

MISKOLCI EGYETEM



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR

**ÚJ TÍPUSÚ AKTÍV TURBULENCIAGENERÁTOROK
FEJLESZTÉSE ÉS LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATA**

PhD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Készítette:

SZASZÁK NORBERT TIBOR

okleveles energetikai mérnök

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ALAPTUDOMÁNYOK SZAKTERÜLET
TRANZSPORTFOLYAMATOK ÉS GÉPEIK TÉMACSOPORT

Doktori iskola vezetője:

Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella

a műszaki tudományok doktora

Témacsoport vezetője:

Prof. Dr. Czibere Tibor

az MTA rendes tagja

Témavezető:

Prof. Dr. Szabó Szilárd

egyetemi tanár

Miskolc

2019

Védési bizottság/ Dissertation Committee

Elnök/Chairman:

JÁRMAI Károly, DSc. egyetemi tanár/professor (ME)

Titkár/Secretary:

Bányai Tamás, PhD. egyetemi docens/associate professor (ME)

Tagok/Members:

BERECZKY Ákos, PhD. egyetemi docens/ associate professor (BME)

JANIGA Gábor, PhD, Dr. habil. Priv.-Doz. OvGU, Magdeburg

PALOTÁS Árpád Bence, DSc. egyetemi tanár/professor (ME)

TURZÓ Zoltán, PhD. egyetemi docens/ associate professor (ME)

VAD János, DSc. egyetemi tanár/professor (BME)

Hivatalos bírálók/Official opponents:

TÓTH Anikó Nóra, PhD. egyetemi docens/ associate professor (ME)

SUDA Jenő Miklós, PhD. egyetemi adjunktus/ assistant professor (BME)

1. Bevezetés

Doktori kutatómunkám alapjául a diplomatervem szolgált (Szaszák, 2012.). 2011-ben a magdeburgi "Otto von Guericke" Egyetemen végeztem laboratóriumi vizsgálatokat egy új típusú turbulenciát generáló aktív rács fejlesztéséhez kapcsolódóan, amelynek akkori – a létrehozott turbulencia tulajdonságainak szempontjából pozitív – eredményei új fejlesztési lehetőségeket, s új tudományos eredmények elérését vetítették előre.

A doktori kutatómunkám keretein belül két, különböző működési elvet alkalmazó aktív rácsot fejlesztettem és vizsgáltam. A munkám egyik fő irányvonalát a diplomamunkám alapján összeállított nagyméretű, szélcsatornába beépített turbulenciagenerátor, s az általa megváltoztatott áramlás turbulenciát leíró paramétereinek vizsgálata jelentette. Ezen irányvonal mellett saját elgondolásom alapján egy olyan aktív rács fejlesztésével és laboratóriumi vizsgálatával is foglalkoztam, amely felépítéséből adódóan működéséhez nem igényel külső energiaforrást. A rácsok vizsgálatát mind a Miskolci Egyetem, mind pedig a Magdeburgi Egyetem áramlástechnikai laboratóriumaiban, különböző mérés technikák felhasználásával végeztem el, amely vizsgálatok során nem csupán a rácsok által létrehozott áramlás tulajdonságait vizsgáltam, hanem a rácsok működését is tanulmányoztam.

2. Szakirodalmi áttekintés

Amennyiben az áramlási térbe, az áramlásra merőlegesen rácsot helyezünk el, azzal turbulenciát generálhatunk (Kurian & Fransson, 2009.). Ekkor klasszikus rács turbulenciáról beszélhetünk, amely – jellemzői alapján – a turbulencia elméletek és modellek tesztelésére kifejezetten alkalmas (Pope, 2000). Alapvetően a rács turbulencia létrehozásához kétfajta rácsot alkalmazhatunk: passzív vagy aktív rácsokat.

A passzív rácsok minden esetben olyan szerkezeti megoldások, amelyek nem tartalmaznak mozgó elemet, továbbá nem is adnak az alapáramlásnak extra impulzust (pl. másodlagos légsugarak bejuttatásával). Passzív ráccsal kapcsolatos kísérletéről számolt be többek között Simmons & Salter, 1934, Comte-Bellot, 1971, Roach, 1987, Discetti et al., 2013, továbbá Zhou et al., 2014. Ezekkel a rácsokkal jellemzően csupán kismértékben növelhető az áramlás turbulencia-intenzitása, továbbá a kialakuló turbulencia jellemző hosszléptékei is csak bizonyos tartományon belül alakulhatnak (Comte-Bellot, 1971). E megszorításoktól függetlenül a passzív rácsok keltette rács turbulencia vizsgálata nélkülözhetetlen volt a különböző turbulencia-

elméletek fejlődéséhez, a turbulencia modellezéséhez, továbbá validációk esetén a megfelelő peremfeltételek meghatározásához (Sakai et al., 2001).

Az aktív rácsok esetén időben aktívan változtatható a rács lokális kitöltési-tényezőjének eloszlása, vagy más esetekben az alapáramlásba juttatott nagysebességű légsugarakkal, esetleg mozgó elemekkel megváltoztatható az áramló közeg lokális, pillanatnyi impulzusa. Mindezek hatására nagy intenzitású turbulencia hozható létre. Aktív ráccsal kapcsolatos kísérletéről számolt be többek között Ling & Wan (1972) (oszilláló rácselemek), Ozono et al. (2006) (multi-ventilátor rács), de a legszélesebb körben kutatott típus Makita & Miyamoto (1983) nevéhez fűződik, akik vízszintesen és függőlegesen elhelyezett, változtatható fordulatszámú forgást végző tengelyekből álló rácsot készítettek, amely rácselemeken szárnylapátok helyezkednek el.

Az aktív rácsok egy másik típusa légsugarakat alkalmaz a turbulencia növeléséhez, ezek az úgynevezett légsugár-rácsok. Ekkor fűvókákon keresztül juttatnak az alapáramlásba másodlagos légsugarakat. Légsugaras ráccsal kapcsolatos kísérleteikről számolt be többek között Mathieu & Alcaraz (1965), Gad-el-Hak & Corrsin (1974), továbbá Aufderheide et al., 2014.

Kutatómunkám egy jelentős részében a szakirodalomban fellelt légsugaras rácsok továbbfejlesztéseként vizsgáltam egy olyan variációt, ahol a légsugarak rácspontokba illesztett, csapkodó mozgást végző rugalmas csővecskéken keresztül lövellnek be az áramlási térbe. Ezen túlmenően egy olyan rezgő-szalagos rácsot is kifejlesztettem s vizsgáltam, amely az alapáramlás hatására jön rezgésbe, ilyen módon növelve a turbulenciát.

3. Célkitűzések

A doktori kutatómunkám gerincét két, működési elvében különböző aktív turbulenciagenerátor (aktív rács) kifejlesztése jelentette. E fejlesztések célja az volt, hogy mindkét fejlesztett rács esetében megtaláljam a legoptimálisabb konstrukciós megoldást, amellyel megfelelő módon változtatható az alapáramlás turbulenciája.

Ebből adódóan a kifejlesztett rácsok által létrehozott turbulencia laboratóriumi vizsgálata, és a vonatkozó jellemzők számszerűsítése is feladatom volt, amelyhez a rendelkezésemre álló mérés technikákat alkalmaztam.

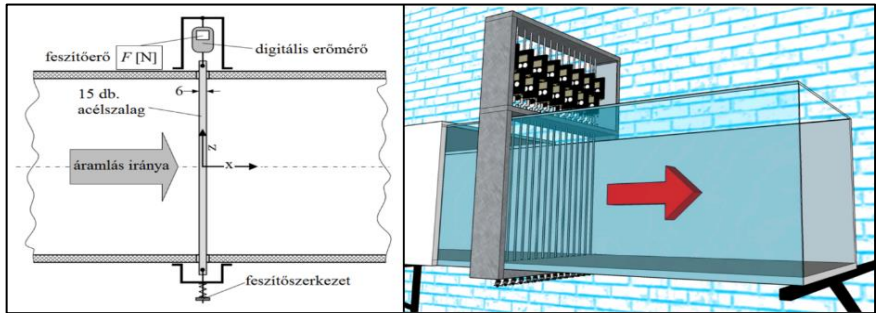
A vizsgált rácsok aktív üzeme esetén célul tűztem ki a mozgó elemek mozgásjellegének meghatározását, továbbá az aktív elemeket aktivitásuk szempontjából leíró dimenziótlan mennyiségek definiálását.

Ezeken túlmenően fontosnak tartottam a légsugaras rács esetében az indukált turbulenciának gázok keveredésére gyakorolt hatásának számszerűsítését is.

4. A feladatok megoldásának módszerei

Annak érdekében, hogy a kialakított rácsok áramlásra gyakorolt hatásait megvizsgálhassam, azokat a mérésekhez megfelelő szélcsatornába kellett beépítenem. Ezért az első feladatom egy szélcsatorna tervezése és összeállítása volt. A fejlesztőmunkám eredményeként sikerült olyan áramlásrendező-variációval ellátni az összeállított szélcsatornát, amely segítségével megfelelően homogén, s alacsony turbulencia-intenzitású áramlási teret tudtam biztosítani a későbbi szalag-rács vizsgálataimhoz (Szaszák et al., 2012b; Szaszák, 2013; Szaszák & Szabó, 2013a).

A csatorna építésével és vizsgálataival párhuzamosan, új típusú aktív rács összeállításával is foglalkoztam. Saját elgondolásom alapján egy olyan rácsot fejlesztettem ki, amely rácselemeinek periodikus mozgásával hoz létre intenzív turbulenciát. Mindezt úgy teszi, hogy a mozgásához szükséges energiát magából az alapáramlásból nyeri. A rács igen egyszerű felépítésű, olyan függőleges rácselemekből áll, amelyek vékony, keskeny rugalmas szalagok, s amelyek síkjai nyugalmi állapotban párhuzamosak a csatorna hossz tengelyével. E szalagok megfelelő sebességű légáram hatására periodikus rezgő-csavaró mozgást végeznek. Elsőként poliészter szalagokból készítettem el a rácsot, amely működését állandó hőmérsékletű légszűrőmérő technikával (CTA) vizsgáltam. Ez a mérés technika szakirodalom alapján kifejezetten alkalmas turbulencia vizsgálatára, mivel igen jó térbeli és időbeli felbontással rendelkezik (Comte-Bellot, 1976; Jørgensen, 2002; Lavoie et al., 2007). Az elsődleges vizsgálataimmal kimutattam, hogy a rács aktiválásának hatására jelentős mértékben növekedett a turbulencia-intenzitás, így a rács érdemes további vizsgálatokra. A kezdeti mérések rávilágítottak, hogy célszerű mechanikailag jóval ellenállóbb acél szalagokat alkalmaznom. Mivel az egyes szalagok azonos feszességre való beállítása is fontos, ezért a rácsot szalagonként egyedi erőmérőkkel és feszítőszerkezettel láttam el (1. ábra). E továbbfejlesztett ráccsal számos vizsgálatot végeztem, amelyek részleteit és eredményeit a Szaszák & Szabó (2013b), Szaszák & Szabó (2014a,b), Szaszák & Szabó (2015a,b), Szaszák et al. (2016); Szaszák et al. (2017a,b,c,d) publikációkban ismerttettem.



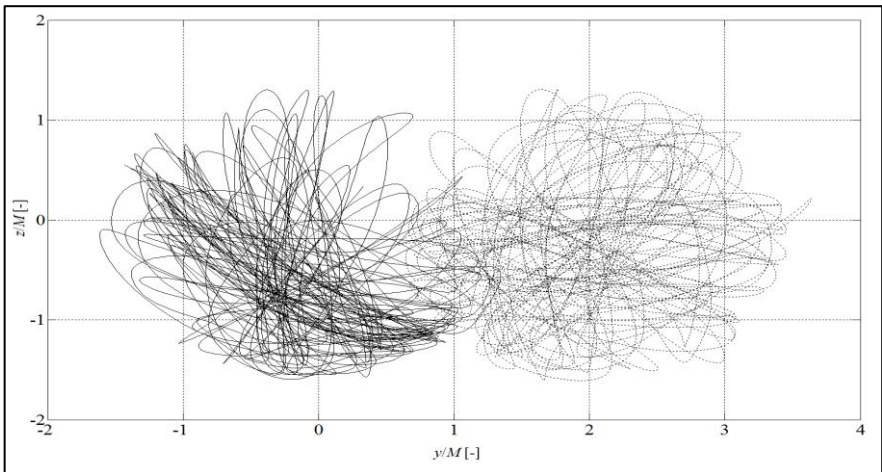
1. ábra Az erőmérővel ellátott rács két- és háromdimenziós rajzai.

A vizsgálatok során különböző alapáramlási sebességek, valamint szalag feszítő erők mellett, a ráctól mért különböző távolságokban és irányokban összehasonlítottam a passzív- (amikor a rács nem jön rezgésbe) és az aktív üzemállapotok eredményeit. A szisztematikus vizsgálatok alapján számos, a turbulenciára jellemző mennyiséget határoztam meg. Az eredmények alapján megállapítottam, hogy a vizsgált mérési tartományon a szalag-rács aktiválása jelentősen növelte a turbulencia-fokot (T_u). A passzív esethez képest jelentősen eltérő eredményeket kaptam továbbá az izotrópia-arány (i) turbulens kinetikus energia (k), turbulens kinetikus energia disszipációs ráta (ε), a Kolmogorov-hosszlépték (η), és a Taylor-Reynoldsszám (Re_λ) esetében is. A kapott értékeket szakirodalmi adatokkal (Comte-Bellot & Corrsin (1966), Makita (1991), Kurian & Fransson, 2009, Larssen & Devenport, 2002) vettem össze, melyek eredményeit a dolgozatomban részleteztem.

A turbulenciát leíró skaláris mennyiségek mellett a különböző léptékű turbulens örvények energiájának spektrális eloszlását is vizsgáltam (Szaszák et al., 2016; Szaszák et al., 2017a,c,d). Eltérően a rácturbulenciára jellemző spektrumoktól, egy lokális energia-maximum jelent meg, amely okát a szalagok rezgési frekvenciájában találtam meg. E jelenség tanulmányozására a szalagok rezgését nagysebességű kamerával vizsgáltam. Az eredmények alapján megállapítottam, hogy a szalagok rezgése okozza az energiaspektrumban látható lokális maximumot, amelynek jellemző frekvenciája jó közelítéssel megegyezik a szalagok átlagos rezgési frekvenciájával. A szalag-ráccsal kapcsolatot új tudományos eredményeimet a **Tézis I.**-ben foglaltam össze.

A rezgő szalagos rács vizsgálatain túl a légsugaras rács – a diplomamunkám alapján legjobbnak talált (Szaszák, 2012; Szaszák et al., 2012a) – aktív elemeinek mozgásformáit nagysebességű kamera segítségével is vizsgáltam. A kapott adatokat erre a célra Blanchet & Charbit

(2006) ajánlásai alapján fejlesztett MATLAB scripttel dolgoztam fel (Szaszák et al., 2014). Az eredmények alapján megállapítottam, hogy az aktív elemek jellemzően periodikus mozgást végeznek, azonban a gyakori ütközések hatására a mozgásformák folyamatosan változnak. Továbbá felmerült az addig alkalmazottaktól rugalmasabb, így aktívabb csövecskék használatának lehetősége. Ezért a későbbiekben vékonyabb csövecskéket alkalmaztam aktív elemként, s a véges sűrítettlevegő-kapacitás miatt minden második rácspont ledugózásra került. Az így összeállított rács a Tanszék laboratóriumában található Göttingen-típusú szélcsatornába építettük be, ahol elsőként a szomszédos aktív elemek mozgása közötti kapcsolatot vizsgáltam meg, szintén gyorskamerával. A 2. ábrán két, szomszédos csövecske végének $t=3,2$ s időintervallum alatt befutott pályája látható.

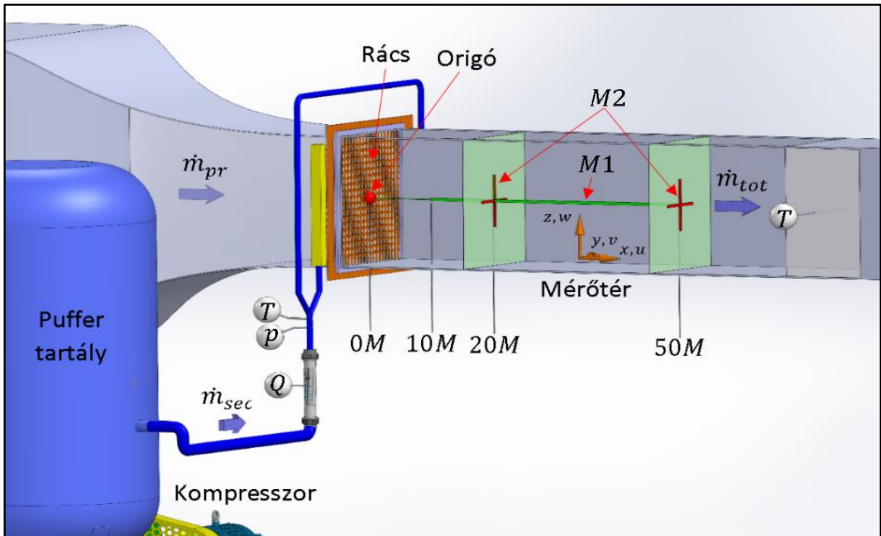


2. ábra Két csővég mozgásának dimenziótlan nyomvonalai 3,2 másodperces időintervallumban

A két pályavonal idősora segítségével meghatároztam, hogy milyen szintű korreláció áll fent a két csővég mozgása között. Eredményül $r=-0,0327$ korrelációs együttható adódott (Szaszák et al. 2018b). Ez az érték a $\pm 0,19$ -es intervallumon belül található, amely alapján megállapítható, hogy a vizsgált pályagörbék között nagyon gyenge a lineáris korreláció (Evans, 1996). Ezt kiterjesztve a teljes rácsra valószínűsíthető, hogy a rács egyes aktív elemei – adott időtáv esetén – egymástól független pályagörbéket írnak le. A kapcsolódó tudományos eredményeimet a **Tézis II.**-ben foglaltam össze.

E vizsgálataimat követően az aktív elemek dimenziótlanított paraméterekkel történő leírását végeztem el annak érdekében, hogy a vizsgált légsugaras rács a jövőben más ilyen jellegű, tehát mozgó csöveket tartalmazó rácsokkal összehasonlítható legyen. A dimenziótlan paraméterek meghatározásához Buckingham π -elméletét használtam fel (Brand, 1957). A csövek mozgását feltételezhetően befolyásoló fizikai mennyiségek segítségével három dimenziótlan számot vezettem be, ezeket a **Tézis III.**-ban ismertettem.

A szélcsatornába épített légsugaras rácsot követően kialakult turbulenciát szintén CTA technikával vizsgáltam, a mérési összeállítást a 3. ábra szemlélteti.

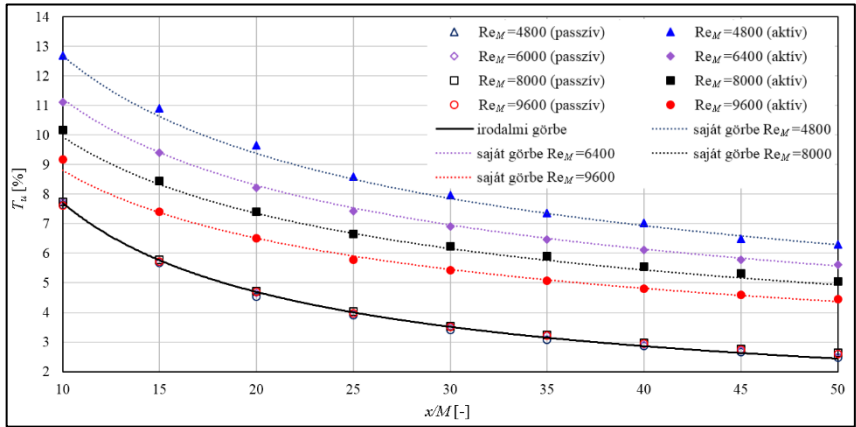


3. ábra A vizsgálatokhoz összeállított mérőrendszer.

A méréseket a mérőszakasz hossz tengelyén ($M1$), s a rácsból adott távolságú egyeneseken ($M2$) mentén is elvégeztem négy különböző légsűrűség esetén, a rács passzív és aktív üzemi állapotában egyaránt. A mért adatok feldolgozásával a rács esetében is számos, a turbulenciára jellemző mennyiséget határoztam meg, s hasonlítottam össze (Szászák et al. 2018b).

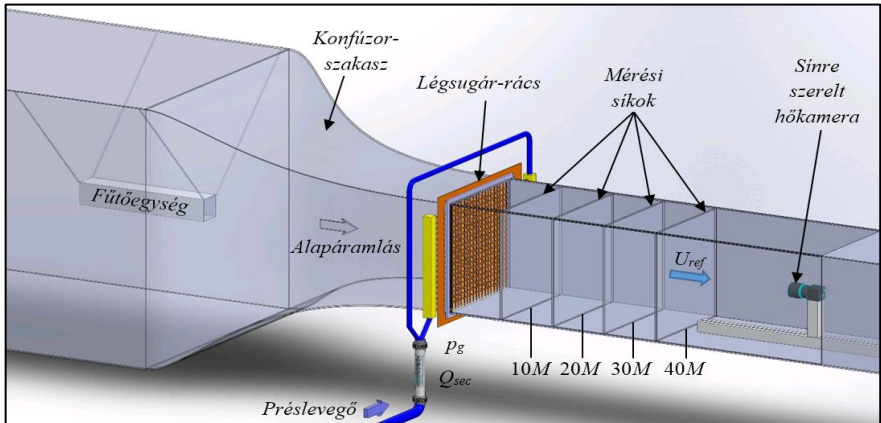
Ezek közül az egyik legjelentősebb eredményt a turbulencia-fok alakulásából (4. ábra) vonhattam le. A rács passzív állapotában kapott turbulencia-fok értékek igen jól közelíthetők a szakirodalomban adott empirikus összefüggéssel (Roach, 1987). Ehhez bevezettem a virtuális rácselem-vastagságot, amely a jelen lévő csövecskék zavaró/takaró hatása miatt a valós értéktől valamelyest nagyobb, feltételezhetően a passzív üzemi

esetén is. Továbbá aktív üzemállapotban a mért turbulencia-fok függ az áramlási sebességtől – így a Reynolds-számtól – (lásd 4. ábra), amely figyelembevételével egy, az adott mérési esetek adatpontjaira jól illeszkedő görbéket adó összefüggést határoztam meg. Ezt a **Tézis IV.**-ben foglaltam össze. A bemutatott mennyiség mellett számos fizikai jellemző is jelentős mértékben változott az aktiválás hatására, ezek eredményeit is e tézisben ismertetem.



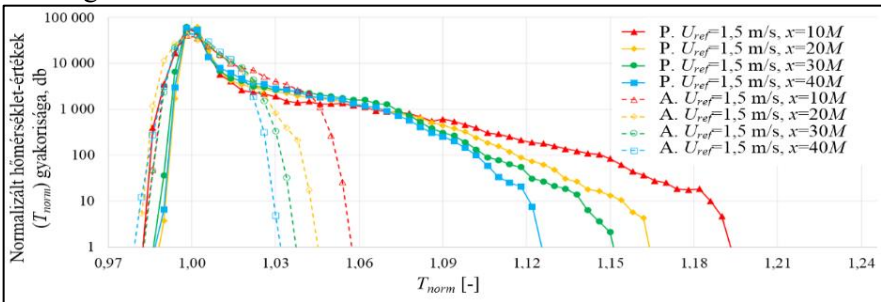
4. ábra A passzív üzemű (üres jelölők) és az aktivált rács (teli jelölők) esetén mért T_u értékek a rácsból mért távolság függvényében. Görbék: a passzív esethez tartozó adatpontokra fektetett szakirodalmi görbe (folytonos vonal) és az aktív üzemre jellemző, saját empirikus összefüggésből adódó görbék (pontvonal).

A pozitív eredmények tehát igazolták, hogy a légsugaras ráccsal is jelentős mértékben növelhető az áramló közeg turbulenciája. Mivel a turbulencia nagyfokú keveredéssel jár együtt, felmerült annak lehetősége, hogy a rács a laboratóriumi alkalmazása mellett keveréses folyamatokhoz is alkalmas lehet (Cekli et al. 2010b; Ckikh et al., 2012; Verbeek et al., 2013). Ezért egy olyan mérési összeállítást készítettem, amely segítségével vizsgálható a rácsot követő áramlási térben a rács keveredés-intenzifikáló hatása. Erre a célra a rácsot megelőző áramlási térben egy elektromos fűtőberendezéssel inhomogén hőmérsékletű áramlást hoztam létre, amely azt követően keresztülhaladt a rácson. A mérőtérben a rácsból különböző távolságokra egy porózus lapot helyeztem el, amelynek hőmérsékletét hőkamerával vizsgáltam. A mérési összeállítást az 5. ábra szemlélteti. A mérések során négy különböző sebesség, és három rács-állapotban (passzív, fél-aktív és aktív) különböző távolságokban vizsgáltam az áramlás hőmérsékletének homogenitását.



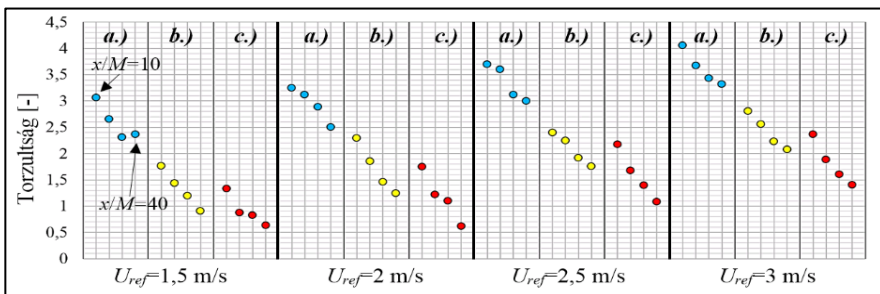
5. ábra A hőkamerás mérésekhez összeállított mérőrendszer vázlata.

A hőterképeket egy erre a célra általam készített programmal dolgoztam fel. Eredményként normalizált hisztogramokat és statisztikai mennyiségeket határoztam meg (Szaszák et al. 2018a és a Szaszák et al. 2019). A módusszal normalizált hőmérséklet hisztogramok alapján megállapítottam, hogy a hisztogram alakja szorosan összefügg a homogenitással: homogénebb hőmérsékletmező jellemzően kisebb területű hisztogramot eredményez. A 6. ábrán – adott áramlási sebesség esetén – a rács passzív és aktív üzemiállapotában számított hisztogramok láthatók a ráctól mért különböző távolságokban.



6. ábra A módusszal normalizált hőmérsékletmezők hisztogramjai passzív (P) és aktív (A) esetekben $U_{ref}=1,5$ m/s átlagsebesség esetén, a ráctól mért $x=10M-20M-30M-40M$ távolságokban lin-log skálázással.

A kiszámított statisztikai paraméterek közül a hőmérsékletértékek eloszlására jellemző torzultság-értékek szoros kapcsolatban állnak a vizsgált felület hőmérsékletmezőjének homogenitásával, ugyanis a vizsgált esetekre számított torzultság-értékek monoton változtak a távolsággal, az áramlási sebességgel, továbbá a rács üzemiállapotával együtt (7. ábra).



7. ábra Torziósság-értékek az összes vizsgált mérési esetben és síkban. Jelmagyarázat: kék körök: passzív-, sárga körök: fél-aktív-, piros körök: aktív üzemállapotú rács, továbbá az azonos színű csoportok elemei a rácsból mért távolság (x/M) függvényében ábrázolva.

A keveredéssel kapcsolatos eredményeimet a **Tézis V.**-ben foglaltam össze.

5. Összefoglalás

A doktori kutatómunkám eredményei rámutattak arra, hogy az általam vizsgált s tervezett új típusú, aktív turbulenciagenerátorok alkalmasak a passzív állapotukhoz viszonyítva jelentős mértékű turbulencia létrehozására. Igazoltam, hogy eredményeim a szakirodalmi, aktív rácsokra vonatkozó adatokkal összhangban állnak. Így tehát ezek a rácsok – viszonylagos egyszerű felépítésük ellenére – a jelenleg laboratóriumokban alkalmazott aktív turbulenciagenerátorokhoz viszonyítva költséghatékony alternatívát jelenthetnek.

6. Felhasználási lehetőségek, továbbfejlesztési irányok

A szalag-rács hasznosíthatóságát olyan területen képzelem el, ahol a kialakított nagyobb intenzitású turbulencia keverési feladatokat láthat el. Ilyen alkalmazás lehet például poros gázokat szállító csővezeték-hálózatba történő beépítés, ahol a csőhálózat bizonyos részein (például könyökökben, ívekben) porlerakódás vagy porcsóva alakulhat ki, amennyiben alacsony mértékű a turbulencia. A rács beépítésével növelhető a turbulencia, amivel szétbontható lenne mind a porcsóva, mind pedig a porlerakódás is. Acélszalagok alkalmazása esetén a rács beépíthető például viszonylag magas hőmérsékletű füstgázcsatornába is.

Amennyiben a szalag-rácsot laboratóriumi vizsgálatokhoz, turbulencia generálásához kívánjuk alkalmazni, úgy a továbbfejlesztési irány az általa

létrehozott turbulencia izotrópiájának javítását célzó megoldás kialakítása. Ennek egyik módja a már megépített, függőleges irányultságú szalagokra merőleges irányú szalag-rácsnak a jelenlegi rendszerhez történő hozzáillesztése.

A rugalmas elemeket tartalmazó légsugaras rács – annak meggyőző eredményei alapján – kifejezetten alkalmas a jelenleg elterjedten alkalmazott, Makita-féle aktív turbulenciagenerátorok helyettesítésére vagy kiváltására, hiszen számos esetben azokhoz hasonló paraméterekkel rendelkező turbulenciát képes létrehozni.

A szakirodalom alapján látható, hogy a legelterjedtebb, Makita-féle aktív rács működésének alapja a rács kitöltési tényezőjének időben történő gyors változtatása. Éppen ezért – a kitöltési tényező minél szélesebb tartományban történő gyors változtatása miatt – érdemes lenne a jelenleg alkalmazott csövecskék aktív, szabadon mozgó végei közelében azokra koncentrikusan, elhanyagolható tömegű testeket (például 10-20 mm-es átmérőjű vékony korongokat) rögzíteni.

A légsugaras rács másik, általam is vizsgált alkalmazási területe különböző fizikai/kémiai minőségű gázok intenzív keverése lehet. Aktív keverők számos ipari alkalmazás esetén előnyösen alkalmazhatók, ahol a passzív keverőkhöz viszonyított rövidebb keveredési úthossz az elvárás.

7. Új tudományos eredmények

TÉZIS I. Bizonyítást nyert, hogy létrehozható egy új típusú, függőleges beépítésű fémszalagokat, mint aktív elemeket alkalmazó turbulencia-generáló rács, amelyhez az áramlási téren kívül elhelyezett merevítőkeret, továbbá arra rögzített szalagonkénti feszítőerő-beállítást biztosító csavarrugós feszítőszerkezet tartozik. Szisztematikus vizsgálatok eredményeként az alábbi főbb megállapítások tehetők:

- Megfelelően nagy ($U_{ref} = 4-6$ m/s) áramlási sebesség esetén a szalagok aktiválódnak, periodikus torziós mozgást végeznek, amely hatására nő az áramló közeg alapáramlás-irányú turbulencia-foka (T_u) és turbulens kinetikus energiája (k). Ez a ráctól mért $x/M = 10 \div 30$ dimenziótlan távolság-intervallumban egyértelműen igazolható volt.
- A rácsot követő áramlási tér vizsgált ($x/M = 10 \div 30$) térrészében kialakuló turbulencia egydimenziós alapáramlás irányú energiaspektrumában ($E_u(\kappa)$) – más, aktív rácsok esetén nem jelentkező - lokális spektrális-energia maximum alakul ki, amely a fémszalagok periodikus mozgására jellemző frekvenciának megfelelő hullámszámhoz (κ) tartozik. Ezen eltérés a ráctól mért távolsággal együtt fokozatosan elhal és $x/M > 25$ értékek esetén már nem mutatható ki.
- A vizsgált feszítőerő-intervallum ($F = 10 \div 16$ N) esetén a fémszalagok periodikus mozgásának frekvenciája a feszítőerő növelésével jó közelítéssel ($R^2 \sim 0,99$) lineárisan nő.

A rács kiemelkedő előnye, hogy az alapáramlás energiáján kívül nem igényel semmilyen kiegészítő energiaforrást, mozgató szerkezetet.

A tézishoz kapcsolódó publikációim: Szaszák & Szabó 2013b; Szaszák & Szabó 2014a,b; Szaszák & Szabó 2015a,b; Szaszák et al. 2016; Szaszák et al. 2017a,b,c,d.

TÉZIS II. Szisztematikus fejlesztési tevékenység eredményeképpen kifejlesztésre került egy új típusú légsugar rács, amely esetén – az irodalomban ismert, légsugarat alkalmazó rácsok továbbfejlesztéseként – a légsugarak rugalmas csövecskéken keresztül lépnek be az áramlási térbe. A kiáramló levegő impulzusereje a csöveket intenzív mozgásba hozza, ezzel az időben változó irányú légsugarakkal a rács által indukált turbulencia jellemzői kedvező irányba változnak.

A mozgó elemek gyorskamerával történt vizsgálatát követő számítógépes képfeldolgozás megmutatta, hogy a rács aktív üzemállapotában a mozgó elemek mozgásformái periodikus jellegűek. A mozgásra azonban jelenetős hatással van a szomszédos aktív elemek és az azokból kiáramló légsugarak interakciója. A rács aktív üzemállapotában – a megfigyelt időintervallumban ($t = 3,2$ s) – lineáris kapcsolat nem állt fenn a vizsgált szomszédos elemek között, azaz az aktív elemek pályagörbéi egymástól lineárisan függetlennek tekinthetők.

A tézishez kapcsolódó publikációim: Szaszák 2012; Szaszák et al. 2012a; Szaszák et al. 2014; Szaszák et al. 2018a; Szaszák et al. 2018b; Szaszák et al. 2019.

TÉZIS III. A légsugaras turbulenciagenerátorban alkalmazott aktív elemek aktivitása leírható három újonnan – a Buckingham π elmélet alapján – definiált dimenzió nélküli mennyiséggel. Ezek:

$C_t = w_t/d_{i,t}$, az aktív elem relatív falvastagsága (falvastagság/belső átmérő);

$C_a = l^*/d_{i,t}$, az aktív elem relatív hossza, ahol l^* az aktív elem tömegközéppontjának az aktív csőszakasz kezdetétől mért távolsága;

$C_m = \rho_t E_t d_{i,t}^4 / \dot{m}_t^2$, mobilitási számnak elnevezett jellemző, amely az elem anyagtulajdonságait (anyag-sűrűség, rugalmassági modulus), belső átmérőjét és a dinamikájáért felelős légtömegáramot tartalmazza.

A tézishez kapcsolódó publikációim: Szaszák et al. 2014; Szaszák et al. 2018b.

TÉZIS IV. A kifejlesztett, rugalmas elemekkel felszerelt légsugaras rács passzív üzemállapotában az irodalomban közölt – az alapáramlás irányú turbulencia-fokra vonatkozó – $T_u = 1,13 \cdot (x/D)^{-5/7}$ összefüggés érvényes a valós $D = 5$ mm helyett a rugalmas csövecskék takaró hatását figyelembe vevő $D^* = 5,82$ mm virtuális rácsvastagság alkalmazásával. Aktív esetben a passzív esetet leíró összefüggés nyomán a mérési eredményekre illeszthető egy, a különböző áramlási sebességekhez tartozó rács-Reynolds-számokat (Re_M) is figyelembe vevő összefüggés:

$$T_u(Re_M) = e^{-7,6 \cdot \left(\frac{Re_M}{10^5}\right)} \cdot \left(\frac{x}{D}\right)^{-10/23}.$$

A légsugaras rács aktiválása jelentős hatással van – az $x/M = 10 \div 50$, $U_{ref} = 3 \div 6$ m/s intervallumban – a szakirodalomban a rácesturbulencia jellemzésére elterjedten alkalmazott paraméterekre. A rács aktív üzemkor e hatások a passzív üzemállapot esetén mértekhez arányítva a következők:

- Az alapáramlás irányú turbulencia-fok (T_u) az összes vizsgált esetben növekedett.

A legkisebb arány ($T_{u,aktív}/T_{u,passzív} = 1,205$) $U_{ref} = 6$ m/s és $x/M = 10$ esetén adódott, a legnagyobb ($T_{u,aktív}/T_{u,passzív} = 2,56$) pedig $U_{ref} = 3$ m/s és $x/M = 50$ esetben.

- A fajlagos turbulens kinetikus energia (k) minden esetben növekedett. A legkisebb arányszám ($k_{aktív}/k_{passzív} = 1,66$) $U_{ref} = 6$ m/s és $x/M = 10$ esetén adódott, a legnagyobb ($k_{aktív}/k_{passzív} = 6,61$) pedig $U_{ref} = 3$ m/s és $x/M = 50$ esetben.

- A turbulens kinetikus energia disszipációs rátája (ε) a teljes vizsgálati tartományon növekedett, míg a disszipációs konstans (C_ε) és a Kolmogorov-hosszlépték (η) értéke csökkent.

- A Taylor-Reynolds-szám (Re_λ) minden mérési esetben nőtt.

A legkisebb arányszám ($Re_{\lambda,aktív}/Re_{\lambda,passzív} = 1,505$) $U_{ref} = 6$ m/s és $x/M = 10$ esetén adódott, a legnagyobb arány ($Re_{\lambda,aktív}/Re_{\lambda,passzív} = 5,66$) pedig $U_{ref} = 3$ m/s és $x/M = 50$ esetben.

- Az egydimenziós, alapáramlás-irányú, normalizált energiaspektrumok ($E_u(\kappa)$) alapján megállapítható, hogy azonos vizsgálati paraméterek esetén a rács aktiválása a passzív esetben kalkulálttól szélesebb, az elméleti, $-5/3$ -os meredekségű görbét jobban közelítő tehetetlenségi tartományt eredményez.

A tézishez kapcsolódó publikáción: Szaszák et al. 2018b.

TÉZIS V. A kifejlesztett légsugaras rács keveredés-intenzifikáló hatásának laboratóriumi vizsgálatára egy újonnan kifejlesztett hőkamerás mérési eljárás alkalmazható. Ennek alapja a rács előtt létrehozott inhomogén hőmérsékletmező változásának a rácsot követő mérőterben hőkamerával történő vizsgálata. Az inhomogén hőmérsékletmező előállítás a rácsot megelőzően, az áramló levegő egy részének villamos fűtésével történik. A mérőterben kialakuló áramlás adott keresztmetszetbeli hőmérsékletmezőjének meghatározásához egy – alacsony áramlási ellenállású – porózus emissziós-felület kerül beépítésre az alapáramlás

irányára merőlegesen. E felület hőmérséklet-eloszlása jellemzi a keresztmetszetbeli keveredettséget, amely a felületről készült hőképpel rögzíthető. Az elkészült hőtérképek számítógépes feldolgozásával a keveredést jellemző mennyiségek nyerhetők. A vonatkozó mérések a légsugaras rács passzív, fél-aktív és aktív állapotai esetén $U_{ref} = 1,5 \div 3$ m/s és $x/M = 10 \div 40$ intervallumokban történtek. Az adatok feldolgozásával kalkulálhatók a leggyakoribb hőmérséklet-értékkel normalizált hisztogramok, valamint a hőmérsékletmező homogenitásával egyértelmű kapcsolatban álló torzultság értékek.

A normalizált hisztogramok alapján megállapítható, hogy a vizsgált esetekben a hőmérsékletmező homogénebbé tehető a rácstól mért távolság növelésével, az áramlási sebesség csökkentésével, továbbá a rács aktiválásával. Bármely vizsgált sebesség- és rács-mód beállítás esetén a távolság növelésével a torzultság-értékek monoton csökkennek. Adott sebesség és távolság mellett a rács aktiválásának növelése rendre csökkenő, míg adott rács-mód és távolság esetén növekvő sebességek rendre növekvő torzultság-értékeket eredményeznek.

A tézishez kapcsolódó publikációim: Szaszák et al. 2018a; Szaszák et al. 2019.

8. New scientific results

CONTRIBUTION 1 A new type turbulence grid was created which consists of metal tapes oriented in vertical direction as active elements and a rigid frame assembled outside of the flow field. The tensioning force of each metal tape is individually adjustable by means of a screw tensioner device assembled on the frame.

Based on systematic investigations the most important findings are:

- In case of sufficiently high ($U_{ref} = 4-6$ m/s) mean velocity the tapes are activated, performing periodic, torsion-like motion. As a result, the streamwise turbulence intensity (T_u) and the turbulence kinetic energy of the flow (k) are increased. This finding was verified in the dimensionless distance range of $x/M = 10 - 30$.
- In the longitudinal energy spectra $E_u(\kappa)$ of the investigated interval of ($x/M = 10 - 30$) a local maximum is present, which is not the case in other types of active grids. This belongs to the wavenumber (κ) corresponding to the frequency of the periodic motion of the metal tapes. The presence of the local maximum gradually decays with the distance from the grid, and at distances of $x/M > 25$ is not detectable.
- The relationship between the frequency of the periodic motion of the metal tapes and the tensioning force is linear with good approximation ($R^2 \sim 0.99$) in the investigated range of ($F = 10 - 16$ N).

An outstanding advantage of this grid is that there is no need for an additional energy source for its operation beyond the energy of the main flow.

Related publications: Szaszák & Szabó 2013b; Szaszák & Szabó 2014a,b; Szaszák & Szabó 2015a,b; Szaszák et al. 2016; Szaszák et al. 2017a,b,c,d.

CONTRIBUTION 2 A new type of jet grid is developed by improving on the jet grids found in the literature, here the jets issue out from moving flexible tubes. The tubes move in an intensive manner caused by the momentum of the air jets. The direction of the jets changes with time, which results in turbulence downstream of the grid with favorable properties.

Based on the image processing of the Hi-Speed camera records of the moving tubes it was found that the motion of the tubes is periodic. However, there is significant effect of the frequent collision of neighboring tubes, as

well as the jet interactions. In the active state of the grid, a linear relationship does not exist between the observed two neighboring tubes in the investigated time interval of $t = 3.2$ s, i.e. the trajectories of the tubes are linearly independent.

Related publications: Szaszák 2012; Szaszák et al. 2012a; Szaszák et al. 2014; Szaszák et al. 2018a, b; Szaszák et al. 2019.

CONTRIBUTION 3 The “activity” of the active elements used in the jet grid – based on Buckingham’s π theorem – can be characterized by three newly introduced dimensionless numbers. These are the following:

$C_t = w_t/d_{i,t}$, relative wall thickness of the tube (wall thickness/inner diameter);

$C_a = l^*/d_{i,t}$, relative length of the tube, where the center of gravity of the active part of the tube measured from its connection is denoted by l^* ;

$C_m = \rho_t E_t d_{i,t}^4 / \dot{m}_t^2$, the mobility number which contains the material properties of the tube (density, Young’s modulus), inner diameter, and the mass flow rate of the air jet.

Related publications: Szaszák et al. 2014; Szaszák et al. 2018b.

CONTRIBUTION 4 The empirical formula concerning the streamwise turbulence intensity found in the literature – $T_u = 1.13 \cdot (x/D)^{-5/7}$ is valid for the passive case of the developed jet-grid if a virtual thickness of the rod – which takes into account the presence of the tubes with a value of $D^* = 5.82$ mm – is applied instead of the real thickness of the rod ($D = 5$ mm). For the active state of the grid another empirical formula can be defined that is a function of the mesh-Reynolds number (Re_M):

$$T_u(Re_M) = e^{-7.6 \cdot \left(\frac{Re_M}{10^5}\right)} \cdot \left(\frac{x}{D}\right)^{-10/23}.$$

The activation of the jet-grid has significant effects on the turbulence properties widely used in literature, in the investigated intervals of $x/M = 10 - 50$, $U_{ref} = 3 - 6$ m/s. The ratios of the values in case of active state to the values belonging to the passive state of the grid are the following:

- The streamwise turbulence intensity (T_u) was increased in all investigated cases. The smallest ratio ($T_{u,aktiv}/T_{u,passziv} = 1.205$) resulted at $U_{ref} = 6$ m/s and $x/M = 10$, while the largest value

($T_{u,active}/T_{u,passive} = 2.56$) resulted at $U_{ref} = 3$ m/s and at $x/M = 50$.

- The specific turbulence kinetic energy (k) increased in all cases. The smallest value ($k_{active}/k_{passive} = 1.66$) resulted at $U_{ref} = 6$ m/s and $x/M = 10$, while the largest value ($k_{active}/k_{passive} = 6.61$) resulted at $U_{ref} = 3$ m/s and $x/M = 50$.
- The dissipation rate of turbulence kinetic energy (ε) increased in all cases, while the dissipation constant (C_ε) and the Kolmogorov lengths scale (η) decreased when in active state. Taylor-Reynolds number (Re_λ) increased in all cases. The smallest ratio ($Re_{\lambda,active}/Re_{\lambda,passive} = 1.505$) resulted at $U_{ref} = 6$ m/s and $x/M = 10$, while the largest value ($Re_{\lambda,active}/Re_{\lambda,passive} = 5.66$) resulted at $U_{ref} = 3$ m/s and $x/M = 50$.
- Based on the longitudinal, one-dimensional energy spectra ($E_u(\kappa)$) it was found that in case of the same measurement conditions, the activation of the grid resulted in a wider inertial subrange which follows better the theoretical $-5/3$ curve.

Related publication: Szaszák et al. 2018b.

CONTRIBUTION 5 A newly developed thermal imaging camera measurement technique can be applied for investigating the intensification of the mixing effect of the developed jet-grid. This technique is based on the measurement of the inhomogeneity of the temperature field downstream of the grid. The strongly inhomogeneous temperature field is created upstream of the grid in the center line of the wind tunnel by means of an electrical heater. A low-flow-resistance porous felt sheet is inserted perpendicular to the mean flow in the test section downstream of the grid. The temperature distribution of the surface of the sheet characterizes the degree of mixing, which can be investigated by a thermal camera. By computer processing of the thermograms, quantities related to the mixing can be obtained. Measurements were performed in the passive, semi-active, and active grid states in the intervals of $U_{ref} = 1,5 - 3$ m/s and $x/M = 10 - 40$. Histograms of the temperature fields normalized by the most frequent value (modus) and the skewness values were calculated, which are clearly related to the homogeneity of the temperature field.

Based on the normalized histograms it was found in the investigated cases– that a more homogeneous temperature field can be obtained by increasing the distance from the grid or by decreasing the mean velocity of the flow, furthermore by activating the grid. The values of skewness monotone decrease with increasing distance in case of all investigated mean velocities and grid states. At a given mean velocity and distance, decreasing values of skewness were found with increasing activity of the grid. At a given grid state and distance, the values of skewness increased with the velocity.

Related publications: Szaszák et al. 2018a; Szaszák et al. 2019.

9. A kutatási témában megjelent saját publikációk

Magyar nyelven

Szaszák, N., Mátrai, Zs., Szabó, Sz.: “*Mini szélcsatorna sebességeloszlásának beállítása áramlásrendezők beépítésével.*” GÉP LXIII:(9), pp. 53-56. 2012b.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: “*Légcsatorna fejlesztése turbulenciagenerátorok vizsgálatához.*” Proc. OGÉT 2013, XXI. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, Konferencia helye, ideje: Arad, Románia, 2013.04.25.-2013.04.28., pp. 372-375. 2013a.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: “*Rugalmas szalagok, mint aktív turbulenciagenerátorok laboratóriumi vizsgálata.*” Multidiszciplináris tudományok vol. 3(2). pp. 327-336. 2013b.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: “*Rugalmas szalagok alkalmazhatóságának vizsgálata turbulencia generálásához.*” Proc. Fialat Műszakiak Tudományos Ülészaka (FMTÜ), Konferencia helye, ideje: Kolozsvár, Románia. 2014.03.20.- 2014.03.21., pp. 365-368. 2014b.

Szaszák, N., Dorogi, D., Roloff, C., Thévenin, D., Szabó, Sz.: “*Turbulenciagenerátorban használt aktív elemek mozgásának vizsgálata nagysebességű kamera alkalmazásával.*” Multidiszciplináris tudományok vol. 4(1), pp. 103-114. 2014.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: “*Új típusú, turbulencia-generáló aktív rács laboratóriumi vizsgálata állandó hőmérsékletű légsebességmérő technika alkalmazásával.*” A XX. Fialat Műszakiak Tudományos Ülészak előadásai. Konferencia helye, ideje: Kolozsvár, Románia, 2015.03.19., pp. 279-282. 2015a.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: “*Szélcsatornába beépített fémszalagrács után kialakuló áramlás vizsgálata hődrótos mérés technika alkalmazásával.*” Proc. OGÉT 2015: XXIII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó. Konferencia helye, ideje: Csíksomlyó, Románia, 2015.04.23.-2015.04.26., pp.342-345, 2015b.

Szaszák, N., Szabó, Sz., Bencs, P.: “*Aktív rács keltette turbulencia jellemzőinek meghatározása hődrótos adatok alapján.*” Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok vol. 12(4), pp. 103-111. 2017d.

Idegen nyelven

Szaszák, N.: “*Experimental characterization of a cost-effective active grid for turbulence generation.*” diplomamunka, Miskolci Egyetem Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszék („Otto von Guericke” University of Magdeburg), 2012.

Szaszák, N., Bordás, R., Mátrai, Z., Thévenin, D., and Szabó, S.: “*Experimental characterization of a cost-effective semi-active grid for turbulence stimulation.*”

Proc. Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'12). Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2012.09.04.-2012.09.07., pp. 362-368. 2012a.

Szaszák, N.: “*Development of small size wind tunnel for investigation of turbulence generators.*” Tavaszi Szél Konferencia. Konferencia helye, ideje: Sopron, Magyarország, 2013.05.31.-2013.06.02., pp. 218-225. 2013.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: “*Experimental study of elastic tapes in wind tunnel as turbulence generator.*”, 28th microCAD Nemzetközi Multidiszciplináris Tudományos Konferencia. Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország. 2014.04.10.-2014.04.11., pp. 9-17. 2014a.

Szaszák, N., Bencs, P., Szabó, Sz.: “*Effects of tension of fluttering tapes on turbulent flow properties downstream of an active grid*”, 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies (ESAT 2016). Konferencia helye, ideje: Matlárháza, Szlovákia, 2016.06.29.-2016.07.01., pp. 1-9. 2016.

Szaszák, N., Bencs, P., Szabó, Sz.: “*Experimental investigation of the effects of tensile force on the characteristics of turbulence downstream of a novel active grid.*” Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II: Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies, Konferencia helye, ideje: Matlárháza, Szlovákia, 2016.06.29.-2016.07.01., CRC Press/Balkema, pp. 261-266. 2017a. **SCOPUS-indexált.**

Szaszák, N., Bencs, P., Szabó, Sz.: “*Determining turbulent properties in grid generated turbulence based on hot-wire data.*” International Conference on Innovative Technologies: IN-TECH. Konferencia helye, ideje: Ljubljana, Szlovénia, 2017.09.11.-2017.09.13., pp. 149-152. 2017b.

Szaszák, N., Bencs, P., Szabó, Sz.: “*Influence of flat tape grid on the turbulence properties of airflow in a wind tunnel.*” International Conference on Innovative Technologies: IN-TECH. Konferencia helye, ideje: Ljubljana, Szlovénia, 2017.09.11.-2017.09.13., pp. 149-152. 2017c.

Szaszák, N., Szabó, Sz., Bencs, P.: “*Enhancement of mixing in gas medium by means of active turbulence generator.*” 3rd International Conference on Engineering Sciences and Technologies, ESAT 2018. Konferencia helye, ideje: Matlárháza, Szlovákia, 2018.09.12.-2018.09.14., pp. 1-4. 2018a.

Szaszák, N., Roloff, C., Bordás, R., Bencs, P., Szabó, S, Thévenin, D.: “*A novel type of semi-active jet turbulence grid.*” Heliyon, vol. 4:12, e01026, pp. 1-25. 2018b. **SCOPUS-indexált, SJR(2017): 0,36.**

Szaszák, N., Bencs, P., Szabó, Sz.: “*Intensification of turbulent mixing in gases by means of active turbulence grid.*” Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II: Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering Sciences and Technologies. Konferencia helye, ideje: Matlárháza, Szlovákia, 2018.09.12.-2018.09.14. CRC Press/Balkema, pp. 1-6. 2019. **SCOPUS-indexált.**

10. A szerző egyéb témákban megjelent publikációi

Szaszák, N., Szabó, Sz.: "Szárnykeres mérőt tartalmazó áramlásmérő szakasz kalibrációja erre a célra létrehozott mérőberendezéssel." Proc. OTDK 2011 Baja, XXX. Jubileumi Országos Tudományos Diákköri Konferencia, Baja, pp. 161.(kivonatolt). 2011.

Szaszák, N., Szabó, Sz.: "Elemző számítások Stockholm és Csíkszereda városban rendelkezésre álló napenergia hasznosítására." Proc. OGÉT 2011, XIX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, Csíkszereda, Románia, pp. 339-342. 2011.

Lakatos, K., Szaszák, N., Mátrai, Zs., Soltész, L., Szabó, Sz.: "Experimental development of guide vanes and return guide vanes of a mini blower." Proc. MicroCAD 2011, International Computer Science Conference, Miskolc, pp. 65-72. 2011.

Lakatos, K., Szaszák, N., Mátrai, Zs., Szabó, Sz.: "Monoblokk rendszerű mini fűvó vezető és visszavezető kerekai kialakításának analízise méréssel." Szivattyúk, kompresszorok, Vákuumszivattyúk vol. 18, pp. 65-71. 2011.

Mátrai, Zs., Szaszák, N.: "LDV measurement uncertainties in an artificial aneurysm model." Gépészet 2012. Proc. of the Eighth International Conference on Mechanical Engineering. Budapest, pp. 330-336. 2012.

Mátrai, Zs., Roloff, C., Bordás, R., Szaszák, N., Szabó, Sz., Thévenin, D.: "Investigation of the velocity field in a full-scale artificial medical model." Proc. Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'12). The 15th International Conference on Fluid Flow Technologies, Budapest, pp. 136-143. 2012.

Mátrai, Zs., Szaszák, N., Szabó, Sz.: "Measuring of Velocity field in an Artificial Model." Proc. MicroCAD '13 International Computer Science Conference, Miskolc, paper Nr. 4. pp. 1-6. 2013.

Roloff, C., Bordás, R., Nickl, R., Mátrai, Zs., Szaszák, N., Szabó, Sz., Thévenin, D.: "Investigation of the velocity field in a full-scale model of a cerebral aneurysm." International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 43: pp. 212-219. 2013. **SCOPUS-indexált; 8 független hivatkozás; SJR(2017): 0,95.**

Bodnár, I., Szaszák, N.: „Gőztől a benzinig, benzintől a fagázig, avagy a fagázüzemű gépek fejlődéstörténete.” Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT): VIII. Tudomány- és Technikatörténeti Konferencia, Belényes, Románia, pp. 25-31. 2015.

Koós, D., Szaszák, N., Bodnár, I., Boldizsár, Cs.: "Temperature dependence of solar cell's efficiency." Acta Technica Corviniensis- Bulletin of Engineering vol. 9(2), pp. 107-110. 2016.

Boldizsár, Cs., Bodnár, I., Szaszák, N., Koós, D.: "Designing procedure of innovative photovoltaic solar water heater system." Acta Technica Corviniensis- Bulletin of Engineering vol. 9(2), pp. 71-74. 2016.

11. Irodalomjegyzék

- Aufderheide, T., Bode, C., Friedrichs, J., Kozulovic, D.: “*The generation of higher levels of turbulence in a low-speed cascade wind tunnel by pressurized tubes.*” 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 2014.
- Blanchet, G., Charbit, M.: “*Digital Signal and Image Processing using MATLAB*” könyv, ISTE Ltd. 2006.
- Brand, L.: “*The Pi theorem of dimensional analysis.*” Archive for Rational Mechanics and Analysis, vol. 1(1), pp. 35-45. 1957.
- Cekli, H. E., Tipton, C., Water, W. v.d.: “*Resonant enhancement of turbulent energy dissipation.*” Phys Rev Lett vol. 105(4), pp. 503. 2010b.
- Chiekh, M. B., Bera, J.-C., Sunyach, M.: “*Synthetic jet control for flows in a diffuser: vectoring, spreading and mixing enhancement.*” Journal of Turbulence vol. 4(32) pp.1-12. 2003.
- Comte-Bellot, G., Corrsin, S.: “*The use of a contraction to improve the isotropy of grid-generated turbulence.*” Journal of Fluid Mechanics, vol. 25(4), pp. 657-668. 1966.
- Comte-Bellot, G.: “*Simple eulerian time correlation of full- and narrow-band velocity signals in grid-generated, isotropic turbulence.*” Journal of Fluid Mechanics vol. 48(2), pp. 273-337. 1971.
- Comte-Bellot, G.: “*Hot-Wire anemometry.*” Annu. Rev. Fluid Mech. vol. 8, pp. 209-231. 1976.
- Discetti, S., Ziskin, I. B., Astarita, T., Adrian, R. J., Prestridge, K. P.: “*PIV measurements of anisotropy and inhomogeneity in decaying fractal generated turbulence.*” Fluid Dyn. Res. vol. 45, 22pp. 2013.
- Gad-el-Hak, M., Corrsin, S.: “*Measurements of the nearly isotropic turbulence behind a uniform jet grid.*” Journal of Fluid Mechanics vol. 62(1), pp. 115-143. 1974.
- Evans, J. D.: “*Straightforward statistics for the behavioral sciences.*” Pacific Grove, CA: Brooks/Cole Publishing. 1996.
- Jørgensen, F. E.: “*How to measure turbulence with hot-wire anemometers- a practical guide.*” Dantec Dynamics, Dánia, 2002.
- Kurian, T., Fransson, J. H. M.: “*Grid-generated Turbulence revisited.*” Fluid Dyn. Research, vol. 41, pp 1-32. 2009.
- Larssen, J. V., Devenport, W. J.: “*The Generation of High Reynolds Number Homogeneous Turbulence.*” 32nd American Institute of Aeronautics and Astronautics: Fluid Dynamics Conference and Exhibit, pp. 1-7. 2002.
- Lavoie, P., Avallone, G., De Gregorio, F., Romano, G. P., Antonia, R. A.: “*Spatial resolution of PIV for the measurement of turbulence.*” Exp. Fluids, vol. 43, pp. 39-51. 2007.
- Ling, S. C. & Wan, C. A.: “*Decay of isotropic turbulence generated by a mechanically agitated grid.*” Phys. Fluids vol. 15(8), pp. 1363-1369. 1972.
- Makita, H., Miyamoto, S.: “*Generation of high intensity turbulence and control of its structure in a low speed wind tunnel.*” Proc. 2nd. Asian Congress on Fluid Mechanics Beijing, China, pp. 101-106. 1983.

- Makita, H.: “*Realization of a large-scale turbulence field in a small wind tunnel.*” Fluid Dynamics Research vol. 8, pp. 53-64. 1991.
- Mathieu, J., Alcaraz, E.: “*Réalisation d’une soufflerie à haut niveau de turbulence.*” CR. Acad. Sci. vol. 261(2435). 1965.
- Ozono, S., Nishi, A., Miyagi, H.: “*Turbulence generated by a wind tunnel of multi fan type in uniformly active and quasi-grid modes.*” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 94, pp. 225-240. 2006.
- Pope, S. B.: “*Turbulent Flows.*” Cambridge Univ. Press. 2000.
- Roach, P. E.: “*The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids.*” Int. J. Heat Fluid Flow vol. 8, pp. 82-92. 1987.
- Sakai, Y., Watanabe, T., Kamohara, S., Kushida, T., Nakamura, I.: “*Simultaneous measurements of concentration and velocity in a CO₂ jet issuing into a grid turbulence by two-sensor hot-wire probe.*” International Journal of Heat and Fluid Flow vol 22(3), pp. 227-236 2001.
- Simmons, L. F. G., Salter, C.: “*Experimental investigation and analysis of the velocity variations in turbulent flow.*” Proceedings of the Royal Society of London. Series A vol. 145(854), pp. 212-234. 1934.
- Verbeek, A. A., Pos, R. C., Stoffels, G. G., Geurts, B. J., van der Meer, T. H.: “*A compact active grid for stirring pipe flow.*” Experiments in fluids, vol. 54(10), 1594. 2013.
- Zhou, Y., Nagata, K., Sakai, Y., Suzuki, H., Ito, Y., Terashima, O., Hayase, T.: “*Relevance of turbulence behind the single square grid to turbulence generated by regular- and multiscale-grids.*” Phys. Fluids vol. 26, 075105. 2014.

Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt szeretném megköszönni doktori témavezetőmnek, Prof. Szabó Szilárdnak a kutatómunkám teljes ideje során nyújtott szakmai segítségét mind a mérési feltételek megteremtésében, mind a kísérleti munka elvégzésében és kiértékelésében, mind pedig az értekezésem minél színvonalasabb munkává válásának szakszerű, jelentékeny támogatásában. A szakmai vezetése, iránymutatása és számos esetben a kutatási eredmények alapos és következetes kritikája jelentős segítséget és motivációt jelentett a kutatómunkám során.

Köszönet illeti a magdeburgi „Otto von Guericke” Egyetem Áramlástechnikai és Termodinamikai Intézetének igazgatóját, Dominique Thévenin professzort és kollégáját, Dr. habil. Janiga Gábort a több alkalommal számomra biztosított szakmai, műszaki és anyagi támogatásért, amelyek mind hozzájárultak a dolgozat elkészítéséhez.

Továbbá szeretném köszönetemet kifejezni Dr. Bencs Péter kollégámnak, aki számos laboratóriumi vizsgálatom során segített szakmai tapasztalataival. Tanszékvezetőként is kiemelten támogatta a PhD fokozatom megszerzését külföldi szakmai konzultációk lehetőségének megteremtésével, valamint a kutatásomhoz szükséges mérőberendezések biztosításával.

Köszönettel tartozom a tanszéki laboratórium műszaki szolgáltatóinak, Farkas Lászlónak és Ramada Zoltánnak, akik számos esetben segítettek a méréseimhez szükséges berendezések összeállításában.

Köszönet illeti továbbá a Tanszék összes munkatársát, akik a legkülönfélébb módon járultak hozzá ahhoz, hogy eredményes kutatómunkát végezhettem. Külön köszönettel tartozom Baranyi László professzor úrnak és Robin Nagano Lee asszonynak, akik a munkám során számos alkalommal, nagy precizitással végezték el az angol nyelvű szakmai szövegek lektorálását.

Végül, de nem utolsó sorban kifejezetten szeretném megköszönni páromnak, barátaimnak, továbbá családomnak, kiváltképp édesanyámnak, édesapámnak és húgomnak a kitartó türelmüket, akik minden tekintetben támogatták a doktori kutatómunkámat, majd pedig a doktori értekezésem elkészítését.

A kutatómunka az Európai Unió és a magyar állam támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával, a GINOP-2.3.4-15-2016-00004 projekt keretében valósult meg, a felsőoktatás és az ipar együttműködésének elősegítése céljából.