

# AKTÍV TURBULENCIAGENERÁTOR UTÁNI ÁRAM- LÁS VIZSGÁLATA

## INVESTIGATION OF FLOW DOWNSTREAM OF AN ACTIVE TURBULENCE GENERATOR

Faragó Dávid\*, Bencs Péter\*\*

### ABSTRACT

*Velocity field measurements downstream of an active turbulence generator have been carried out using LDA (Laser Doppler Anemometry) measurement method. The objective of this article is to compare the results of the same turbulence generator operated in passive, jet, and active mode. The basis of comparison are velocity fields and turbulence kinetic energy distributions.*

### 1. BEVEZETÉS

Turbulens áramlás generálásának céljával laboratóriumi szélcsatornában különböző típusú turbulencia generátorok (rendszerint rácsok) alkalmazhatók. A rács típusú turbulenciagenerátorok egyik csoportosítása alapján azokat aktív, passzív, vagy úgynevezett félaktív kategóriákba sorolhatjuk. Aktívnek nevezzük azokat a rácsokat, amelyek valamilyen külső energiabevitel (pl. villamosenergia, komprimált levegő) által mozgásba hozott elemeket tartalmaznak, passzívnak azokat, melyek nem tartalmaznak mozgó elemeket, félaktívnek pedig azokat, melyek ugyan tartalmaznak mozgó elemeket, de azokat külső energiabevitel nélkül, maga az áramlás hozza mozgásba.

Ezeket a rácsokat általában a szélcsatorna mérési szakasza előtt helyezik el olyan távolságban, hogy a mérési szakaszban a kívánt áramlási paraméterek alakuljanak ki. Vizsgálatok során előfordulhatnak olyan esetek is, amikor a szélcsatornában alapállapotban is turbulens az áramlás, ilyen esetekben a turbulenciát generáló rácsokat a turbulens kinetikus energia növelése érdekében alkalmazzzák [1-5].

A vizsgált turbulenciagenerátor egy rács, melynek rácspontjaiban rugalmas szilikoncsövek kerülnek rögzítésre. Korábbi tapasztalatok alapján tudjuk, hogy szükségtelen minden metszéspontban szilikoncsöveket elhelyezni, helyette saktábla mintával minden második rácsponthoz van csupán szilikoncső, a további rácsponthoz pedig lezárásra kerülnek, hogy rajtuk ne szökjön a másodlagos levegőáram. A rácsállandó 25 mm, így a szilikoncsövek egymástól átlósan 35 mm távolságra helyezkedtek el.

\*doktorandusz, \*\*egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézet Tanszéke

email: \*david.farago@uni-miskolc.hu, \*\*peter.bencs@uni-miskolc.hu

A rács legfeljebb 8 bar-os segédlevegővel látható el, melyet egy reduktor és változó keresztmetszetű térfogatárammérő segítségével szabályozunk a megfelelő térfogatáramra.

### 2. LDA RENDSZER

#### 2.1. Az LDA rendszer működési elve

Az LDA, vagy lézer doppler anemometria egy a doppler jelenségen alapuló nagy pontosságú mérési eljárás. A mérés alapelve az azonos fázisban találkozók lézerefény interferenciáján alapul. A két azonos fázisban lévő lézerefény találkozásának tartományában egy olyan mérőtér fogat jön létre, ahol az interferencia következtében kialakulnak sötét, illetve világos zónák. A zónák pontos elhelyezkedése és vastagsága meghatározható a lézerefény hullámhosszának, és a két lézersugár által bezárt szögnek az ismeretében.

Amikor egy részecske áthalad ezen a mérőtér fogaton, akkor a világos interferenciaterületen felvillan, míg a sötét interferenciaterületen eltűnik. A villanásokat egy, az LDA rendszerébe beépített fotodetektor fogja fel, alakítja át villamos jellé, majd továbbítja a jelfeldolgozóba. A felvillanások között eltelt időből következik a továbbított villamos jel frekvenciája, amiből pedig számítható az áthaladó részecske sebessége. A két lézersugár fázisazonossága ebben az esetben úgy biztosított, hogy ugyanazt a lézersugarat osztják ketté egy Bragg-cella segítségével, majd az optika segítségével e kettő sugarat irányítjuk egy pontra.

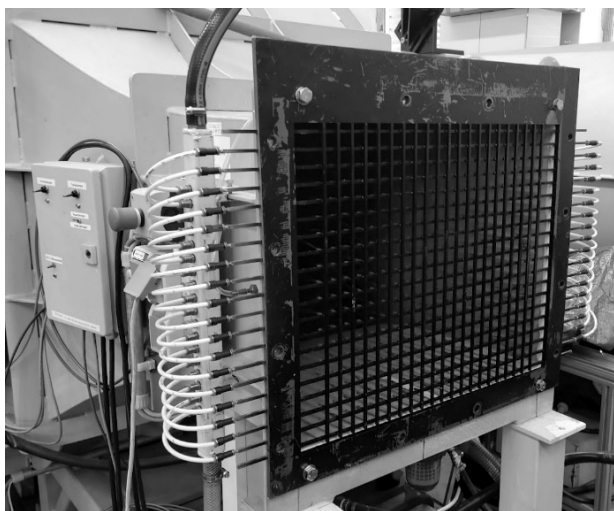
A lézer doppler anemometria ennek megfelelően egy beavatkozásmentes mérési módszer, nem szükséges mérőberendezést juttatni az áramlásba a sebességének mérésére. Viszont szükség van megfelelő mennyiségű és méretű nyomjelző részecskére, aminek a paraméterei az áramló közeg tulajdonságaitól és az áramlás jellegétől függenek. Egy adott hullámhosszú lézer segítségével egy sebességkomponens mérhető, azonban 2, ill. 3 különböző színű lézer egyidejű alkalmazásával mérhető kettő, vagy mindhárom sebességkomponens.

#### 2.2. Vizsgált mérési esetek

A vizsgált turbulenciagenerátor mögött kialakuló áramlás jellemzőit egy nyitott, Göttingen típusú szélcsatornában vizsgáltuk három üzemállapotban: **passzív, jet,**

illetve **aktív** üzemmódban. Passzív üzemmódban a másodlagos térfogatáram zérus. A jet és aktív üzemmódok paramétereit előzetes vizsgálatok alapján kerültek megállapításra. Jet üzemállapotban a lehető legnagyobb térfogatáramot választjuk, aminél még konzisztensen nem jönnek rezgésbe a szilikonsövek, aktív üzemállapotban pedig a legkisebb térfogatáramot választjuk, aminél már minden fő áramlási sebességnél rezgésbe jön az összes szilikonsző.

A vizsgált sebességek a három üzemállapotban [1; 2; 3; 4; 5] m/s. A sebességprofilok összehasonlítása egy függőleges síkon, valamint a középvonal mentén történik. A méréseket LDA mérési eljárás segítségével végezzük el 2D-ben, amelynek eredményeként x és z irányú sebességkomponenseket kapunk.



1. ábra. A turbulenciagenerátor a szélcsatornán.

### 2.3. Tömegáram-arányok, Reynolds-számok meghatározása

Az eredmények kiértékeléséhez szükséges a fő áramlás és a másodlagos áramlás tömegáram-arányának, valamint az áramlásokra jellemző Reynolds-számnak az ismerete. Ezek meghatározásához az egyes esetekben az alábbi mennyiségek mérésére volt szükség:

- fő áramlás sebessége: [1; 2; 3; 4; 5] m/s
- környezeti hőmérséklet
- környezeti nyomás
- környezeti levegő relatív páratartalma
- másodlagos levegő térfogatárama
  - Passzív:  $Q_{Std} = 0 \text{ Nm}^3/\text{h}$
  - Jet:  $Q_{Std} = 80 \text{ Nm}^3/\text{h}$
  - Aktív:  $Q_{Std} = 120 \text{ Nm}^3/\text{h}$
- másodlagos légáram hőmérséklete
- reduktor előtti nyomás
- reduktor utáni nyomás

A térfogatárammérő esetén (2. ábra, bal oldal) a kalibrációs értékek ismeretében erőegyensúlyi egyenletekből levezethető az alábbi korrekúra-formula, amellyel

megkapjuk a normál-térfogatáramot az üzemi paraméterek függvényében:

$$Q_{Std} = \sqrt{\frac{p_{ref}}{p}} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_{ref}}} \cdot Q_{ref} \quad (1)$$

ahol  $Q_{Std}$  a normálállapotra vett térfogatáram,  $p$  az üzemi abszolút nyomás,  $T$  az üzemi abszolút hőmérséklet,  $Q_{ref}$  a kalibrált normálállapotra vett térfogatáram (*leolvasott érték*),  $p_{ref}$  a kalibrált abszolút nyomás (*ismert érték*) a  $T_{ref}$ : kalibrált abszolút hőmérséklet (*ismert érték*).

A standardállapotra vonatkozó nyomás és hőmérséklet ismeretében pedig az előzőleg kapott normál-térfogatáramból meghatározható az aktuális térfogatáram:

$$Q = \frac{T}{T_{Std}} \cdot \frac{p_{Std}}{p} \cdot Q_{Std} \quad (2)$$

ahol  $Q$ : aktuális térfogatáram,  $p_{Std}$ : standard nyomás,  $T_{Std}$ : standard abszolút hőmérséklet. A sűrűség számítása a Teten-formula alapján az alábbi képlettel számítható:

$$\rho_{humid\ air} = \frac{1}{T} \left[ \frac{p - \varphi \cdot 0.061078 \cdot 10^t + 237.3}{R_d} + \frac{\varphi \cdot 0.061078 \cdot 10^t + 237.3}{R_v} \right] \quad (3)$$

ahol  $\rho_{humid\ air}$  a nedves levegő sűrűsége,  $p$  az üzemi abszolút nyomás,  $T$  az üzemi abszolút hőmérséklet,  $t$  az üzemi hőmérséklet Celsiusfokban,  $\varphi$  a nedves levegő relatív páratartalma,  $R_d$  száraz levegő specifikus gázállandója,  $R_v$  a vízgőz specifikus gázállandója.



2. ábra. Rotaméter (balra), valamint a reduktor, az analóg nyomásmérő (1), a K-típusú hőelem rendszerbe vezetése (2), megcsapolás nyomásméréshez a reduktor után (3), illetve előtt (4)

Az egyes esetekre vonatkozó Reynolds számok meghatározásához meg kell még határozni a dinamikai viszkozitást, a kinematikai viszkozitást, valamint a

jellemző hosszmeretet. A dinamikai viszkozitás meghatározása Chapman–Enskog formula segítségével:

$$\mu = \frac{b \cdot T^{\frac{3}{2}}}{T + S} \quad (4)$$

ahol  $T$ : üzemi abszolút hőmérséklet,  $b$  a közegre jellemző állandó (levegőre  $b = 0,000001458$ ),  $S$  a közegre jellemző állandó (levegőre  $S = 110,4$ ). A dinamikai viszkozitás és a sűrűség ismeretében számítható a kinematikai viszkozitás:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (5)$$

A jellemző hosszmeret téglalap keresztmetszetű csatornában az alábbi képlet segítségével számítható:

$$L = \frac{4A}{K} \quad (6)$$

ahol  $A$  a szélcsatorna mérőterének keresztmetszete,  $K$  a szélcsatorna mérőterének kerülete. A fentiek birtokában pedig számíthatóvá válik a Reynolds-szám:

$$Re = \frac{u \cdot L}{\nu} \quad (7)$$

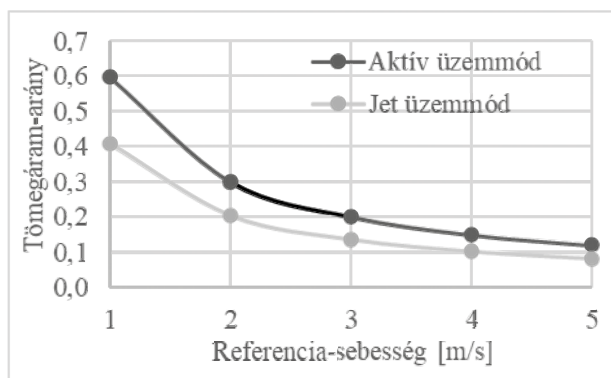
ahol  $u$  áramlási sebesség.

Az egyes esetekre vonatkozó tömegáram-arányok és Reynolds-számok az 1. táblázatban láthatók:

1. táblázat. Tömegáram-arányok és Reynolds-számok a vizsgált esetekben.

Referenciasebesség	5 m/s	4 m/s	3 m/s	2 m/s	1 m/s
<b>Vizsgált eset: aktív</b>					
Tömegáram-arány	0,1199	0,1494	0,1998	0,2987	0,5964
Reynolds-szám	1,73E+05	1,38E+05	1,03E+05	6,85E+04	3,42E+04
<b>Vizsgált eset: jet</b>					
Tömegáram-arány	0,0817	0,1021	0,1359	0,2035	0,4071
Reynolds-szám	1,73E+05	1,38E+05	1,04E+05	6,91E+04	3,45E+04
<b>Vizsgált eset: passzív</b>					
Reynolds-szám	1,73E+05	1,38E+05	1,04E+05	6,92E+04	3,46E+04

A 3. ábrán az aktív és a jet üzemmódok közötti tömegáram-arányok összehasonlításának vizualizálása látható. A tömegáram-arány a másodlagosan, a turbulenciagenerátoron keresztül bevezetett levegő tömegáramának és a szélcsatorna által szállított tömegáramnak a hányadosa.



3. ábra. Tömegáram-arányok összehasonlítása aktív és jet üzemmódban

#### 2.4. Mérési pontok, peremfeltételek

Az LDA-val történő mérések során egy függőleges síkban 60 pontban, valamint a szélcsatorna középvonalában 23 pontban mérjük a sebességeket.

A síkban történő mérés esetén átlagos értékek kinyerése a cél. Mivel LDA mérések esetén a mintavételi

frekvenciát nem lehet előre beállítani, ezért a statisztikai elfogultság (bias) elkerülése végett Controlled Dead Time módban végeztük az adatkinyerést. A Dead Time helyes megválasztásával elkerülhető a statisztikai elfogultság, így ugyanis egy érzékelt impulzus után a beállított ideig nem rögzít újat a szoftver, így elméletileg egyazon örvény által kiváltott impulzusok közül csak egy kerül rögzítésre. A mintavételek számát a BSA szoftvernek ajánlása nyomán, valamint saját tapasztalatok alapján 2000-re választottuk.

A középvonalban történő mérés esetén Burst Mode adatnyerési opciót választottunk, ami azt jelenti, hogy a szoftver minden egyes impulzust regisztrál. Természetesen ez alacsony mintavételezési szám esetén erős torzításokat mutathat a kapott eredmény, ennek megfelelően a mintavételek számát is jelentősen megnöveltük. A vonalmenti mérések esetén a mintavételezési szám 100 000.

Az LDA méréshez szükséges nyomjelző részecskéket két aeroszol generátor segítségével biztosítottuk. Passzív mérés esetén valójában elegendő volt egy is, az aktív esetekben azonban a nyitott szélcsatornát igen hamar, és igen nagy mennyiségben hagyták el a nyomjelzők, a konzisztencia jegyében így passzív esetben is mindkét aeroszol generátort alkalmaztuk.

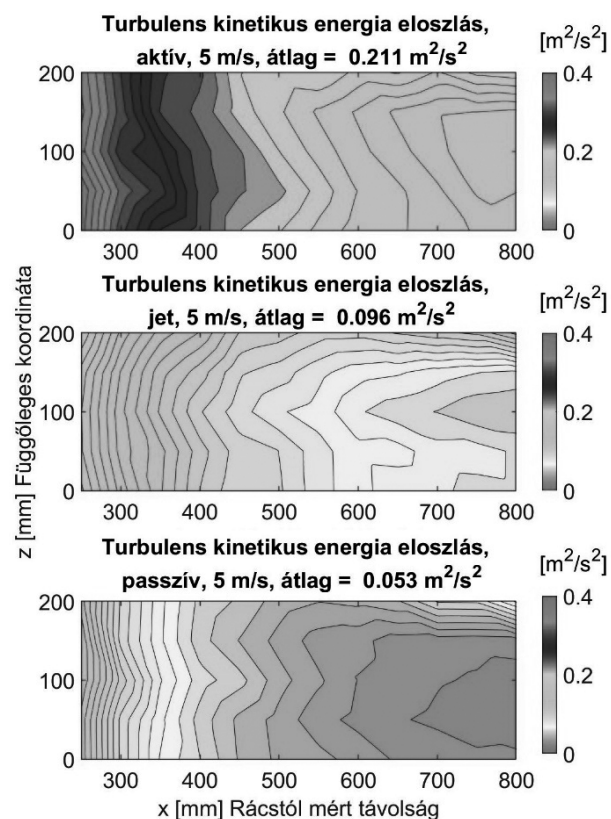
A kétdimenziós sebességmérés ebben az esetben az áramlás irányával párhuzamos főirányú ( $u$ ), és a rá

merőleges függőleges irányú ( $w$ ) sebességkomponens mérését tette lehetővé.

#### 2.4. A mérések menete

Mivel a szélcsatorna beépített sebességmérője ezzel a típusú turbulenciagenerátorral nem kompatibilis, ezért a referenciasebességet a középvonalban, a traverzrendszer rácstól legtávolabbi pontján (a rácstól mérve 950 mm-re) mértük. A referenciasebesség beállítása után megtörtént a vizsgált sík és középvonal mérése az egyes esetekben.

A 4. ábrán a vizsgált síkban kialakuló áramlásra jellemző turbulens kinetikus energiák alakulása látható 5 m/s referenciasebesség esetén aktív, jet, ill. passzív üzemmódban. A turbulenciagenerátor aktiválásakor (jet) jelentősen megnő a mögötte lévő áramlásra jellemző turbulens kinetikus energia, a turbulenciagenerátor jet üzemmódból aktívba váltása után (a szilikoncsövek intenzív rezgésbe kezdenek) a turbulens kinetikus energia további jelentős emelkedésen megy keresztül.



4. ábra. Turbulens kinetikus energia eloszlása aktív, jet, illetve passzív esetben, 5 m/s referenciasebesség esetén.

### 3. ÖSSZEFOGLALÁS

Aktív esetben viszonylag gyakran fordult elő, hogy egy-egy szomszédos szilikoncső egymásba akadt, és hosszabb-rövidebb ideig ebben az állapotban maradtak. A turbulenciagenerátor fejlesztése során ezt valamilyen módon figyelembe kell venni, vagy rövidebb szilikoncsövek alkalmazására van szükség, vagy annyiival nagyobb távolságra kell őket egymástól elhelyezni, hogy ne akadhasanak össze.

LDA mérések esetén a nyitott szélcsatornában különösen nagy kihívást okozott az alacsony sebességek mérése aktív, illetve a jet üzemmódban. Ebben az esetben a fő térfogatáramhoz képest a másodlagos térfogatáram olyan nagy volt, hogy a szélcsatornában lévő részecskék egy jelentős része – a szélcsatornába történő ismételt belépés helyett – a környezeti levegőbe távozott. Passzív üzemmódban ez a probléma nem merült fel, a távozó részecskék mennyisége nem haladta meg azt a mennyiséget, amit a két aeroszol-generátorral pótolni tudtunk.

Tapasztalataink alapján a szilikoncsövek **jet** üzemmódban javarészt lefelé fújják a levegőt, **aktív** üzemmódban a kapott eredmények alapján ez a tendencia sokkal kevésbé áll fenn. Az LDA síkbeli mérések azt mutatják, hogy a függőleges sebességkomponensek átlaga túlnyomórészt a teljes tartományon negatív, az áramlás irányú sebességkomponens pedig jellemzően a tartományok közepén alacsonyabb, a mérési tartomány teteje és alja felé haladva nő.

A turbulens kinetikus energia megnövelésére rendkívül jól alkalmazható a rács. A rács aktiválását követően jelentősen megnő a turbulens kinetikus energia (jet üzemmód), majd az aktív üzemállapotba érve (a szilikoncsövek intenzíven rezegnek) ugrásszerűen megnő a turbulens kinetikus energia a teljes vizsgált tartományon.

### 4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

The author is grateful to the Hungarian-German Intergovernmental S&T cooperation programs TKA-DAAD 160552 for the financial support of this research.

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Magyar-Német együttműködési program TKA-DAAD 160552 projektjének a kutatás támogatásért.

### 5. IRODALOM

- [1] Genevieve Comte-Bellot and Stanley Corrsin. The use of a contraction to improve the isotropy of grid-generated turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 25(04):657–682, 1966.
- [2] Genevieve Comte-Bellot and Stanley Corrsin. Simple eulerian time correlation of fullband narrow-band velocity signals in grid-generated, isotropic turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 48(02):273–337, 1971.
- [3] Hideharu Makita and Shinji Miyamoto. Generation of high intensity turbulence and control of its structure in a low speed windtunnel. In *Proceedings of 2nd Asian congress on fluid mechanics*, pages 101–106, 1983.
- [4] Makita Hideharu. Realization of a large-scale turbulence field in a small wind tunnel. *Fluid Dynamics Research*, 8(1-4):53, 1991.
- [5] John Laufer. Investigation of turbulent flow in a two dimensional channel. National Advisory Committee for Aeronautics, 1951.