék) érvényes állandó nyomáson vett fajhő, $c_{pt} = 1132 J/kg \cdot K$

A jegyzőkönyvben egy ideális gázturbina körfolyamat ábrázolása is szükséges T-s diagramban, a valós körfolyamattal való összehasonlíthatóság érdekében. A jellegzetes pontoknál a következőkkel kell számolni:

$$T_0 = T_1; \pi_{k \text{ id}} = \pi_k \text{ mért}; T_{2s} = T_1 \cdot \pi_k^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}; T_3 \text{ id} = T_3 \text{ mért}; p_3 \text{ id} = p_2 \text{ mért}; p_4 \text{ id} = p_0; \pi_T \text{ id} = \pi_k \text{ id};$$

$$T_{4s} = T_{3 \text{ id}} \cdot \frac{1}{\pi_k^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}$$

Ennek megfelelően kell kitölteni a jegyzőkönyvben található táblázatot, amely az egyes körfolyamat pontok jellemzőit tartalmazza.

5. A jegyzőkönyv

A jegyzőkönyvnek tartalmaznia kell

1. a mért értékeket,
2. a számított értékeket,
3. a T-s diagramot (melyben közösen ábrázolva vannak a gázturbina mért körfolyamatának valós (mért) értékei, valamint egy ideális körfolyamat pontjai),
4. a mérés értékelését.



Á5. Henger körüli nyomásmegoszlás felvétele

1. A mérés célja

A mérés célja a végtelen hosszú körhenger mentén kialakuló nyomásmegoszlás kísérleti meghatározása párhuzamos áramlásban, az eredmény összehasonlítása a súrlódásmentes közeg esetén számítható ideális nyomásmegoszlással.

2. A méréshez áttanulmányozandó anyag

Műszaki Hő- és Áramlástan című jegyzet II. kötetének 16.21. pontja, főleg a 80-87. oldalon lévő rész.

3. A mérés leírása

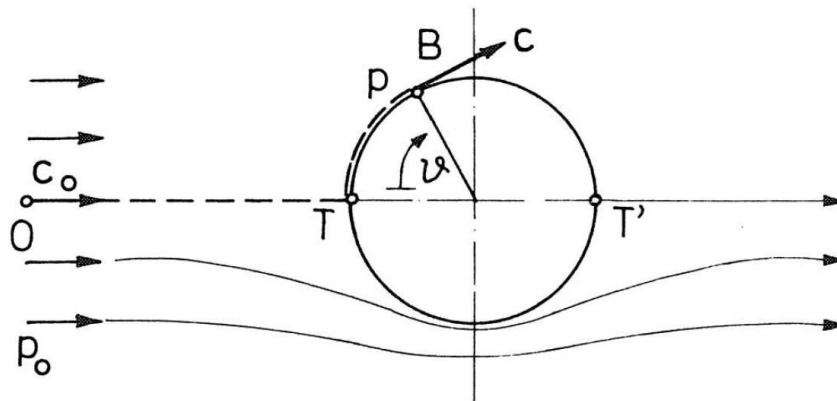
3.1. A henger körüli áramlás ideális és viszkózus közeg esetén

A komplex potenciálok elméletével levezethető, hogy egy c_0 [m/s] sebességű párhuzamos, homogén áramlásba helyezett végtelen hosszú körhenger felületének valamely ϑ középponti szöggel megadott pontjában létrejövő helyi sebesség nagysága ideális közeg esetén a

$$c = 2 \cdot c_0 \cdot \sin \vartheta \quad (1)$$

kifejezés segítségével számítható (a ϑ szög értelmezése Á5.1. ábra). A Bernoulli-egyenlet szerint a pontról-pontra változó sebességnek megfelelően a nyomás helyi értéke is változik a henger palástja mentén. E mérés célja a henger körüli nyomásmegoszlás kísérleti felvétele és az eredmény összehasonlítása a súrlódásmentes közeg esetén kiszámítható elméleti megoszlással.

Az ideális és mért nyomásmegoszlást is célszerű dimenzió nélküli formában ábrázolni a ϑ szög



Á0.1. ábra

függvényében. Ebből a célból az alábbi definícióval bevezetjük a \bar{p} nyomástényező fogalmát:

$$\bar{p} = \frac{p - p_0}{\frac{\rho}{2} \cdot c_0^2} \quad (2)$$

Itt ρ [kg/m³] az áramló közeg sűrűsége, p illetve p_0 a körhenger felületi pontjában, illetve a zavartalan áramlásban uralkodó nyomás Pa mértékegységben. A képlet nevezője a zavartalan áramlás dinamikus nyomása.

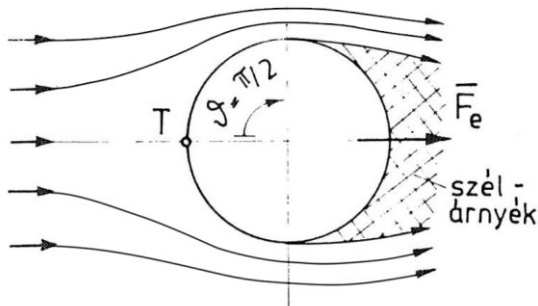
A nyomástényező ideális értékét az Á5.1. ábra alapján a zavartalan áramlás 0-val jelölt pontja és a körhenger palástjának B-vel jelölt pontja között felírt Bernoulli-egyenletből számíthatjuk:

$$\frac{\rho}{2} \cdot c_0^2 + p_0 = \frac{\rho}{2} \cdot c^2 + p$$

A 0 és B pont szintkülönbségét elhanyagoltuk, ami megengedhető, ha az áramló közeg légnemű.



Az Á5.1. ábra alsó felén berajzoltuk az ideális áramlás két áramvonalát, valamint azt a két pontot, ahol az elmélet szerint zérus sebesség van: T a mellső, T' a hátsó torlópont.



Á0.2. ábra

A Bernoulli egyenletből kapjuk, hogy

$$p_{id} = \frac{p - p_0}{\frac{\rho}{2} \cdot c_0^2} = 1 - \left(\frac{c}{c_0} \right)^2$$

Eszerint az ideális áramlásban a körhenger körüli nyomástényező-értékek az (1) egyenlet felhasználásával a

$$\bar{p}_{id} = 1 - 4 \cdot \sin^2 \vartheta \quad (3)$$

képletből számíthatók. A $\bar{p}_{id} = f(\vartheta)$ függvény menetét az Á5.3. ábra vázoltuk fel. Látható,

hogy a mellső torlópontban ($\vartheta = 0$) és a hátsó torlópontban ($\vartheta = \pi$) a nyomástényező értéke egységnyi. Ez érthető, hiszen pl. a T pontban a sebesség zérus lévén (ezért a „torlópontri” elnevezés) a helyi nyomás azonos az össznyomással:

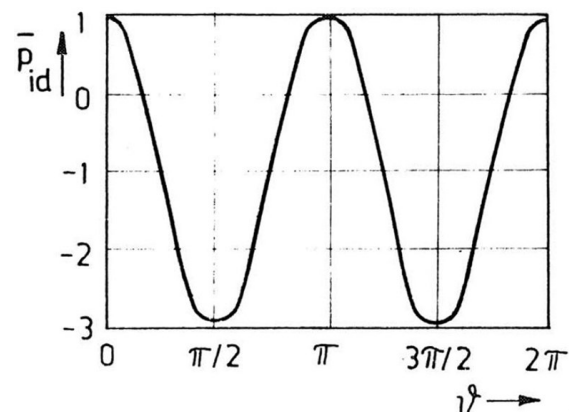
$$p_T = p_0 + \frac{\rho}{2} \cdot c_0^2$$

vagyis a torlópontban a $p - p_0$ nyomáskülönbség éppen a $\frac{\rho}{2} \cdot c_0^2$ dinamikus nyomással egyenlő.

A folyadéksúrlódás jelenléte a henger körüli áramlást az Á5.1. ábra alsó felén rajzolthoz képest nagymértékben módosítja. A valóságos áramképet az Á5.2. ábra szemlélteti. A súrlódásos közeg az áramlás síkjára merőleges átmérősík után nem követi a henger körvonalát, hanem leválik arról.

Nem alakul ki a T' hátsó torlópont és a henger mögött ún. szélárnyék képződik. Az áramképnek a $\vartheta = \frac{\pi}{2}$ középponti szöggel jellemzett átmérősíkra

vonatkozó szimmetriája megszűnik. Mindez a valóságos nyomásmegoszlási görbének az $1 - 4 \cdot \sin^2 \vartheta$ függvénytől való lényeges eltérését vonja maga után. A legfontosabb gyakorlati következmény az, hogy a felbomlott szimmetria miatt a hengeren egy – az áramlás irányába mutató – erő keletkezik (\bar{F}_e), amelyet ellenállásnak nevezhetünk, hiszen a henger c_0 sebességgel történő vontatásakor ezzel egyenlő nagyságú, de ellentett értelmű vonóerőt kell működtetni a hengeren az egyenletes mozgás fenntartására.



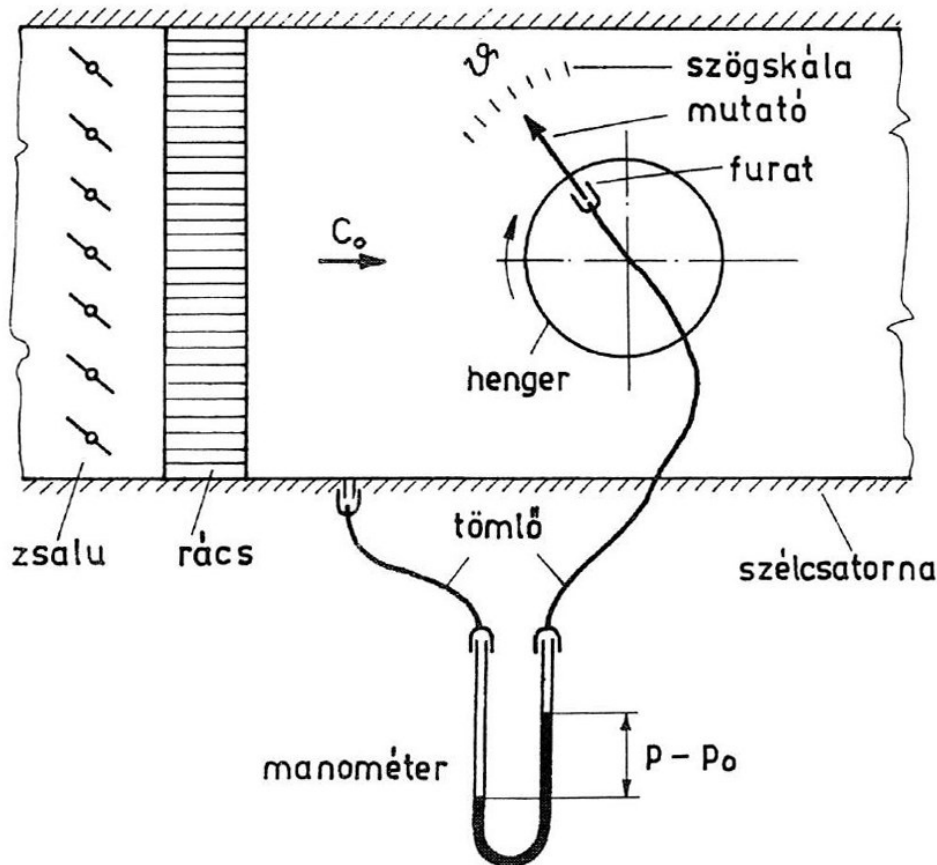
Á0.3. ábra

3.2. A kísérleti berendezés

A valóságos nyomásmegoszlási görbét az Á5.4. ábrán vázolt kísérleti berendezésen vesszük fel. A c_0 sebességű zavartalan áramlást ventilátorhoz csatlakozó szélcsatorna 480mm magas és 315mm széles téglalap keresztmetszetű mérőterében állítjuk elő.

A mérőtér keresztmetszetében az egyenletes sebességmegoszlást egy apró csövekből álló egyenirányító szakasz (rács) biztosítja. A motor fordulatszámának változtatásával a ventilátor által szállított levegőmennyiséget és ezáltal a c_0 sebességet változtatni tudjuk. A89mm névleges átmérőjű körhenger palástján furat van, amelytől a p nyomást a differenciál nyomásmérő egyik csatlakozójához vezetjük. A nyomásmérő másik csatlakozóján a szélcsatorna falán lévő furatból elvezetett p_0 nyomás hat. A nyomásmérő tehát közvetlenül a $p - p_0$ nyomáskülönbséget mutatja. A





Á0.4. ábra

nyomásközlő vezetékek gumitömlők. A faltól-falig terjedő (a csatornaáramlás szempontjából tehát végtelen) henger középvonala körül elforgatható, így a palástján levő furat a c_0 megfúvási sebesség irányához képest tetszés szerinti ϑ szög alatt állítható be. A ϑ szög aktuális értékét a csatornához rögzített szögosztáson a hengerrel együttmozgó mutató jelöli ki.

3.3. A mérés elvégzése

Megindítjuk a ventilátort és a mutató $\vartheta = 0^\circ$ -os állásában leolvassuk a manométeren $p-p_0$ értékét. Ezt külön feljegyezzük, mert az az előbbieket szerint egyben a \bar{p} nyomástényező nevezőjében levő dinamikus nyomást is jelenti. Ezután a mutatót rendre $\vartheta = 10, 20, 30 \dots (10 \text{ fokonként}) \dots 350, 360^\circ$ helyzetbe állítva leolvassuk a nyomásmérőt. Vigyázat! A $p-p_0$ nyomáskülönbség $\vartheta = 30^\circ$ és $\vartheta = 330^\circ$ táján előjelet vált. Ezért a nyomásmérő fajtájától függően előfordulhat, hogy az előjelváltáskor a nyomásmérőbe bekötött tömlőket fel kell cserélni. A mérést célszerű egy nagyobb és utána egy kisebb c_0 értéknél (két motorfordulatszám mellett) elvégezni. A mért értékeket a jegyzőkönyv ide vonatkozó táblázatába kell felvenni.

4. Kiértékelés

A (2) és a (3) képlet kiszámításával kezdődik. A mért nyomáskülönbségeket a (2) képletbe helyettesítve (külön a kisebb és külön a nagyobb sebességekre) kiszámítjuk a nyomásmegoszlás tényleges lefolyását a ϑ szög függvényében. A (3) képletből adódó ideális nyomásmegoszlás kiszámítható. A számítás eredményeit a mellékelt jegyzőkönyv megfelelő táblázatába kell beírni. Az eredmények alapján egy diagramba kell feltüntetni a két mérésből számítás útján kapott $\bar{p} = f(\vartheta)$ függvényt, valamint a (3) egyenlet megoldásával kapott $\bar{p}_{id} = f(\vartheta)$ függvényt.

A kapott eredmény elemzésével kapcsolatban lást a Műszaki Hő- és Áramlástan című jegyzet II. kötetének 16.21. ábrájához fűzött magyarázatot!



5. A jegyzőkönyv tartalma

1. a mérőberendezés rajzát
2. a mért értékeket tartalmazó táblázatot
3. a számított értékeket tartalmazó táblázatot
4. $\bar{p}_{id} = f(\vartheta)$, $\bar{p} = f(\vartheta)$ függvénygörbét
5. a mérési eredmények értékelését.



Á8. Légerő mérés szárnyon

1. A mérés célja

Szárnyprofil felhajtóerő-, ellenállás- és nyomatéki jelleggörbéjének meghatározása.

2. A méréshez áttanulmányozandó anyag

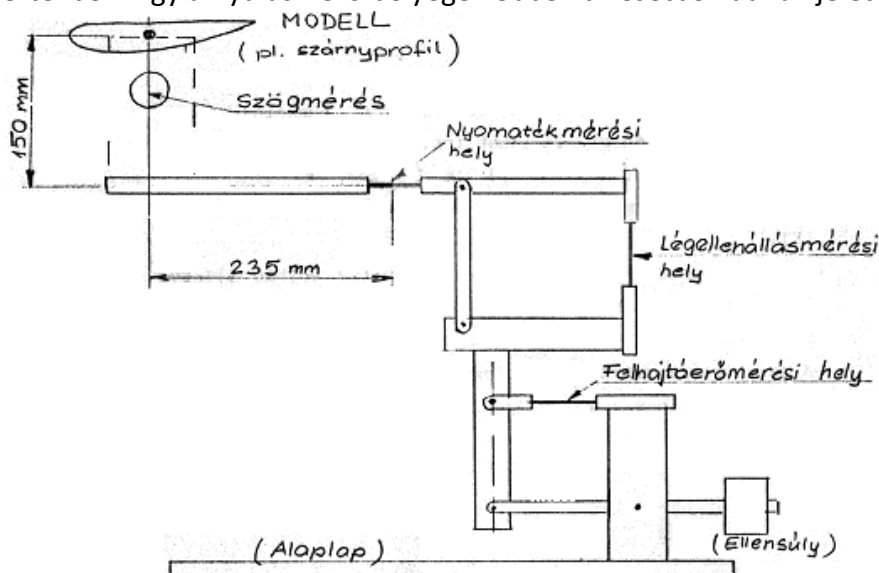
A méréssel kapcsolatos elméleti ismereteket a Jegyzet nem tartalmaz.

3. A mérés leírása

3.1. A mérőberendezés leírása

A légáramlásba helyezett testeken erő keletkezik. Az így keletkező erőt eredő légerőnek nevezzük. Két összetevőre szokás felbontani: a felhajtóerőre (F_f vagy F_L) és a légellenállásra (F_e vagy F_D). A gyakorlaton szereplő, aerodinamikai mérleg arra szolgál, illetve úgy van kialakítva, hogy vele ezek az erőösszetevők külön-külön mérhetők legyenek. Fontos kérdés még az erő hatásvonalának a helye is, ebből a célból a mérlegen nyomaték-mérésre (M) alkalmas helyet is kialakítottunk.

A mérleget az Á0.1. ábra mutatja. Látható, hogy a felhajtóerő és a légellenállás külön mérhető, mivel a mérésre alkalmazott rugólap csak a megfelelő irányú erő hatására deformálódik számottevő mértékben - így a nyúlásmérő bélyegek ebben az esetben adnak jelet.



Á0.1. ábra

A nyomaték-mérő elem tulajdonképpen a teljes erő (eredő légerő) hatását méri – az erőösszetevők ismeretében az eredő számítható és az eredő abszolút értékét valamint a nyomatékát ismerve meghatározható az eredő légerő hatásvonalára.

A mérleg az erőket rugólapok deformációján keresztül méri. A deformációt nyúlásmérő bélyegek alakítják elektromos jellé – ezt a jelet érzékeli egy elektronikus szerkezet (A/D átalakító), illetve az érzékelés után átadja a méréshez kapcsolt számítógépnek.

A berendezés alaphelyzetben is ad jelet – ezt nullponteltérésnek, idegen szóval ofszetnek nevezzük. Ennek figyelembe vétele esetenként automatikus, esetenként külön munkát követel. A mérőprogram képes automatikus nullázásra, ez terhelés nélküli esetben az esetleges nullponteltérések gyors kompenzálására alkalmas.

A mérleget a méréshez hitelesíteni kell. Ezt a munkát már elvégeztük, a hitelesítési értékek a következők:



nyomaték:	0,0036826 Nm / mV
felhajtóerő:	0,0328 N / mV
légellenállás	0,014575 N / mV

Adott esetben a mérleg, természetesen, újra hitelesíthető.

3.2. A mérés végrehajtása

A szélcsatornában végrehajtott egyik leggyakoribb mérés a szárnyprofilra ható erők mérése. Ennek során vizsgáljuk, hogy a profil működési tartományában hogyan változik a felhajtóerő, a légellenállás és ezek hatásvonalai. Ezt a mérést a szélcsatorna, az aerodinamikai mérleg és a "Szárny" elnevezésű program segítségével hajthatjuk végre.

A nyúlásmérő bélyegek ellenállások, melyek deformáció hatására változtatják ellenállásukat. A nyúlásmérő bélyeges méréshez egy konstans árammal kell a mérőhidat megtáplálni, és így a változó ellenállás és az állandó áram szorzata – az Ohm-törvény értelmében – az ellenállás-változással arányos feszültségváltozást generál, amelyet az analóg-digitális átalakítók kezelni tudnak. Viszont az árammal való táplálás egyúttal azt is jelenti, hogy az ellenállásokon hő keletkezik, s ennek következtében melegedés lép fel. A legtöbb anyagnak, így a nyúlásmérő bélyegek fém ellenállás huzaljainak hőmérséklettől (is) függ az ellenállásuk. Ennek következtében legalább 15-20 percnyi melegedési időt célszerű biztosítani a berendezésnek, hogy a bélyegek elérhessék üzemi hőmérsékletüket, s a hőfokváltozás megszűntével ellenállásuk már valóban csak a deformációtól függjön.

A mérés lépései részletesen olvashatók a "Szárny" program leírásában – itt vázlatosan foglaljuk csak össze a teendőket:

1. a számítógép bekapcsolása;
2. a mérleg és a szélcsatorna előkészítése;
3. a "Szárny" program indítása és a kalibrálása;
4. a szélcsatorna beindítása;
5. a kívánt állásszög beállítása (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60°);
6. a mérés végrehajtása (és ugrás az 5. pontra, ha van még mérendő állásszög);
7. sebességmérés;
8. a környezeti nyomás és hőmérséklet mérése;
9. a mérés befejezése, a gépek leállítása.

4. Kiértékelés

A mérési eredmények az eredményfájlban találhatóak. Az eredményfájlt a program automatikusan menti, tehát a mérést végrehajtó személy(ek)nek ezzel nem kell törődni.

Megjegyzés: mivel az eredményfájl szöveges, hozzáfűzhető a sebesség, környezeti nyomás és hőmérséklet értékek a későbbi kiértékelés céljából.

Számítani kell minden állásszögnél a mért értékek átlagából az egyes erőket, valamint a sebesség ismeretében az egyes tényezőket, melyek a következő képletek alapján számíthatóak:

$$c_f = \frac{2 \cdot F_f}{\rho \cdot v^2 \cdot A} \quad c_e = \frac{2 \cdot F_e}{\rho \cdot v^2 \cdot A} \quad c_M = \frac{2 \cdot M}{\rho \cdot v^2 \cdot A \cdot h}$$

Befejezésül megjegyezzük, hogy az aerodinamikai mérleg természetesen - nem csak szárnyprofil mérésre alkalmas; vele számos, más modell is mérhető. Ilyen lehet pl. egy autó vagy más közlekedési eszköz modellje. Másrészt a kapott eredmények csak nagy óvatossággal alkalmazhatók, hiszen a hasonlósági kritériumoknak gyakorlatilag egyáltalán nem teszünk eleget. További probléma az is, hogy a szélcsatorna levegő-sugarának meglehetősen egyenetlen a



sebesség-eloszlása, így olyan turbulenciák hatása is érvényesül, amelyek a valóságban nem léteznek.

5. A jegyzőkönyv

A jegyzőkönyv tartalmazza:

A számított adatokat a program által elmentett nyers adatok felhasználásával

A felhajtóerő, ellenálláserő, és nyomaték jelleggörbéket az állásszög függvényében

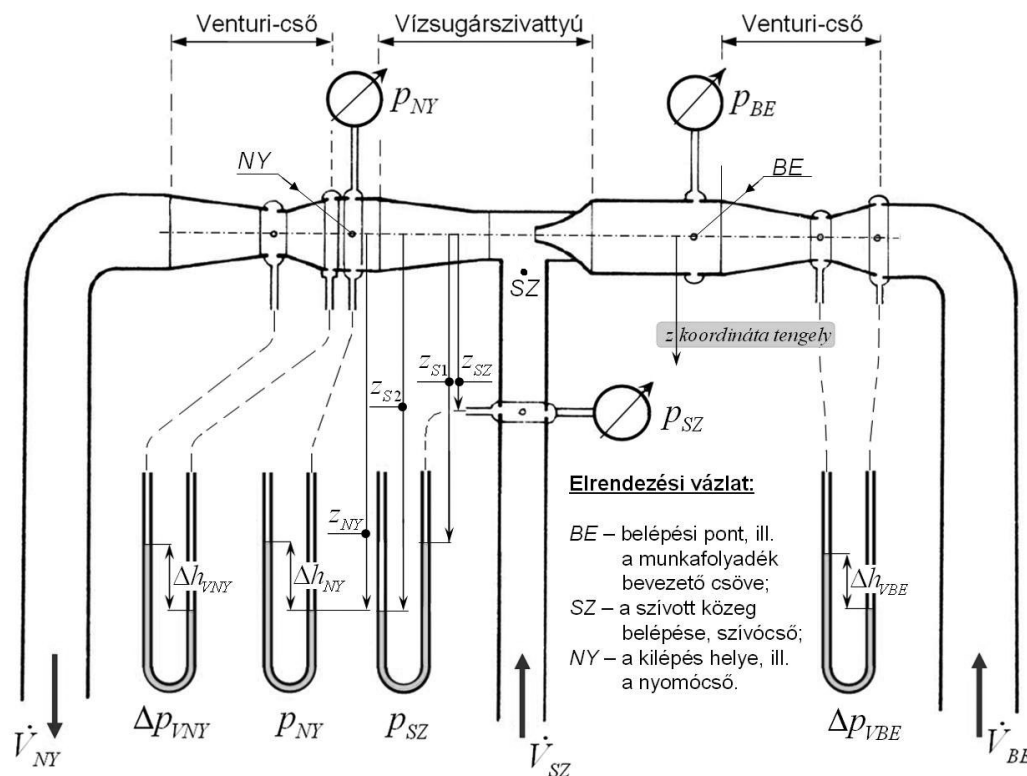
A felhajtóerő-tényező, az ellenálláserő-tényező, valamint a nyomatéki tényező jelleggörbéket az állásszög függvényében.



Á3. Vízszugárszivattyú üzemi jellemzőinek meghatározása

1. A mérés célja

A vízszugárszivattyú egy áramlástanai gép – ennek a mérésnek a végső célja ennek az áramlástanai gépnek a vizsgálata, cél azonban – az áramlástanai ismeretek elmélyítése érdekében – a nyomásmérés gyakorlása és az ezzel összefüggő hidrosztatikai feladatok megoldása; cél a fajlagos energiatartalom megállapítása, illetve ennek során a Bernoulli egyenlet alkalmazása; cél továbbá a térfogatáramok Venturi csővel történő mérési módjának megismerése és végül cél néhány, a vízszugárszivattyú működésére jellemző mennyiség megállapítása. A fentiek alapján e mérés megértése és elvégzése az áramlástant tanuló minden hallgató számára hasznos.



Á0.1. ábra

2. A mérés leírása

2.1. A mérőberendezés

A vízszugárszivattyúban (Á3.1. ábra) a nagy energiájú belépő közeg a fúvókán felgyorsulva magával ragadja a szivott közeget – így alakul ki a nyomócsőbeli eredő áramlás, melyben a munkavégző, belépő (primer) és a szivott (szekunder) közeg együtt áramlik tovább.

Már a bevezetőben leszögezhetjük, hogy a vízszugárszivattyú egy kisméretű, de nem túl jó hatásfokú berendezés, alkalmazása olyan esetekben indokolt, amikor elengedhetetlen a kis méret, de a működésre csak ritkán van szükség (pl. vészhelyzetben), vagy olyan speciális esetben, amikor valamely szállítási feladat (csak) így oldható meg.

A mérésen vizsgált berendezés munkaközege, szivott közege és a szállított közeg is víz. A „z” méreteket a pontozott vonaltól (lefele) mérjük. A környezeti nyomás p_0 , értéke állandó.

A továbbiakban három „pontot” („BE” – a munkafolyadék belépési pontja; „SZ” – a szivott közeg belépési pontja és „NY” – a munka és a szivott folyadék keverékének kilépési pontja)



vizsgálunk. Feltesszük, hogy a „BE” és az „NY” pont az ábrán pont-vonallal jelölt, vízszintes egyenesen helyezkedik el. Az „SZ” pont néhány milliméterrel lejjebb van, ott, ahol a magasságkülönbség még elhanyagolható, de a sebesség a mérés helyén (z_{SZ}) lévő sebességgel azonosnak vehető. A Venturi csövekben keletkező súrlódási veszteségtől eltekintünk.

A csőátmérő a „BE”, az „SZ” és az „NY” pontban: $d_{BE} = d_{SZ} = d_{NY} = 12[mm]$; illetve a Venturi csövek esetén a nagyobb átmérő: $d_a = 12[mm]$; és a kisebb átmérő: $d_b = 8[mm]$. A méréshez szükséges további méreteket a tényleges mérés során konkrétan le kell mérni!

2.2. Elvi alapok

A következőkben a fenti három pontban értelmezett nyomást, sebességet és fajlagos energiát határozzuk meg. Tekintsük először a „BE” pontot. A nyomás (p_{BE}) itt egyszerűen leolvasható a Bourdon csöves manométerről. A munkaközeg (víz) sebessége, a Venturi cső segítségével állapítható meg. Írjunk fel ehhez egy Bernoulli egyenletet, valamint a folytonosság tételét a jobb oldali Venturi cső bővebb (jele: „a”) és szűkebb (jele: „b”) keresztmetszete között:

$$\frac{c_a^2}{2} + \frac{p_a}{\rho_{\text{víz}}} = \frac{c_b^2}{2} + \frac{p_b}{\rho_{\text{víz}}} + \frac{\Delta p'}{\rho_{\text{víz}}} \quad \text{és} \quad c_a A_a = c_b A_b \quad (1)$$

Alakítsuk át (1)-et a folytonosság felhasználásával úgy, hogy csak a c_a sebesség (amit meg kell határoznunk, hiszen $c_{BE} = c_a$) szerepeljen benne:

$$\frac{c_a^2}{2} + \frac{p_a}{\rho_{\text{víz}}} = \frac{c_a^2}{2} \left(\frac{A_a}{A_b} \right)^2 + \frac{p_b}{\rho_{\text{víz}}} + \frac{\Delta p'}{\rho_{\text{víz}}}; \quad (\Delta p_{VBE} = p_a - p_b \quad \text{és} \quad \Delta p' \cong 0) \quad (2)$$

Innen – a súrlódási veszteséget nullának véve – a keresett sebesség kiszámítható:

$$\frac{c_a^2}{2} \left[\left(\frac{A_a}{A_b} \right)^2 - 1 \right] = \frac{\Delta p_{VBE}}{\rho_{\text{víz}}} \Rightarrow c_{BE} = c_a = \sqrt{2 \frac{\Delta p_{VBE}}{\rho_{\text{víz}} \left[\left(\frac{A_a}{A_b} \right)^2 - 1 \right]}} = \sqrt{\frac{(\rho_{HG} - \rho_{\text{víz}}) g \Delta h_{VBE}}{2.0313 \rho_{\text{víz}}}} \quad (3)$$

A (3) kifejezés végső alakjában a manométer kitérése (Δh_{VBE}) mellett a mérő (higany) és a mérendő (víz) folyadék sűrűség különbsége szerepel, hiszen a hidrosztatika tanítása szerint a nyomás különbséget a: $\Delta p_{VBE} = (\rho_{HG} - \rho_{\text{víz}}) g \Delta h_{VBE}$ képlettel számíthatjuk.

Ezzel a Bernoulli egyenlet alapján kiszámítjuk az ebben a pontban értelmezett, egységnyi tömegrre vonatkoztatott munkavégző képességet, illetve az áthaladó tömegáram segítségével a bevezetett teljesítményt határozhatjuk meg:

$$e_{BE} = \frac{c_{BE}^2}{2} + \frac{p_{BE}}{\rho_{\text{víz}}} \quad \text{és} \quad P_{BE} = e_{BE} \dot{m}_{BE} = e_{BE} \rho_{\text{víz}} \frac{d_{BE}^2 \pi}{4} c_{BE}; \quad (4)$$

Vizsgáljuk meg az „NY” pontbeli nyomást és sebességet. Ugyan itt is van nyomásmérő, de ehelyett a mérésre a pontosabb, „U” csöves manométert használjuk. A hidrosztatika tanítása szerint írható, hogy:

$$p_{NY} + \rho_{\text{víz}} g z_{NY} = p_0 + \rho_{HG} g \Delta h_{NY} \Rightarrow p_{NY} = p_0 + \rho_{HG} g \Delta h_{NY} - \rho_{\text{víz}} g z_{NY}; \quad (5)$$

A sebesség mérésekor, illetve számításakor az előzőekben már bemutatott Venturi mérőre vonatkozó számítást alkalmazzuk. A nyomó-oldali Venturi mérő geometriai méretei a belépő oldali mérőével azonosak, ezek szerint (3) kifejezés az indexek átírásával alkalmazható:



$$c_{NY} = \sqrt{2 \frac{\Delta p_{VNY}}{\rho_{v\acute{z}} \left(\left(\frac{A_a}{A_b} \right)^2 - 1 \right)}} = \sqrt{\frac{(\rho_{HG} - \rho_{v\acute{z}}) g \Delta h_{VNY}}{2.0313 \rho_{v\acute{z}}}} \quad (6)$$

Ismét a Bernoulli egyenlet alapján számítjuk ki az ebben a pontban értelmezett, egységnyi tömegre vonatkoztatott munkavégző képességet, illetve az áthaladó tömegáram segítségével a teljes kilépő teljesítményt határozhatjuk meg:

$$e_{NY} = \frac{c_{NY}^2}{2} + \frac{p_{NY}}{\rho_{v\acute{z}}} \quad \text{és} \quad P_{NY} = e_{NY} \dot{m}_{NY} = e_{NY} \rho_{v\acute{z}} \frac{d_{NY}^2 \pi}{4} c_{NY}; \quad (7)$$

Tekintsük harmadszorra az „SZ” pontot. Itt a nyomásmérés helye z_{SZ} mélységben van, az „SZ” pont alatt. A szívott közeg statikus nyomását a hidrosztatikai alapon számíthatjuk, ha feltesszük, hogy a sebesség a nyomásmérés helyén (z_{SZ} mélységben) és az „SZ” pontnál az átmérők egyenlősége miatt azonos (és ezért, az e két pontra felírt Bernoulli egyenletből kiesik!):

$$p_{SZ} + \rho_{v\acute{z}} g z_{S1} + \rho_{HG} g (z_{S2} - z_{S1}) = p_0 \Rightarrow \quad (8)$$

$$p_{SZ} = p_0 - \rho_{v\acute{z}} g z_{S1} - \rho_{HG} g (z_{S2} - z_{S1});$$

Figyelem: a p_{SZ} nyomásnak kisebbnek kell lennie a környezeti nyomásnál, különben nem indul meg a szívott közeg árama, illetve, amennyiben a p_{SZ} nyomás nem elég kicsi, akkor a szívott közeg oszlopa „megszakad”, a berendezésen csak a belépő közeg áramlik át. A (8) kifejezés használatakor ügyelni kell arra, hogy a fenti előjel használata esetén a $(z_{S2} - z_{S1})$ különbség számítandó és ez a különbség negatív is lehet, ha $z_{S2} < z_{S1}$, (ilyen esetben a manométer bal szárában áll a közeg magasabban). A szívott közeg sebességét jelöljük c_{SZ} -szel, ezt a folytonosság törvénye alapján számítjuk:

$$\dot{V}_{SZ} = \dot{V}_{NY} - \dot{V}_{BE} \Rightarrow c_{SZ} = c_{NY} - c_{BE}; \quad \text{hiszen} \quad A_{SZ} = A_{NY} = A_{BE}; \quad (9)$$

Végeredményben a Bernoulli egyenlet alapján számítjuk ki az ebben a pontban értelmezett, egységnyi tömegre vonatkoztatott munkavégző képességet, illetve az áthaladó tömegáram segítségével a teljes kilépő teljesítményt:

$$e_{SZ} = \frac{c_{SZ}^2}{2} + \frac{p_{SZ}}{\rho_{v\acute{z}}} \quad \text{és} \quad P_{SZ} = e_{SZ} \dot{m}_{SZ} = e_{SZ} \rho_{v\acute{z}} \frac{d_{SZ}^2 \pi}{4} c_{SZ}; \quad (10)$$

A vízsugárszivattyú működését a teljes szállított térfogat-árammal és az ahhoz tartozó szállítómagassággal jellemezhetjük:

$$\dot{V}_{NY} = \dot{m}_{NY} / \rho_{v\acute{z}} = \frac{d_{NY}^2 \pi}{4} c_{NY} \quad \text{és} \quad H_{NY} = e_{NY} / g; \quad (11)$$

A szívott közeg energia növekedésének felhasználásával kiszámíthatjuk a szívott közeg szállításához szükséges, hasznosnak tekintett teljesítményt:

$$P_H = (e_{NY} - e_{SZ}) \dot{m}_{SZ}; \quad (12)$$

A belépő közeg energia növekedésének felhasználásával pedig a bevezetett teljesítményt határozhatjuk meg:

$$P_B = (e_{BE} - e_{NY}) \dot{m}_{BE}; \quad (13)$$

E két teljesítmény hányadosát nevezzük a vízsugárszivattyú hatásfokának:

$$\eta = \frac{P_H}{P_B}; \quad (14)$$



3. A berendezés üzembe helyezése, a mérés végrehajtása

A méréshez először ellenőrizzük, hogy a szívó- és nyomócső fojtását biztosító szorító bilincsek (3,4) teljesen nyitott helyzetben vannak, majd indítsuk el a munkaközeget szállító tápszivattyút az 1-es kapcsoló felkapcsolásával. A szivattyú beindítása előtt győződjünk meg róla, hogy a 2-es fojtószelep teljesen zárt helyzetben van (nyugodtan kérjük a gyakorlatvezető segítségét a fojtószelep állásának megítélésében). A tápszivattyú beindítását követően a fojtószelepet lassan nyissuk, gondosan figyelve a munkaközeg nyomását mutató nyomásmérő műszert, mert a nyitás során a nyomás hirtelen jelenik meg rajta.

Miután a rendszert üzembe helyeztük, állítsunk be egy tápnyomást (pl. $0,1\text{MPa}$ -t, de maximum $0,2\text{MPa}$ -t). Ezután beállítjuk a szívócső fojtását úgy, hogy egy megfelelőnek ítélt szállított közeg-áram alakuljon ki. Ekkor esetleg bemutatható, hogy a szívócső fojtásának növelésével (a szívómagasság növelésével) a szívott közeg árama megszakítható.

A mérés során az indításkor beállított állapotból indulva, a nyomócső fojtásának növelésével 10 pont jellemzőit mérjük le. Minden pontban az alábbi értékeket mérjük és rögzítjük a jegyzőkönyv idevonatkozó táblázatába:

„BE” pont	„SZ” pont	„NY” pont
p_{BE} ;	p_{SZ} ; (manométerről)	p_{NY} ; (manométerről)
Δh_{VBE} ;	z_{S1} ;	z_{NY} ;
	z_{S2} ;	Δh_{NY} ;
		Δh_{VNY} ;

A mért értékeket a mellékelt jegyzőkönyv ide vonatkozó táblázatában kell rögzíteni.

A mérés végeztével állítsuk a szívó- és nyomócső fojtását biztosító szorítóbilincseket (3,4) teljesen nyitott helyzetbe, majd a 2-es fojtószelepet zárjuk el. Ezt követően kapcsoljuk ki az 1-es kapcsolóval a tápszivattyút.

4. Értékelés

Minden mérési pontra határozzuk meg a következőket:

1. A Venturi mérőkön mért nyomáskülönbségek alapján a „hiteles” diagramokról olvassuk le az egyes mérők térfogatáramait. Határozzuk meg a szívott ág térfogatáramát is.
2. Határozzuk meg a folyadék áramlási sebességet az egyes ágakban.
3. Határozzuk meg az egységnyi tömegre vonatkoztatott munkavégző képességet, valamint a teljesítményeket.
4. Határozzuk meg a szivattyú hatásfokát.
5. Értékeljük a mérést.

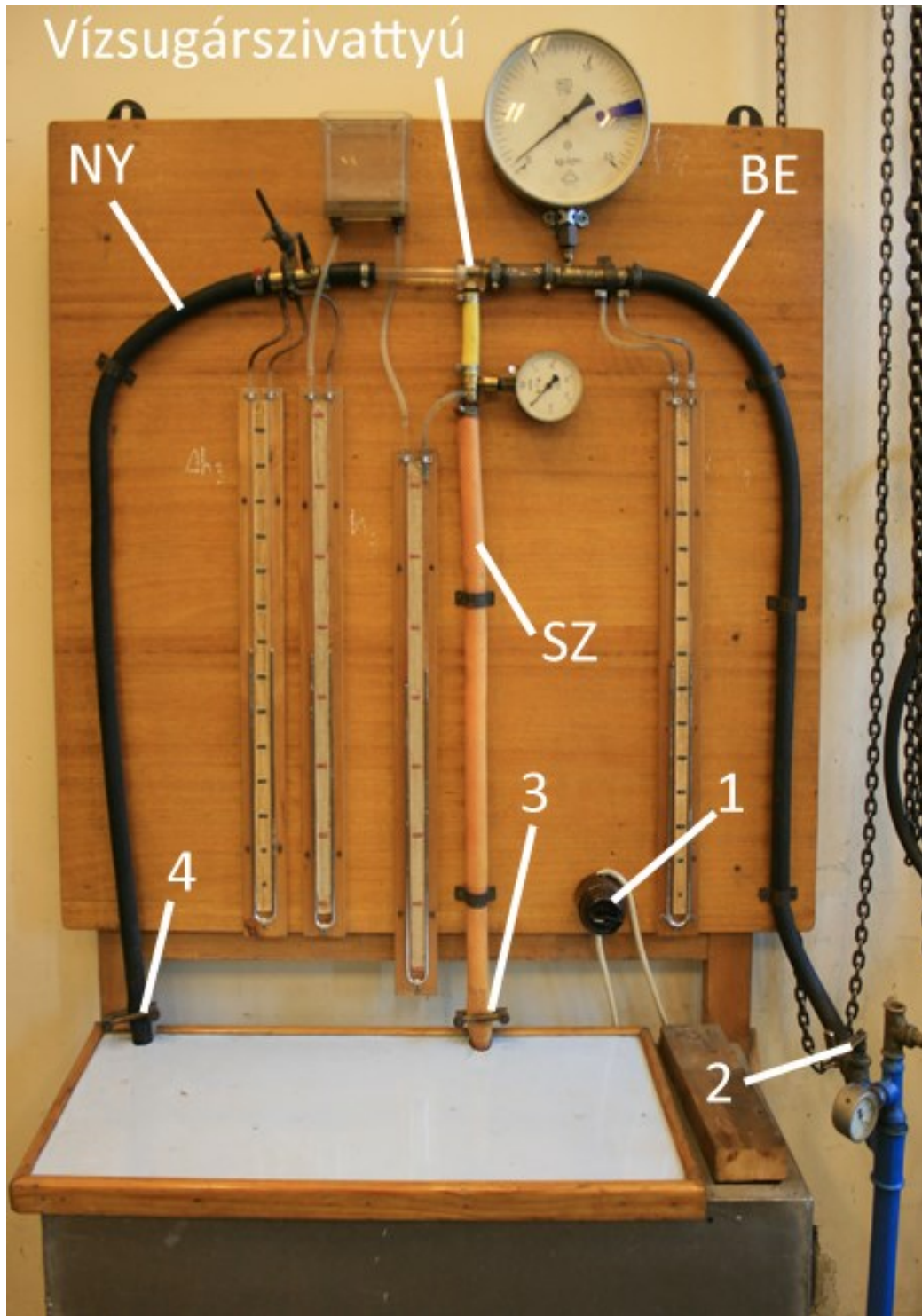
A számított eredményeket a mellékelt jegyzőkönyv ide vonatkozó táblázatába kell beírni.

5. A jegyzőkönyv

A jegyzőkönyv tartalmazza a mért és számított eredményeket, valamint a térfogatáram függvényében ábrázolt tömegegységre vonatkoztatott munkavégző képességek diagramját.



6. Melléklet



Á4. Egyenes cső súrlódási tényezőjének, ívdarab és szelep veszteségtényezőjének kísérleti meghatározása

1. A mérés célja

Egyenes cső súrlódási tényezőjének, ívdarab és szelep veszteségtényezőjének kísérleti meghatározása a mérés célja.

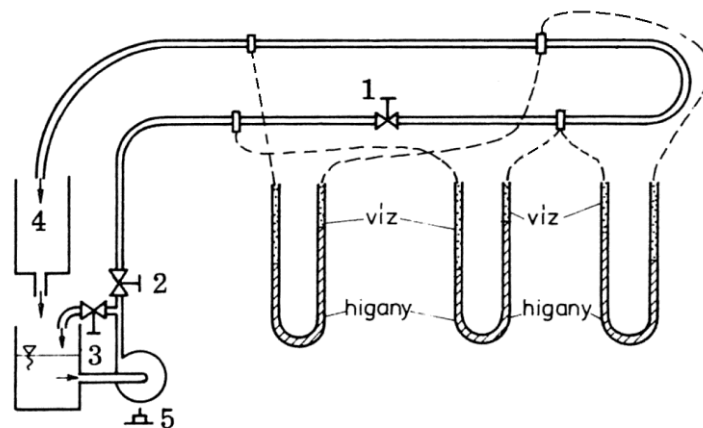
2. A méréshez áttanulmányozandó anyag

A Műszaki Hő- és Áramlástan c. jegyzet 14.5 és 14.6 fejezete.

3. A mérés leírása

3.1. A mérőberendezés

A mérőberendezés elvi rajza az Á4.1. ábrán látható. A vizsgálandó csővezetékbe egy villamos motorral hajtott szivattyú nyomja a vizet. A csővezeték négy helyén furatok kerültek kialakításra, a szomszédos furatok közötti nyomáskülönbség (nyomáskereső) meghatározására három U-csöves manométer szolgál.



- 1 vizsgálandó szelep
- 2 vízmennyiséget szabályozó szelep (fojtással)
- 3 vízmennyiséget szabályozó szelep (megcsapolással)
- 4 közbőzőtartály
- 5 a motort indító kapcsoló (a motor alaplemezén)

Á0.1. ábra

Adatok:

Az egyenes cső mérőszakaszának hossza $l_1 = 1000$ mm. Az ívdarab előtti és mögötti megcsapolások közötti csőhosszúság $l_2 = 1520$ mm. A szelep előtt és után elhelyezett mérőfuratokig a cső hossza egyaránt $l_3 = 550$ mm. A cső belső átmérője 8 mm.

3.2. A mérés elve és a felhasználandó összefüggések

A valóságos közeg áramlásánál a súrlódási munka miatt nyomásvesztés lép fel, ami a cső hosszával egyenes arányban változik:

$$\Delta p' = \frac{\rho}{2} \cdot c^2 \cdot \lambda \cdot \frac{l}{d}$$



ahol

$\Delta p'$	a nyomásveszteség [Pa]
ρ	az áramló közeg sűrűsége [kg/m ³]
c	a folyadék átlagsebessége a csőben
λ	a csősúrlódási tényező (dimenzió nélküli)
ℓ	a vizsgált cső hossza [m]
d	a cső belső átmérője [m]

A folyadék átlagsebessége az időegység alatt átáramló q_v [m³/s] térfogatáramból és a cső $A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4}$ [m²] keresztmetszetéből a $c = \frac{q_v}{A}$ képlettel számíthatunk ki.

Az egyenes cső súrlódási tényezője a Reynolds-számnak, a felület érdességének és az áramlás jellegének (lamináris vagy turbulens) függvénye. Ha a Reynolds-szám 2320 értéknél kisebb, akkor az áramlás lamináris és a felület érdessége nem befolyásolja a súrlódási tényező értékét. Ez esetben tehát a súrlódási tényező csak a Reynolds-szám függvénye (az összefüggés levezethető):

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$$

Különleges viszonyok között 2320 értéknél nagyobb Reynolds-szám esetén is létrejöhet réteges (lamináris) áramlás. Ilyen esetekben azonban a legkisebb zavarás is előidézi a koncentrikus rétegekben áramló folyadék keveredését, s gomolygó (turbulens) áramlás alakul ki. Ez a jelleg a zavarás után is megmarad.

Turbulens áramlás esetén is a fal mellett egy vékony, úgynevezett fali (határ-) réteg alakul ki, amelyben az áramlás lamináris marad. Ez a fali réteg a Reynolds-szám növekedésével vékonyodik. Amíg a csőfal felületének egyenetlenségei nem állnak ki a határrétegből, az érdesség nem befolyásolja az áramlási veszteséget. Így egy kritikus Reynolds-szám értékig a cső hidraulikailag simának tekinthető.

A hidraulikailag sima cső súrlódási tényezője csak a Reynolds-szám függvénye (Á0.3. ábra). A diagram bármely folyadéknál használható.

Hidraulikailag érdes csövek esetén, azaz ha a fal egyenetlenségei kinyúlnak a határrétegből, a csősúrlódási tényező a Reynolds-szám függvényében nem változik, értéke csak a csőfal úgynevezett relatív érdességétől, az $\frac{r}{k}$ viszonyozámtól függ, ahol r a cső belső sugara, a k a fal egyenetlenségeinek a csőfalra merőleges, átlagos mérete.

A csősúrlódási tényező változását az elméleti és kísérleti vizsgálatok eredményei alapján készült diagramban láthatjuk (Á0.3. ábra).

Az ívdarabban a sebesség eloszlásának jellege hasonló a súrlódásmentes folyadékban keletkező forgatagban kialakuló sebességeloszláshoz, melynél a sugár és a helyi kerületi sebesség szorzata állandó, azaz a sebesség eloszlása hiperbolikus. Az ívdarab belső fala közelében az átlagosnál nagyobb sebességek alakulnak ki, a külső közelében pedig kisebbek. Ezért nyomáskülönbség van a belső és külső fal menti térrészben. Emiatt másodlagos áramlás, örvénylés keletkezik, amelynek létrehozásához szükséges energia a csővezetékben a súrlódás miatt jelentkező nyomásveszteség mellett további nyomásveszteséget eredményez.

A nyomásveszteség:

$$\Delta p' = \frac{\rho}{2} \cdot c^2 \cdot \zeta_{iv}$$

A ζ_{iv} veszteségtényező értéke a cső görbületi sugarának az átmérőhöz viszonyított értékétől, az ív központi szögétől és a Reynolds-számtól függ.

A zárószerkezetek (csap, tolózár, szelep) nyomásveszteségét



$$\Delta p' = \frac{\rho}{2} \cdot c^2 \cdot \zeta$$

alakban szokták felírni, ahol

- c a zárószerkezethez csatlakozó csőben kialakuló átlagsebesség [m/s]
 ζ a veszteségtényező (dimenzió nélküli)

A veszteségtényező értéke a zárószerkezet nyitottságának mértékétől és a Reynolds-számtól függ.

3.3. Mérőeszközök, üzembe helyezés, mérés

A csővezetéken átáramló vízmennyiséget köbözéssel határozzuk meg. A nyomáskülönbséget differenciál-manométerrel mérjük.

Az üzembe helyezéshez az 5 kapcsoló bekapcsolásával elindítjuk a szivattyút, majd a 2 szelep lassú nyitásával megindítjuk az áramlást a csővezetékben.

A mérés során három különböző nyomóági fojtószelep (2) állás mellett három-három mérendő szelepállást állítunk be. Ezek során rögzíteni kell az egyes manométerek kitéréseit, valamint köbözéssel meg kell állapítani a térfogatáramot. Ehhez a 4 köbözőtartály oldalán elhelyezett milliméterpapír, szintén a 4 tartályon megtalálható, 1 mm folyadékmagassághoz tartozó térfogat, valamint stopper szükséges.

A minden mérés során szükséges a víz hőmérsékletének mérése is, a 4 tartályba lógatott bothőmérő leolvasásával.

Az adatokat a mellékelt jegyzőkönyv megfelelő táblázatában kell rögzíteni.

4. Értékelés

A számítandó mennyiségek:

1. a 8 mm belső átmérőjű csőben kialakuló átlagsebesség
2. a Reynolds-szám
3. az egyenes csőszakasz nyomásesése
4. a csősúrlódási tényező
5. az ívdarab többlet nyomásesése
6. az ívdarab veszteségtényezője
7. a szelep nyomásesése
8. a szelep veszteségtényezője

Az áramló vízmennyiség a $q_v = \frac{h \cdot a}{t}$ képlettel számítható, ahol h a mért folyadékmagasság a köbözőtartályban [m], "a" a tartályállandó (a felszín területe) [m²] és t a mért időtartam [s].

Az átlagsebesség ennek ismeretében $c = \frac{q_v}{A}$, ahol A a cső keresztmetszete [m²]. A Reynolds-szám $Re = \frac{c \cdot d}{\nu}$. Az egyes csőszakaszok nyomásesése

$$\Delta p'_m = \Delta h \cdot g \cdot (\rho_{Hg} - \rho_{viz})$$

A Reynolds-számhoz szükséges kinematikai viszkozitás (ν) és a víz hőmérsékletfüggő sűrűsége a megtalálható a Á4.1. táblázatban.

Az egyenes csőszakasz mért nyomáseséséből a csősúrlódási tényező a következő összefüggésből számítható:



$$\lambda = \frac{2}{\rho} \cdot \frac{d}{l_1} \cdot \frac{\Delta p'_{m1}}{c^2}$$

Az ívdarab többlet nyomásesése az íveltség miatt

$$\Delta p'_{iv} = \Delta p'_{m2} - \frac{\rho}{2} \cdot c^2 \cdot \lambda \cdot \frac{l_2}{d}$$

Az ívdarab veszteségtényezője

$$\zeta_{iv} = \frac{2 \cdot \Delta p'_{iv}}{\rho \cdot c^2}$$

A szelep közvetlen környezetében a csővezetékben rendezetlen az áramlás. Ezért a nyomáskülönbséget mérő differenciál-manométer két ágát a szelep előtt és mögött l_3 távolságban csatlakoztatjuk a csővezetékhez. Így a szelep nyomásvesztésének és két, l_3 hosszúságú csőszakasz nyomásvesztésének összegét mérjük. Ebből a szelep nyomásvesztése

$$\Delta p'_{sz} = \Delta p'_{m3} - \frac{\rho}{2} \cdot c^2 \cdot \lambda \cdot \frac{2 \cdot l_3}{d}$$

A szelep veszteségtényezője

$$\zeta_{sz} = \frac{2 \cdot \Delta p'_{sz}}{\rho \cdot c^2}$$

A számított adatokat a mérési jegyzőkönyv ide vonatkozó táblázatában kell rögzíteni.

Hőmérséklet	Édesvíz		Tengervíz 3,5% sótartalommal	
	ρ	$10^6 \cdot \nu$	ρ	$10^6 \cdot \nu$
°C	$\frac{kg}{m^3}$	$\frac{m^2}{s}$	$\frac{kg}{m^3}$	$\frac{m^2}{s}$
0	999,9	1,787	1028,1	1,828
2	1000,0	1,670	1028,0	1,713
4	1000,0	1,566	1027,9	1,609
6	1000,0	1,471	1027,6	1,516
8	999,9	1,385	1027,3	1,431
10	999,7	1,306	1027,0	1,354
12	999,5	1,235	1026,7	1,283
14	999,2	1,170	1026,2	1,219
16	999,0	1,110	1025,8	1,159
18	998,6	1,055	1025,3	1,104
20	998,2	1,004	1024,8	1,054
22	997,8	0,957	1024,2	1,007
24	997,4	0,913	1023,6	0,963
26	996,9	0,873	1023,0	0,923
28	996,3	0,836	1022,4	0,885
30	995,7	0,801	1021,8	0,850

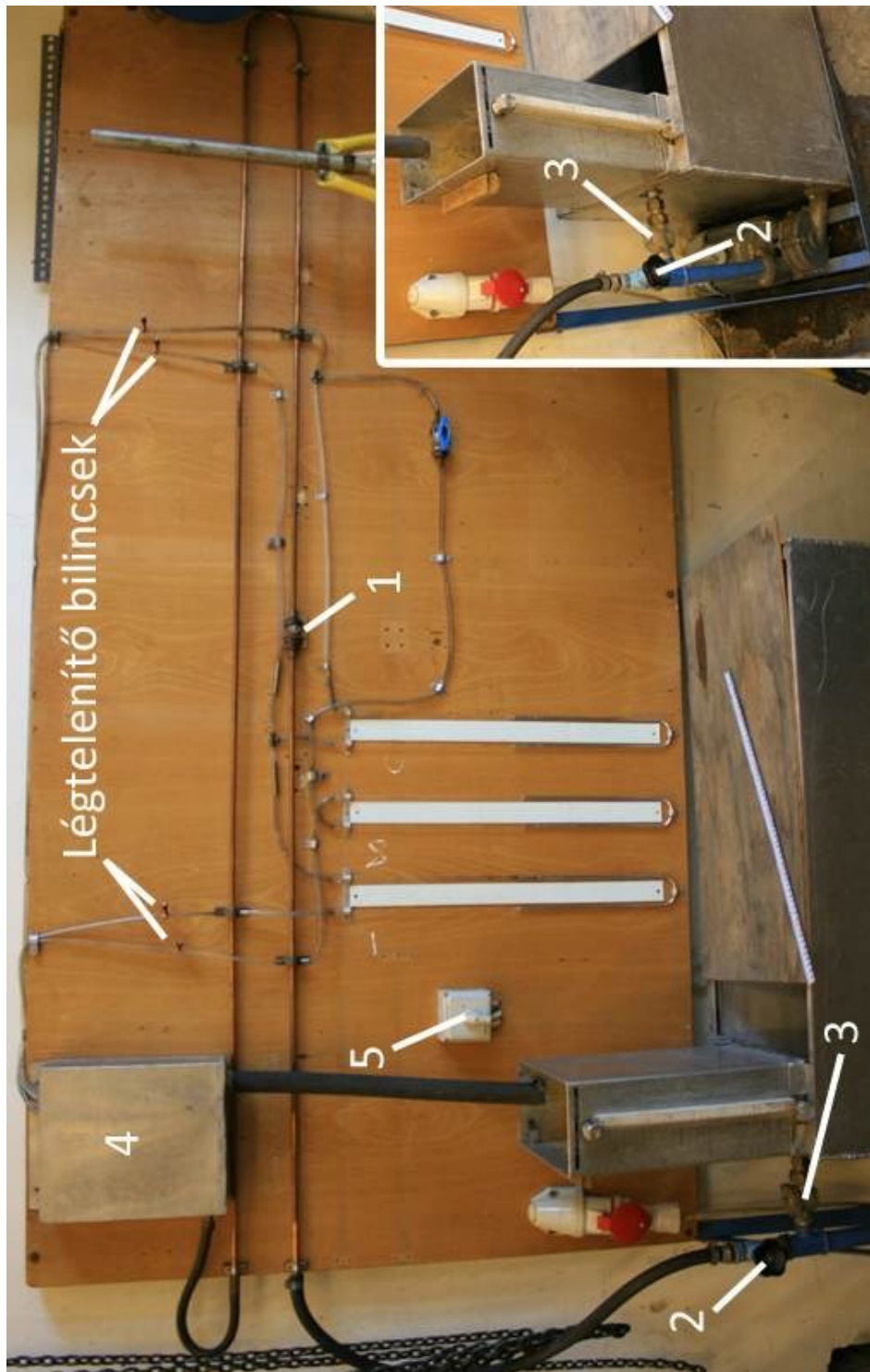
Á0.1. táblázat



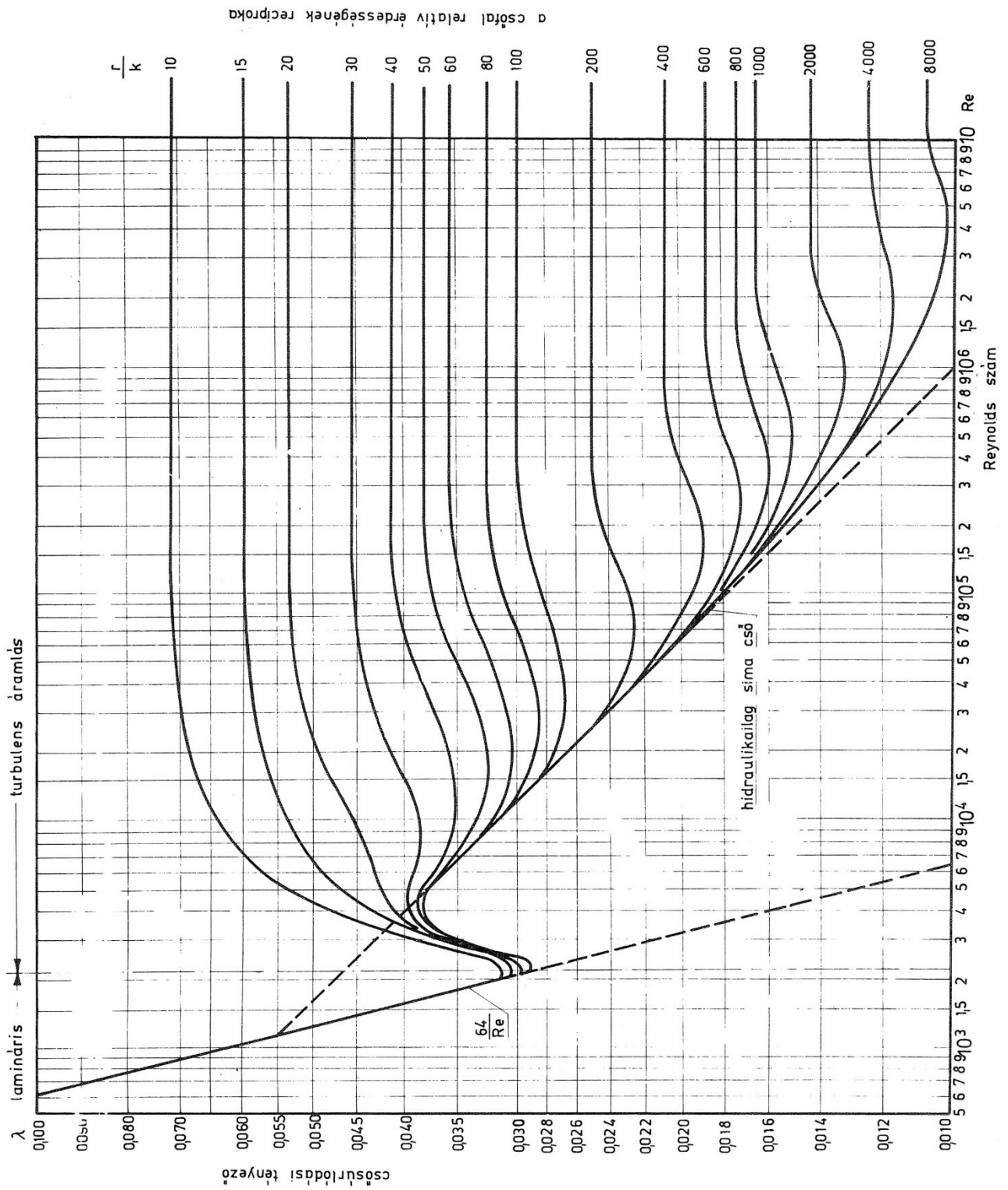
5. A jegyzőkönyv

A jegyzőkönyv tartalmazza a mért és számított eredményeket, valamint a Reynolds-szám függvényében ábrázoljuk a csősúrlódási tényezőt, az ívdarab és a szelep veszteségtényezőjét logaritmikus diagramban.

6. Melléklet



Á0.2. ábra



Á0.3. ábra

