

## H08 HATÁRRÉTEG SEBESSÉGPROFIL MÉRÉSE TÉGLALAP KERESZTMETSZETŰ CSATORNÁBAN

### 1. Elméleti bevezető:

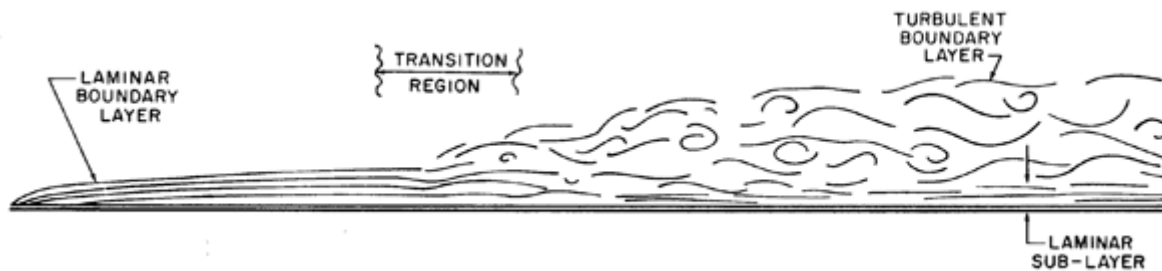
Határréteg alatt a viszkózus áramló folyadéknak azt a szilárd felület melletti rétegét értjük, amelyen belül a folyadék sebessége a felület sebességéről a felülettől távolabbi sebességre változik [1]. Prandt megállapítása szerint ugyanis ez egy aránylag vékony rétegen belül rohamosan megy végbe. Ezen a rétegen kívül a folyadék súrlódásmentesnek tekinthető.

A határrétegen belül is megkülönböztetünk lamináris és turbulens áramlást, tehát van lamináris és turbulens határréteg. A határréteg minőségét itt is elsősorban a Reynolds szám értéke dönti el. Határréteg esetén a Reynolds szám az alábbi képlet szerint értelmezhető:

$$Re_x = \frac{v_\infty x}{\nu}$$

Ahol  $v_\infty$  az áramlási sebesség a határrétegen kívül,  $x$  a belépőéltől mért távolság és  $\nu$  a kinematikai viszkozitás. Állandó  $v_\infty$  áramlási sebességű áramlásban az áramlás irányába helyezett síklap mindkét oldalán a határréteg lamináris marad ha  $Re_x < 8.4 \times 10^4$  akkor is, ha a  $v_\infty$  sebességű áramlás erősen turbulens.  $Re_x > 8.4 \times 10^4$  esetén a határréteg lehet lamináris, vagy turbulens, de  $Re_x \sim > 5 \times 10^5$  esetén a fal közvetlen közelében elhelyezkedő vékony rétegtől eltekintve már biztosan turbulens. A határréteg átmenetet többek között befolyásolja a nyomás gradiense, a felület érdessége, a hőátadás, és a főáramlás turbulencia foka.

Vastagsággal bíró testek esetén ez a határátmenet késleltethető amennyiben a felület megfelelő simaságú és az áramlás sebessége a főáramban az áramlás irányában nő (konfúzoros áramlás).



Lamináris határréteg esetén a  $v_x$  áramlás irányú sebességkomponens sebesség falra merőleges irányú eloszlása a határrétegen belül, illetve a határréteg vastagsága a Navier-Stokes-egyenlet segítségével számolható, ahol az alábbi feltételezésekkel szoktunk élni:

- A határréteg áramlás sík áramlás
- a sebesség fallal párhuzamos komponense sokkal nagyobb, mint a falra merőleges komponens
- a sebesség falra merőleges komponensének megváltozása sokkal rohamosabb, mint a fallal párhuzamos változás
- az áramlás állandósult (stacionárius)
- a térerő hatását elhanyagoljuk.

- és bár a fentiekből következik, érdemes kiemelni, hogy a nyomás a határrétegben a falra merőlegesen nem változik, és megegyezik a szabad áramlásban mérhető nyomással az adott  $x$  pontban.

Ekkor

$$\frac{v_x}{v_\infty} \cong 1.5 \frac{y}{\delta} - 0.5 \left( \frac{y}{\delta} \right)^3$$

ahol  $y$  a faltól mért távolság és  $\delta$  a határréteg vastagsága, amely az alábbi összefüggéssel közelíthető:

$$\frac{\delta}{x} \cong \frac{5}{\sqrt{Re_x}}$$

Turbulens határréteg esetén a fenti jellemzők meghatározásához felhasználjuk a Prandtl-féle keveredési úthossz modellt és alkalmazzuk Prandtl közelítő föltevéseit melyek szerint:

- a fal közvetlen közelében az  $l$  keveredési úthossz zérus és a faltól távolodva  $y$  függvényében lineárisan nő, vagyis
 
$$l \cong \kappa y$$
- A fal közvetlen közelében a csúszatófeszültség állandó és egyenlő a falon ébredő  $\tau_0$  fali csúszató feszültséggel.
- a falnál  $\frac{\partial v_x}{\partial y} > 0$

ekkor

$$\frac{v_x}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{yu^*}{\nu} + K$$

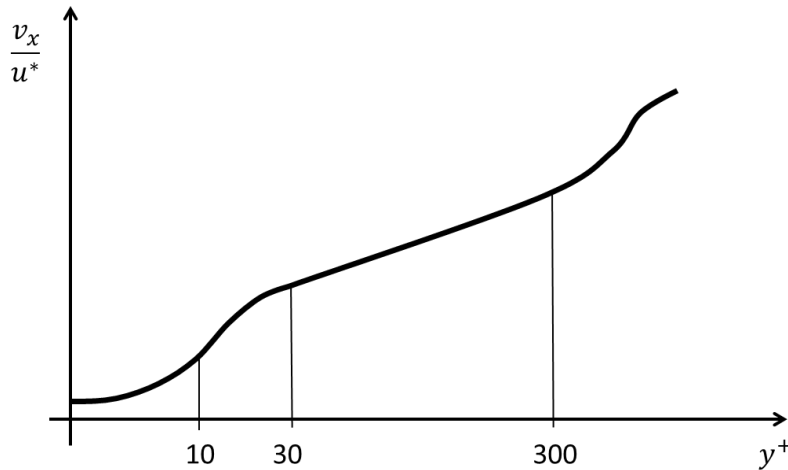
ahol  $u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$  az ún. súrlódási sebesség  $\rho$  sűrűségű közeg esetén és  $K$ =állandó. A fenti összefüggést univerzális (logaritmikus) faltörvénynek nevezzük. Kísérletek alapján az összefüggés állandóira  $\kappa = 0.41$  és  $K = 5$  értékek adódtak.

A fal közvetlen közelében a fal megakadályozza az örvények keletkezését. A határréteg ezen részét viszkózus (vagy lamináris) alaprétegnek nevezzük. Itt a sebességmegoszlást a

$$\frac{v_x}{u^*} = \frac{yu^*}{\nu}$$

összefüggés írja le.

Az  $y^+ = \frac{yu^*}{\nu}$  dimenziótalan falvastagságot bevezetve a lamináris alapréteg  $y^+ < 10$  tartományba esik, az univerzális faltörvény érvényességi tartománya pedig  $30 < y^+ < 300$ . A határréteg külső  $300 < y^+$  részein a sebességmegoszlás leírására különböző félempirikus, vagy empirikus összefüggések szolgálnak.



Síklap esetén a határréteg vastagsága a következő képlettel közelíthető:

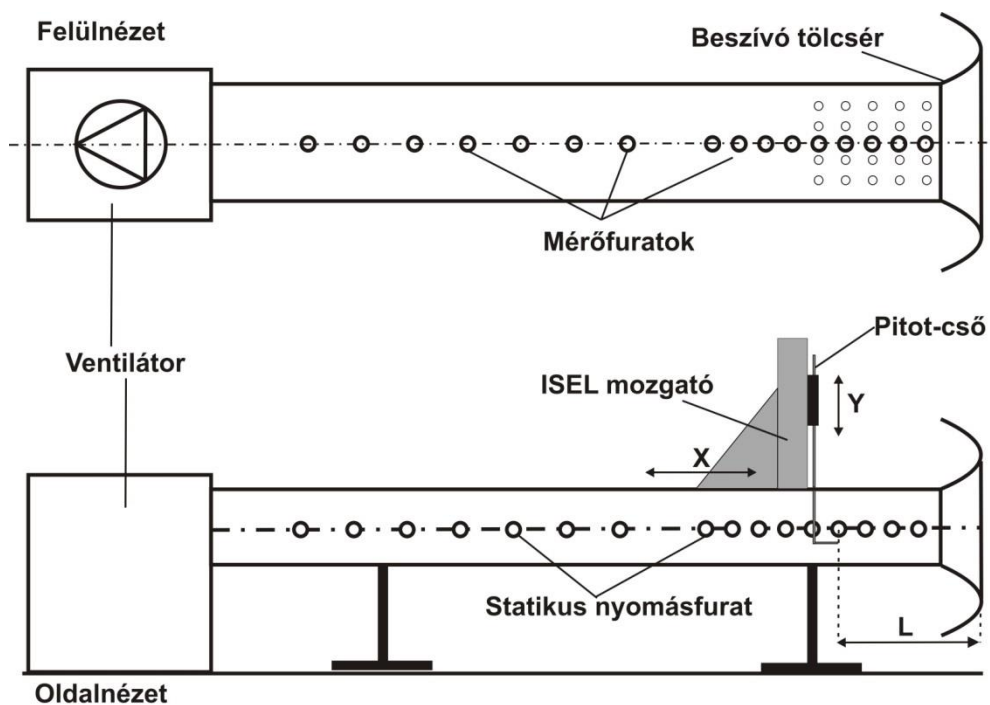
$$\frac{\delta}{x} \cong \frac{0.14}{\sqrt[7]{Re_x}}$$

## 2. A mérés célja:

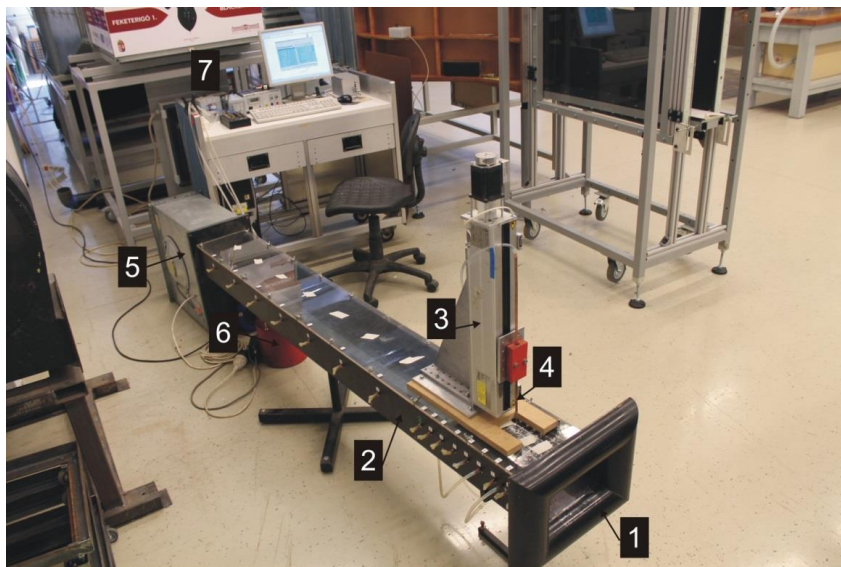
A határréteget egy téglalap keresztmetszetű csatornában vizsgáljuk Pitot cső segítségével. Az itt kialakuló határréteg több szempontból különbözik az áramlásba helyezett síklapon kialakuló határrétegtől. A belépő keresztmetszetre illesztett beszívó tölcser és a csatorna belépője közötti átmenetnél az áramlás leválhat így a belépés nem ideális, valamint a vastagodó határréteg miatt a belépéstől távolodva a főáramlás keresztmetszete csökken így az áramlás sebesség fokozatosan nő és ezzel együtt a statikus nyomás csökken, vagyis az áramlás konfúzoros. Mindezeket figyelembe véve a mérés során vizsgáljuk, hogy az adott körülmények között érvényesek e az elméleti bevezetőben megfokalmazott megfigyelések illetve a felírt összefüggések.

## 3. Mérés leírása

A légcatornát és a hozzá kapcsolódó mérőrendszert az 1. és 2. ábrák szemléltetik. A légcatornán (2) át a levegőt egy radiális ventilátor (5) segítségével áramoltatjuk, a beszívás egyenletesítést a csatorna elején található beszívó elemmel (1) oldjuk meg, amely beszívó elemmel a térfogatáram mérhető. A térfogatáramot a ventilátorhoz tartozó toroid transzformátor (6) segítségével állíthatjuk. A csatorna maximális sebessége 10m/s. A mérés során a megfelelő térfogat áram beállításakor célszerű figyelembe venni, hogy a sebesség meghatározását hogyan befolyásolja a nyomásmérés pontossága. A választott térfogatáram mellett a mért nyomás érték relatív hibája ne haladja meg az 5%-ot.



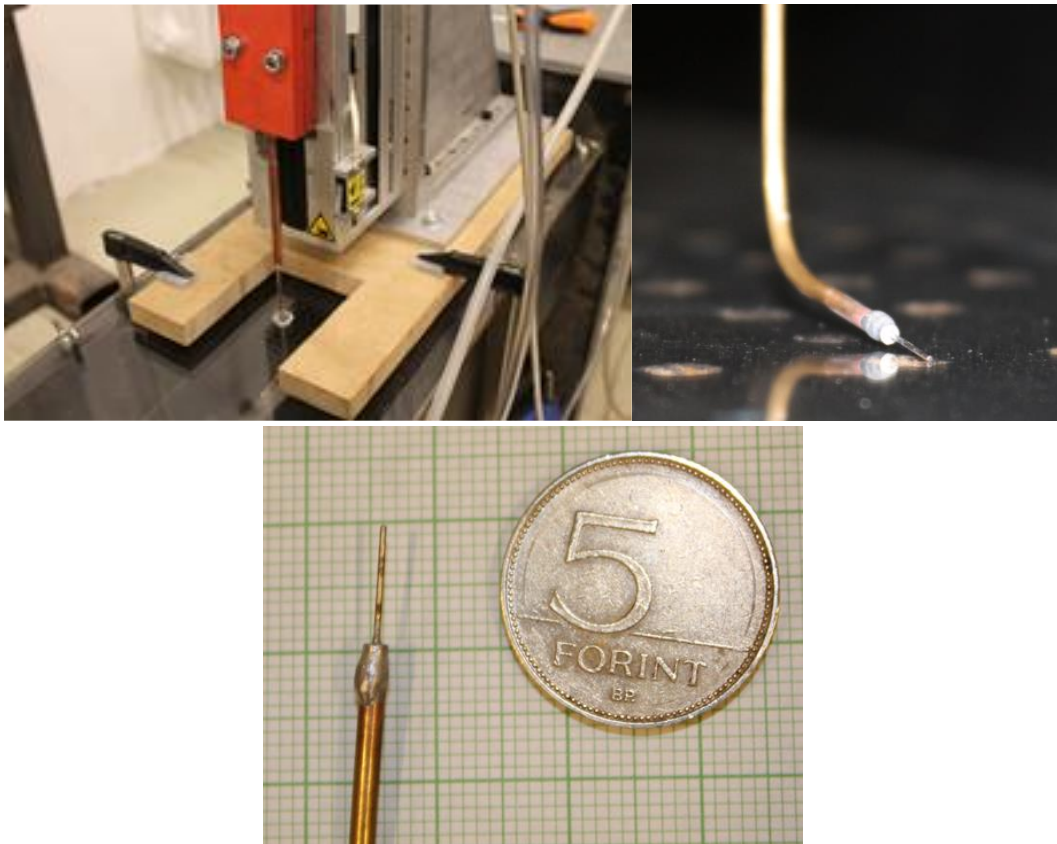
1. ábra : A mérési elrendezés



2. ábra Mérőberendezés főbb egységei: 1. Beszívó tölcser, 2. 100x200 mm Légszatorna, 3. Mozgató egység, 4. Pitot-cső, 5. Ventilátor, 6. Toroid transzformátor, 7. Mérőegység

A határréteg mérés során a beszívástól  $L$  távolságban kialakult sebességprofil Pitot-csővel és az oldalfalon elhelyezett statikus nyomásfuratok különbségeként mért dinamikus nyomás segítségével határozhatjuk meg. A Pitot-csövet egy automatikus traverz mechanizmussal

mozgatjuk az áramlási irányra merőleges  $Y$  irányban. Az ISEL gyártmányú mozgatóegység legkisebb léptetési hossza 0.2 mm. A megfelelő felbontáshoz a hallgató a mérés során a korábbi tanulmányai alapján állítja be a szükséges felbontást.

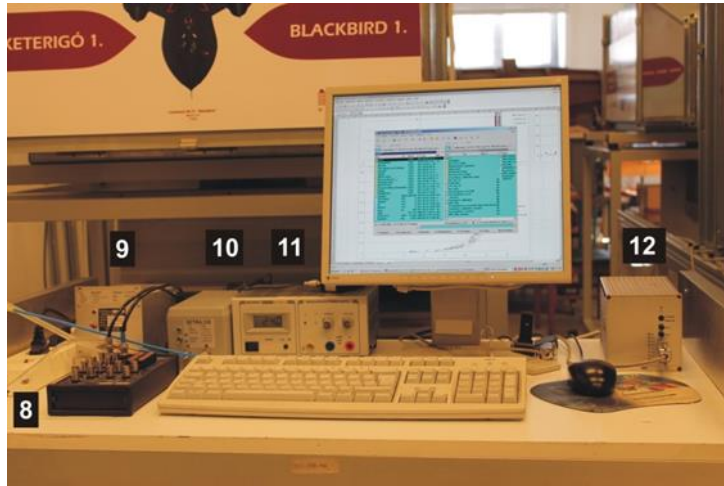


3. ábra Pitot-cső

A sebességprofil meghatározásához a mérőszondát a megfelelő furaton keresztül a csatornába helyezzük. Ezt követően oldjuk a 3. ábrán látható piros színű szondatartót, és az ISEL mozgató egységet végállásba állítjuk. Ezután a Pitot-csövet megfelelő irányban a szondatartóba rögzítjük, úgy hogy annak legkisebb átmérőjű szondavége a falat éppen érintse (lásd 3. ábra). Ezt követően a beállított függőleges menti pontokban és a szoftverben beállított mintavételezési frekvencián a profilt lemérjük. Miután a mérőszoftver programja lefutott, kivesszük a szondatartóból a Pitot-csövet, az egész mozgatót kézzel a következő furathoz igazítjuk, ahol megismételjük a mérést. Figyelem! A 3. ábrán látható, hogy a Pitot-cső vége nagyon vékony. annak érdekében, hogy a néhány mm vastagságú határrétegbe bele tudjunk mérni, ezért kérjük, szonda mozgatása, különösképpen a csatornából való ki- és behelyezése során fokozottan ügyeljen annak épségére!

A méréshez Setra típusú nyomás távadókat használunk (4. ábra). A referencianyomást folyamatosan rögzítjük, amely lehetővé teszi a későbbi dimenziótanítást, illetve a ventilátor munkapontjának változása miatti hatások korrigálását. A két nyomástávadó jeleinek feldolgozását és a traverz vezérlését az Áramlástan Tanszéken kifejlesztett Pressure and Force 3.38-as szoftver segítségével végezzük. A mérés során lehetőség van az eredmények ASCII formátumú rögzítésére a későbbi értékeléshez.





4. ábra Jelfeldolgozó egység: 8. adatgyűjtő, 9. 10. Setra nyomástávadók,  
11. Setra tápegység, 12. ISEL mozgató tápegység

A megfelelő felbontáshoz egy sebességprofil esetén legalább 60 mérési pont javasolt.

A térfogatáram meghatározásához kalibrálni kell a beszívó tölcserőt. Valamint el kell végezni a Setra nyomástávadók kalibrációját a Pressure and Force 3.38-as program segítségével, a Betz manométert referencia műszerként felhasználva.

#### 4. Kiértékelés:

Logaritmikus faltörvény állandóinak meghatározása (ellenőrzése)

Az elméleti bevezetőben felírtuk a logaritmikus faltörvényt

$$\frac{v_x}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{yu^*}{\nu} + K$$

ahol most a  $K$ =konstans értékét keressük. Kármán konstansra az irodalomban szokásos  $\kappa = 0.41$  értéket vesszük. Az egyenletben szereplő  $u^*$  súrlódási sebesség meghatározáshoz feltesszük, hogy a falakon állandó a csúsztató feszültség, ami így a nyomásesésből meghatározható:

$$\tau_0 = \frac{A}{K_n} \frac{\partial p}{\partial x} \cong \frac{A}{K_n} \frac{\Delta p}{L}$$

Ahol  $A$  a csatorna keresztmetszete,  $K_n$  a csatorna keresztmetszetének „nedvesített” kerülete  $\Delta p$  a nyomásesés a csatorna  $L$  hosszúságú szakaszán. A fentiek ismeretében  $K$  értéke meghatározható.

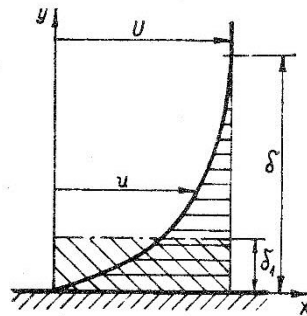
Határréteg vastagságának meghatározása

A  $\delta$  határréteg vastagság meghatározásához keressük azt a pontot, ahol az áramlás sebessége kevesebb, mint 1%-kal tér el a zavartalan áramlásban mérhető  $v_\infty$  sebességtől, vagyis  $v_x \geq 0.99v_\infty$ .

Pontosabban definiálható a határréteg vastagságára jellemző ún.  $\delta_1$  kiszorítási vastagság:

$$\delta_1 = \frac{1}{v_\infty} \int_0^\infty (v_\infty - v_x) dy \cong \frac{1}{v_\infty} \int_0^\delta (v_\infty - v_x) dy$$

Vagyis az a méret, amellyel vastagabb test ideális (súrlódásmentes) folyadékban ugyan olyan áramképet adna, mint az adott test viszkózus folyadékban a határreteken kívül.



Továbbá definiálható az ún.  $\delta_2$  impulzus vastagság:

$$\delta_2 = \frac{1}{v_\infty^2} \int_0^\infty (v_\infty - v_x)v_x dy \cong \frac{1}{v_\infty^2} \int_0^\delta (v_\infty - v_x)v_x dy$$

Vagyis amennyivel az alaplapot elmozdítva a súrlódásmentes áramlás impulzusáram vesztesége megegyezne a határretegben valós közeg áramlásakor létrejövő veszteséggel.

A mérés kiértékelésekor határozza meg a fent definiált határreteg vastagságokat és hasonlítsa a össze a az elméleti bevezetőben meghatározott síklapra számított eredményekkel! Vizsgálja meg, hogy a határreteg vastagság meghatározására szolgáló összefüggés állandójának változtatásával illeszthető e az összefüggés a mért eredményekre!

## 5. Az elvégzendő feladatok összefoglalva

1. A Setra nyomástávadók kalibrációja
2. A beszívó elem kalibrációja TSI Prandtl csővel és körvezetékkel
3. Az ISEL mozgató pályának megírása, mérőpontok felvétele
- 4.(A) A sebességprofilok mérése az 1.-9. furat közül minimálisan 4 pontban, illetve 10.-16-ig minimálisan 2 pontban
- 4.(B) Sebességprofilok keresztirányú eloszlásának vizsgálata 1.-9. furat közül kettőben 3 különböző oldaltávolságú pontban
- 4.(C) Botlódrót által keltett zavarás hatásának a vizsgálata sebességprofilok mérésével az 1.-9. furat közül minimálisan 4 pontban, illetve 10.-16-ig minimálisan 2 pontban
5. Kiértékelés az elméleti összefoglaló alapján
6. Hibaszámítás

## 6. A felhasznált eszközök pontossága

A felhasznált eszközök pontossága

- Hőmérő:  $\delta T = \pm 1K$

- Barométer:  $\delta p = \pm 100 \text{ Pa}$
- Setra 239/3 nyomás távadó  $\delta p = \pm 2 \text{ Pa}$  /*méréstartomány 0÷1380 Pa/*
- Setra 239/5 nyomás távadó  $\delta p = \pm 0.7 \text{ Pa}$  /*méréstartomány  $\pm 250 \text{ Pa}$ /*
- EMB-001 nyomás távadó  $\delta p = \pm 2 \text{ Pa}$
- Betz manométer  $\delta p = \pm 0.1 \text{ Pa}$