

M3

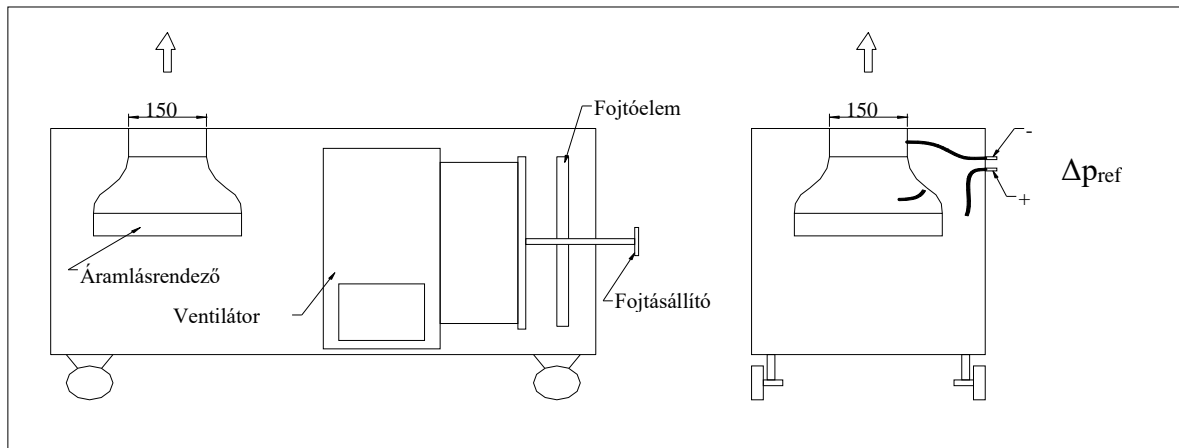
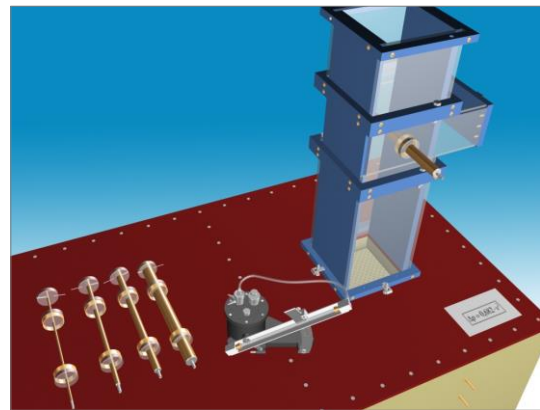
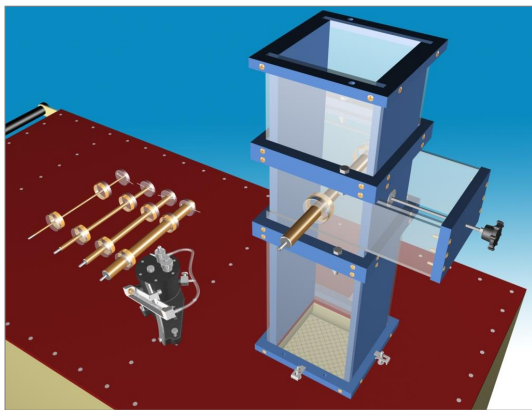
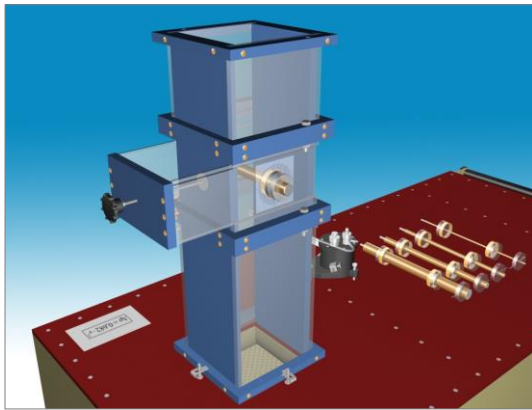
ZÁRT CSATORNÁBAN ELHELYEZETT HENGERRE HATÓ ERŐ MÉRÉSE

1. A mérés célja

A mérési feladat négyzet keresztmetszetű csatornába beépített, az áramlás irányára merőleges szimmetriatengelyű, különböző átmérőjű hengerekre ható \underline{F} (F_x , F_y) erő meghatározása a henger felületén mért nyomáseloszlásból. Vizsgálhatjuk továbbá adott átmérőjű hengerre a tengelyének csatorna falától mért távolsága függvényében a henger körüli nyomáseloszlás és a hengerre ható erő változását. A mért adatokból a henger palástján keletkező csúsztatófeszültségből származó (egyébként kis értékű) erő elhanyagolásával meghatározandó a henger c_p nyomástényezője, c_e ellenállás-tényezője és c_f felhajtóerő-tényezője is.

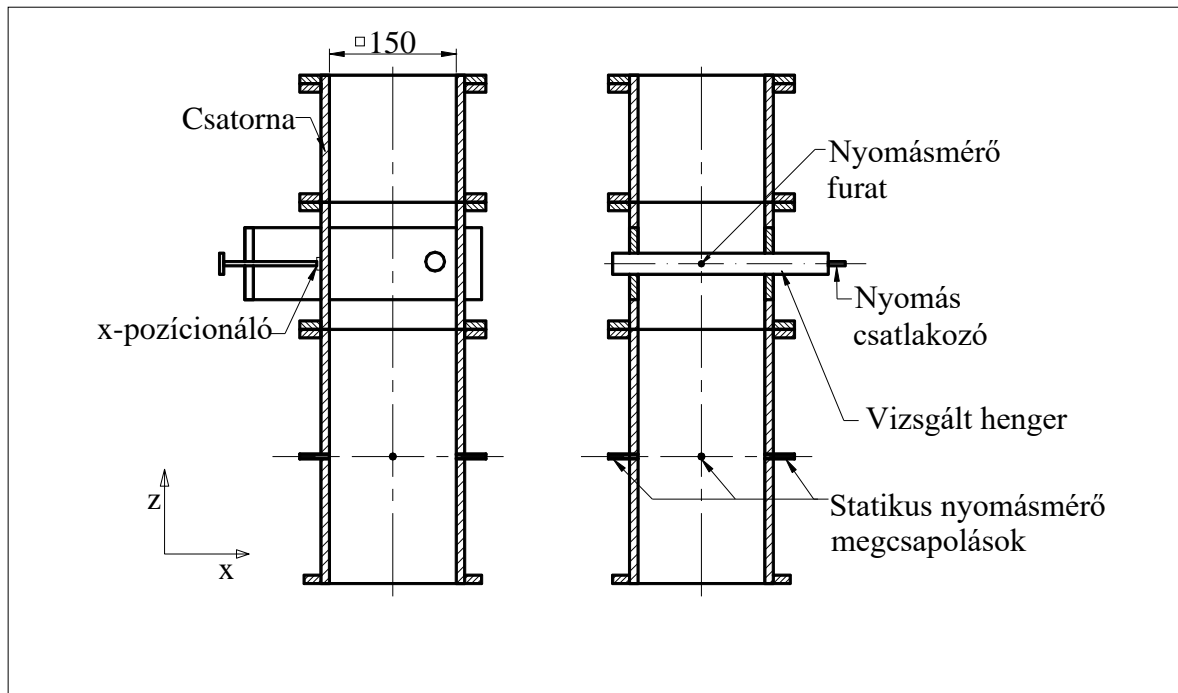
2. A mérési berendezés leírása

Kisebb méretű szélcsatornát használunk a feladat elvégzéséhez. Az asztal nagyságú berendezés vázlatát az **1. ábrán** láthatjuk. A kerekekre szerelt szekrényben található radiális ventilátorral áramoltatjuk a levegőt. Az áramló levegő sebességének szabályozása szívóoldali fojtással történik. A maximálisan elérhető sebesség a 150x150 mm-es kifúvó keresztmetszetben kb. 32 m/s. A v kiáramlási sebesség és a szélcsatorna oldalán lévő kivezetésen mérhető referencia nyomáskülönbség (Δp_{ref}) között a mérőkocsi tetején található kalibrációs összefüggés („K”) teremt kapcsolatot.



1.ábra Mérőberendezés felépítése

A szélcsatorna kifúvó nyílására szereltünk egy függőleges, négyzet keresztmetszetű, zárt mérőcsatornát, amelybe a mérni kívánt hengert helyezzük. A mérőcsatorna szerkezete a **2. ábrán** látható.



2.ábra Mérőcsatorna felépítése

A mérőcsatorna három darabból építhető fel, melyek sorrendje variálható, ezzel változtatható a henger előtti, illetve utáni csatornahossz. Az egyik elem kialakítása olyan, hogy abba különböző átmérőjű mérőhengereket lehet illeszteni. Ez az elem egy menetes orsó segítségével lehetővé teszi a hengerek hossztengeleyükre merőleges elmozdítását, valamint a henger tengelyével párhuzamos mozgatása is megoldott. A mérőhengerek palástján lévő kis átmérőjű furat a henger egyik végén lévő nyomáskivezetéshez csatlakozik, ennek segítségével mérhetjük a lokális statikus nyomást. A henger másik véglapja zárt.

A vizsgált henger nyomáskivezetésén mérhető nyomás és a csatornában uralkodó helyi statikus nyomás különbségét kell mérnünk. A csatorna falán a négy oldalfali statikus nyomás kivezetést egy körvezeték köti össze.

3. A mérés elméleti háttere

Áramlásba helyezett testekre ható erő a testek felületén keletkező nyomás- és csúsztatófeszültség-megoszlás eredményeként alakul ki. Valóságos áramlás esetén a test közelében lévő áramvonalak mentén a Bernoulli-összeg a súrlódás következtében csökken, ezért a test mögött egy áramlási nyom keletkezik, amiben a sebesség (és a görbült áramvonalak miatt a nyomás is) eltér a súrlódásmentes esetben megfigyelhető sebességeloszlástól. A nyomáscsökkenés mértéke nagymértékben függ a kialakuló áramképre jellemző Reynolds-számtól. A mérőberendezésnél a jellemző Reynolds-szám tartomány 10^3 - 10^5 között van. Ebben a tartományban a tehetetlenségi erők dominálnak, a henger mögött keletkező örvénypár periodikusan levál a hengerről (ez az ún. Kármán-féle örvénypár). A keletkező örvényekben és a környezetükben a sebesség viszonylag nagy és a nyomás alacsony. A hengerre ható ellenálláserő jelentős része tehát a henger hátsó részén az örvények keletkezése miatt létrejövő depresszió következménye. [1]

A hengerre ható nagy ellenálláserő magyarázható még a leváló örvények nagy mozgási energiatartalmával is, ami a test mögött hővé alakul. (Abszolút rendszerben nézve viszonylag nagy munkát kell kifejtenuünk a henger mozgatásakor álló közegben, hogy az ennek következtében keletkező és a súrlódás folytán hővé alakuló nagy mozgási energiát fedezni tudjuk.)

Számolni kell továbbá az egyoldali falhatással is, hiszen ha a hengert a falhoz közelítjük, az áramkép szimmetriája (eltekintve a nyomban kialakuló és ingadozó örvénypártól) megbomlik, a fal felőli oldalon az áramló közeg felgyorsul, nyomása csökken, és a nyomáseloszlásban tapasztalható változás miatt létrejön a testre ható erőnek egy az áramlás irányára merőleges komponense. A merőleges komponens nagysága függ a henger faltól mért távolságától, mely mértékének felderítése is a mérés része.

4. A mérés lefolytatása

A sebesség és a nyomásmérés

A szélcsatorna leírásakor már a Δp_{ref} referencia nyomás mérését ismertettük, amellyel a csatorna belépő sebességét határozhatjuk meg.

A henger felületén kialakuló nyomáseloszlást úgy határozzuk meg, hogy a henger palástján lévő egyetlen nyomásmérési helyet a henger tengelye körüli forgatásával változtatjuk, így pl. a megfelelő felbontás érdekében 5° vagy 10° -os osztással 0° és 360° között körbeforgatjuk, amihez a csatorna oldalán található szögmérő nyújt segítséget. A kerület mentén n számú mérési ponthoz így n számú A_i henger-palástfelület rész tartozik.

Lehetséges mérési feladat:

- Különböző Reynolds-számon (sebesség változtatással) egy adott átmérőjű henger nyomáseloszlásának vizsgálata.
- Különböző átmérőjű henger nyomáseloszlásának meghatározása ugyanazon Reynolds-szám mellett.
- Egy adott átmérőjű henger nyomáseloszlásának vizsgálata a tengelyének a csatorna falától mért különböző távolságra való beállítása mellett.

Ügyelni kell a mérés során arra is, hogy a mérőpontbeli nyomás a forgatás során előjelet válthat (helyi statikus nyomáshoz képest mérve túlnyomás ill. depresszió alakulhat ki)!

Az áramlások további jellemzőinek kimérése

A mérés kezdetén és végén rögzíteni kell a környezeti adatokat, mint a környezeti hőmérséklet, légköri nyomás, amelyből a levegő sűrűségét számítjuk ki.

Fel kell jegyezni a mérőberendezés geometria adatait, a csatorna elemeinek a sorrendjét, a mérőeszközök főbb jellemzőit, állapotát.

5. A mérés kiértékelése és összehasonlítása irodalmi adatokkal

A kiértékelés során az EMB-001 digitális nyomásmérőről leolvasott nyomáskülönbség értékeket kell feljegyezni, a hengeren és csatorna falán mért statikus nyomások különbségéből számolt nyomástényezőt a szög függvényében diagramban kell ábrázolni.

$$c_{p,i} = \frac{\Delta p_i}{\frac{\rho_{lev} \cdot v^2}{2}} \quad (1)$$

ahol

$c_{p,i}$	[-]	nyomástényező az i-edik mérőpontban
Δp_i	[Pa]	a henger és a csatorna falán mért nyomások különbsége az i-edik mérési pontban
ρ_{lev}	[kg/m ³]	áramló közeg (itt levegő) sűrűsége
v	[m/s]	áramlási sebesség

Meg kell határozni numerikus integrálással a csőre ható erőt (\underline{F}), annak áramlás irányú (F_x), és arra merőleges (F_y) komponensét.

$$\underline{F} = \sum_{i=1}^n \underline{F}_i = \sum_{i=1}^n \Delta p_i A_i (-\underline{e}_n) \quad (2)$$

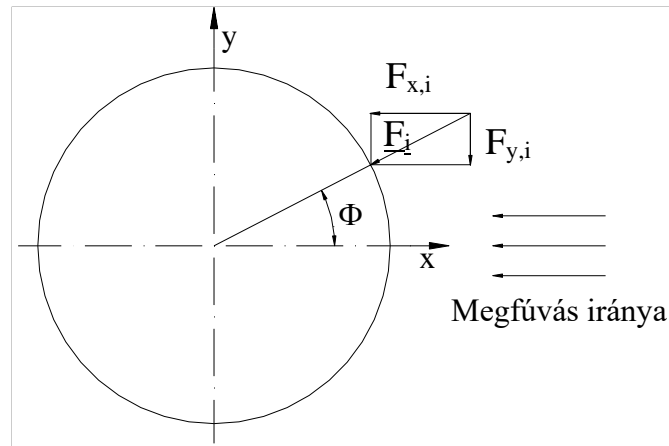
$$F_x = \sum_{i=1}^n F_{ix} = \sum_{i=1}^n \Delta p_i \cdot \frac{D\pi}{n} \cdot h \cdot \cos\Phi_i \quad (3)$$

$$F_y = \sum_{i=1}^n F_{iy} = \sum_{i=1}^n \Delta p_i \cdot \frac{D\pi}{n} \cdot h \cdot \sin\Phi_i \quad (4)$$

ahol:

\underline{F}	[N]	Az áramlásba helyezett testre ható eredő erő
n	[db]	A mérési pontok illetve a részfelületek száma
\underline{F}_i	[N]	Az i-edik részfelületre ható erő
Δp_i	[Pa]	Az i-edik részfelületen mért nyomáskülönbség (túlnyomás)
A_i	[m ²]	Az i-edik részfelület nagysága
D	[m]	Henger átmérő
h	[m]	Henger magasság
\underline{e}_n	[-]	A felületi normális irányú egységvektor
Φ_i	[°]	i-edik mérőpont x tengellyel bezárt szöge
F_x, F_y	[N]	x,y irányú erőkomponens

A bevezetett változók értelmezéséhez lásd a **3. ábrát**.



3.ábra Hengerre ható erő számítása

Az áramlás irányú F_x erőkomponenst nevezzük F_e ellenálláserőnek, amiből a mérés céljaként kitűzött ellenállás-tényezőt (c_e) számolhatjuk. Az F_y komponensből pedig a megfúvási irányra merőleges c_f felhajtóerő-tényezőt kapjuk.

$$c_e = \frac{F_e}{\frac{\rho_{lev}}{2} \cdot v^2 \cdot A_{henger}} \quad (5)$$

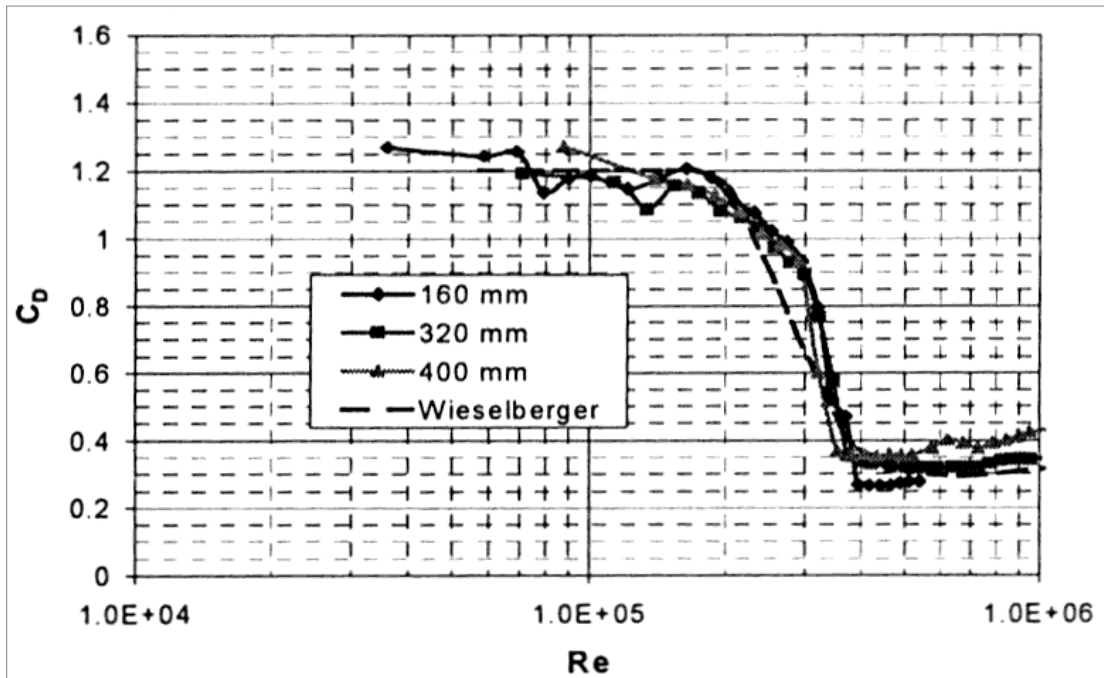
$$c_f = \frac{F_f}{\frac{\rho_{lev}}{2} \cdot v^2 \cdot A_{henger}} \quad (6)$$

ahol

c_e	[-]	ellenállás-tényező
c_f	[-]	felhajtóerő-tényező
F_e	[N]	ellenálláserő
F_f	[N]	felhajtóerő
ρ_{lev}	[kg/m ³]	áramló közeg (itt levegő) sűrűsége
v	[m/s]	áramlási sebesség
A_{henger}	[m ²]	mérőtest áramlási irányra merőleges vetülete

Az ellenállás-tényező értékét célszerű összehasonlítani a szakirodalomban (pl. [3]) található értékekkel.

Az ellenállás-tényező $Re > 3 \cdot 10^5$ esetén megközelítően $c_e \approx 0,3$. Ennél alacsonyabb Reynolds-szám értékekre $c_e = 1,2$ jó közelítést jelent. A két tartomány között rövid átmeneti szakasz található, melyben az ellenállás-tényező értékének becslését az **1. diagram** segíti.



1. diagram Ellenállás-tényező c_e (a diagramban c_D) a Reynolds-szám függvényében, különböző $d=160, 320, 400$ mm hengerátmérők esetén

6. Hibaszámítás:

A mérés hibaszámítását a henger ellenállás-tényezőjére kell elvégezni az alábbi módon:

Az ellenállás-tényező kifejezése:

$$c_e = \frac{F_e}{\frac{\rho_{lev}}{2} v^2 A_{henger}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta p_i \frac{D\pi}{n} h \cos\Phi_i}{\frac{\rho_{lev}}{2} \frac{2K\Delta p_{ref}}{\rho_{lev}} A_{henger}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta p_i \frac{\pi}{n} \cos\Phi_i}{K\Delta p_{ref}}$$

(ahol „K” a mérőkocsin feltüntetett kalibrációs konstans. Amennyiben K értéke nem ismert, a $K=1$ közelítés alkalmazható)

Az abszolút hiba számítása:

$$\delta c_e = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\delta X_i \cdot \frac{\partial c_e}{\partial X_i} \right)^2}$$

A relatív hiba:

$$\frac{\delta c_e}{c_e} = ?$$

ahol az X_i mért mennyiségek és a hozzájuk kapcsolódó mérési hibák:

$X_1 = \Delta p_i$,	illetve a nyomásmérés hibája	$\delta \Delta p_i = 2 Pa$
$X_2 = p_0$,	illetve a légköri nyomás mérési hibája	$\delta p_0 = 100 Pa$
$X_3 = T_0$,	illetve a hőmérséklet mérési hibája	$\delta T_0 = 1 K$
$X_4 = \Delta p_{ref}$,	illetve a nyomásmérés hibája	$\delta \Delta p_{ref} = 2 Pa$
$X_5 = \Phi_i$,	illetve a szögmérés hibája	$\delta \Phi_i = 2^\circ$

7. Diagramok:

- A hengerpaláston érvényes nyomástényező (c_p) a forgatási szög függvényében.
- A különböző átmérőjű hengerek ellenállás-tényezője és felhajtóerő-tényezője a Reynolds-szám, vagy a faltól mért távolság függvényében + abszolút és relatív hiba értékek.

A mérés során nem szabad megfeledkezni

- A mérőberendezés bekapcsolása előtt, illetve általában a mérőberendezés üzeme során mindig meg kell győződni a balesetmentes használat feltételeinek teljesüléséről. A bekapcsolásról, illetve a mérés közben végrehajtott változtatásokról a berendezés környezetében dolgozókat figyelmeztetni kell.
- Minden mérési alkalommal a légköri nyomás és teremhőmérséklet feljegyzéséről!
- A felhasznált mérőműszerekről leolvasott értékek mértékegységének és a rájuk vonatkozó egyéb tényezők feljegyzéséről.
- A felhasznált mérőműszerek típusának, gyártási számának és a benne lévő mérőfolyadék sűrűségének feljegyzéséről!
- A mérőműszerről leolvasott mennyiségek és a további számításoknál felhasznált mennyiségek mértékegységének egyeztetéséről.
- A digitális nyomásmérő kalibrációjáról!
- A nyomásmérő bekötésénél figyelmesen kell eljárni a csatlakozók "+" illetve "-" ágának és a méréshatár kiválasztásánál. Figyelni kell arra, hogy a nyomásmérő csatlakozó csonkjaira a gumicsövet óvatosan kell felhelyezni.
- A nyomásközlő gumi, vagy szilikon csöveket mérés előtt, esetleg közben is célszerű ellenőrizni, nehogy repedés, szakadás legyen rajtuk, mert lyukas mérőcső esetén az összes addigi mérési eredmény kárba vész. Kritikus pontok a műszerekre ill. a nyomáskivezetésekre történő csatlakoztatás helyei.
- A jegyzőkönyv leadása előtt erősen ajánlott a konzultációk igénybevétele.

Irodalom

- [1] Lajos Tamás: Áramlástan alapjai (2004) 9.9.3 és 11.1.2 fejezet
- [2] Lajos Tamás: Áramlástan alapjai (2004) 423.oldal
- [3] Lajos Tamás: Áramlástan alapjai (2004) 488.oldal