

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Gépészmérnöki Kar Doktori Tanács tézisfüzetei

## **TÉZISFÜZET**

Készítette: Suda Jenő Miklós

# **KÉTFÁZISÚ ÁRAMLÁS MODELLEZÉSE ELEKTROSZTATIKUS LEVÁLASZTÓBAN**

című témakörből,

amellyel a Ph.D. fokozat elnyerésére pályázik

Témavezető: Dr. Lajos Tamás egyetemi tanár

Budapest, 2007

## 1. BEVEZETÉS, A KUTATÁS ELŐZMÉNYEI, CÉLKITŰZÉSEK

Az elektrosztatikus leválasztó technológia elvi alapja meglehetősen egyszerű: a berendezésben átáramló gázban levő leválasztandó részecskék a koronakisülés során keletkező töltéshordozók segítségével villamosan feltöltődnek, majd a leválasztótér villamos erőterében pedig az elektrosztatikai erő hatására a töltött részecskék a földelt gyűjtőelektródok felé mozognak, majd azokon feltapadva a gázáramból leválasztódnak. A leválasztandó részecskék mozgását („életciklusát”) a *feltöltés - transzport - leválasztás* részfolyamatok során ható erők határozzák meg, miközben azt a szállító közeg áramlási tere, a villamos erőter és a porfázis közötti számos kölcsönhatás befolyásolja.

Az elektrofilterek egyszerű működési elve ellenére a teljes leválasztási folyamat kísérleti vizsgálata vagy numerikus modellezése során a tértöltéses inhomogén villamos erőter, a szállító gáz turbulens áramlása és a benne diszpergált villamosan töltött porfázis tulajdonságai által meghatározott kölcsönhatások minden összetettségével szembesülhetünk. Egy új leválasztó modell kifejlesztésekor elengedhetetlen a por transzportfolyamatában szerepet játszó erőhatások tanulmányozása és a leválasztási folyamatban betöltött szerepének értékelése, hogy tudatában legyünk a modellalkotás során szükséges egyszerűsítések jelentőségének és következményeinek, valamint elkerüljük az alapvető fontosságú befolyásoló tényezők elhanyagolását.

Az elektrofilterek működési alapelvét kihasználó technológiák alkalmazási területe az elektrosztatikus technológiák fejlődésével egyre szélesebbé vált. A speciális igényeket kielégítő (pl. klimatechnikai, vegyipari, gyógyszeripari, nyomdatechnikai, stb.) elektrosztatikai alkalmazások megemlítése mellett az elektrofilterek hagyományos ipari alkalmazásait két nagy csoportra oszthatjuk aszerint, hogy eredendően mi célból alkalmazzák e nagy hatékonyságú részecske-leválasztó technológiát. Alapvető funkciójuk szerint az elektrofiltereket környezetvédelmi célból, a füstgázban lévő, főleg szilárd szennyezőanyagok leválasztására telepítik. A környezetvédelmi célok mellett gazdaságossági megfontolások is vezethetnek e hatékony technológia alkalmazásához. Számos olyan metallurgiai, gyógyszeripari, vegyipari vagy építőipari technológia ismeretes, amely esetében a környezetbe kerülő porok, szemcsék, cseppek, technológiai hulladék részecskék anyagukban is nagy értéket képviselnek, ezért a minél teljesebb visszanyerésükhöz, leválasztásukhoz sokszor komoly gazdasági érdek is fűződik.

A szálló porokra vonatkozó kibocsátási határértékeket megfogalmazó követelmények (az 1986-os PM<sub>10</sub> előírás mellett a PM<sub>2.5</sub> megjelenése 1997-ben), illetve azok várható további szigorodása adja a téma különleges aktualitását, hiszen a mai környezetvédelmi célok és elvárások egy új leválasztó berendezés helyes tervezésével, kialakításával és üzemeltetésével még a szubmikronos szemcseméret-tartományban is kiváló leválasztási fokkal megvalósíthatók. Jelenleg azonban már nem az újonnan épülő leválasztók, hanem a már meglévő berendezések fenti követelményeket kielégítő módon való áttervezése / átépítése jelenti a nagyobb részarányt (JAWOREK *et al.*, 2007, CHANG, 2003). Amellett, hogy az új kutatási eredmények felhasználásával megalkotott, a különböző paraméterek hatásainak vizsgálatára alkalmas elektrofilter modell megkönnyíti egy minél hatékonyabb, új berendezés tervezését, egy már meglévő leválasztó berendezés felújításánál, vagy speciális igények szerinti módosításánál is kifizetődően alkalmazható.

### *Kutatási együttműködések*

A leválasztási folyamat modellezése összetett áramlástan és villamos energetikai kérdéseket vetett fel. A két összekapcsolódó tudományterület közös kutatási és fejlesztési igényei hívták életre a *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem* két intézményének, az *Áramlástan Tanszék (Gépészmérnöki Kar)* és a *Nagyfeszültségű Technika és Berendezések*

---

Csoport (*Villamos Energetika Tanszék, Villamosmérnöki és Informatikai Kar*) kutatói együttműködését, mely egy új, komplex leválasztó modell kifejlesztését tűzte ki célul. A többéves kutatási együttműködésben kifejlesztett leválasztó modell villamos erőtér számító modulját korábban KISS (2005) értekezésében részletesen ismertette, a kutatási együttműködésben elvégzett vizsgálatok eredményeit pedig számos közös publikációban mutattuk be, ld. a jelen értekezés szerzőjének mellékelt publikációs jegyzékét.

A laboratóriumi modell leválasztón végzett kísérleti munka az *Otto-von-Guericke Universität Magdeburg / Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik (ISUT) / Lehrstuhl Strömungsmechanik und Strömungstechnik* és az *Áramlástan Tanszék* közötti nemzetközi kutatási együttműködés keretében jött létre. A több alkalommal rendelkezésünkre bocsátott, korszerű Lézer Doppler Anemométer (LDA) berendezés segítségével a szakirodalomban egyedülállóan részletes mérésorozatokot végezhetünk a leválasztó berendezés áramlási terének alapos feltérképezésére. Az LDA méréseket bemutató közös publikációk (SUDA *et al.*, 2003, SUDA *et al.*, 2002) mellett a numerikus szimulációs modell számítások és a mérési eredmények összevetése is közlésre került, ld. SUDA *et al.* (2005), SUDA (2005), SUDA *et al.* (2001b).

A téma vonzataként felmerült a kétfázisú áramlásokban tapasztalható turbulencia módosítás jelenségének kérdésköre. A diszperz fázis gázáramlás turbulenciájára gyakorolt hatásának vizsgálatával kapcsolatos további kutatások pedig a belgiumi *Von Karman Institute for Fluid Dynamics* kutatóintézet *Environmental and Applied Fluid Dynamics* tanszékén zajlottak, ahol lehetőség nyílt a kétfázisú áramlásokban tapasztalható turbulencia-módosítás jelenségének korszerű áramlástan mérés technikai berendezések segítségével történő kísérleti vizsgálatára. A kutatások eredményeit a következő publikációkban közöltük: SUDA (2000), SUDA & ZIMMER (2002), ZIMMER *et al.* (2001), ZIMMER & SUDA (2001) és SUDA *et al.* (2001).

## 2. A KUTATÁSI FELADAT

Az elektrosztatikus leválasztási folyamat modellezését célzó kutatás-fejlesztés motivációját a témaválasztás aktualitása magyarázza: a villamos porleválasztó technológia az utóbbi két évtizedben jelentős fejlődésen ment keresztül. Az ipar megköveteli a technológia fejlesztését, amely együtt jár a leválasztási folyamat elméleti háttérének mind alaposabb megismerésének igényével, hiszen az általánosan használt, hagyományos leválasztó modelleken már eddig is számos, főként tapasztalati összefüggéseken alapuló módosítást kellett eszközölni, hogy azok alkalmassá váljanak a különböző befolyásoló tényezők figyelembe vételére. Az empirikus összefüggéseken alapuló modellek mellett mind az áramlási tér, mind a villamos erőtér modellezésében egyre inkább teret nyert a numerikus szimuláció, amely a leválasztási folyamat átfogó modellezésén belül a bonyolult részfolyamatok paramétervizsgálatára is alkalmas. A lézer-optikai elvű mérés technikai alkalmazások fejlődése eredményeként az elektrofilterben lejátszódó folyamatok numerikus szimulációjának eredményeit egyre pontosabb mérések segítségével lehet ellenőrizni, validálni. A fejlődő mérés technika ezen túlmenően a leválasztó berendezésben lejátszódó részfolyamatok (pl. a szekunder áramlások, porszemcse mozgás) feltérképezésében és megismerésében is jelentős szerepet tölt be.

Jelen disszertációban bemutatott kutatások során törekedtünk a legkorszerűbb eszközök felhasználására. A porleválasztóban lezajló folyamat kísérleti vizsgálatához egy laboratóriumi modellberendezést használtunk, amelyen LDA sebességmérési sorozatokat végeztünk. A leválasztási folyamat modellezésére numerikus áramlástan szimulációt (CFD) alkalmaztunk az áramlási tér meghatározására, amely a villamos erőtér szimulációs modullal

integrálva modellezi az elektrofilterben lejátszódó transzportfolyamatot, így lehetővé téve a villamos erőtér és áramlási tér összefüggő paramétereinek számítását.

Az elektrofilterben lejátszódó folyamat modellezése során előtérbe került a kétfázisú áramlásokban a fázisok közötti kölcsönhatások kérdése. A leválasztás modellezése szempontjából meghatározó az áramlási és a villamos tér, valamint a töltött porszemcsékből álló szekunder fázis közötti kölcsönhatások szerepe. A leválasztóban nem csupán a mozgó porszemcsék kerülnek a villamos erőtérrel és az áramlási térrel kölcsönhatásba, hanem az ionizált gázmolekulák miatt maga a szállító közeg is kölcsönhatásba lép a villamos erőtérrel, ion-tértöltéses elektrohidrodinamikusan (EHD) áramlás jön létre, a villamosan töltött porszemcsék pedig por-tértöltést alkotva visszahatnak a villamos erőtérre, és így az áramlási tér szerkezetére is. Mindezen kölcsönhatásokat nagyban befolyásolja a porleválasztó geometriai kialakítása által meghatározott inhomogén villamos erőtér, továbbá a szállító gáz turbulens áramlási tere. A kétfázisú áramlásokban tapasztalható turbulencia módosítást egy jól definiált, kétfázisú, turbulens nyíróréteg áramlás esetében a Fázis Doppler Anemométer (PDA), Particle Image Velocimetry (PIV) és Particle Tracking Velocimetry and Sizing (PTV/S/) korszerű lézer-optikai elven működő mérés technikákat alkalmazva vizsgáltuk.

A témaválasztást elindította, majd motivációt erősítette, hogy egy ilyen, korszerű áramlástan mérés technikákkal illetve numerikus áramlástan szimulációval megismerhető, komplex áramlási jelenség modellezése volt a kutatás célja.

### 3. AZ ELVÉGZETT FELADATOK, VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

#### *Szakirodalom-kutatás*

Az értekezés szakirodalmi ismereteket összefoglaló 2. fejezetében ismertettük és értékeltük az elektrosztatikus leválasztásra kidolgozott eddig ismeretes modelleket, rendszerezve azokat a modellek fő jellemzői szerint. Továbbá, a témában végzett áramlástan vonatkozású kísérleti vizsgálatok eredményeinek kritikai elemzését is elvégeztük. A szakirodalmi kutatás eredményeit összefoglalva a numerikus szimulációs modelleket és a kísérleti vizsgálatokat egy-egy táblázatba rendszerezve mutatjuk be, amely alapján azok összehasonlíthatók, illetve a leválasztási folyamatot befolyásoló főbb mechanizmusok áttekinthetők. A vizsgálatok során alkalmazott elhanyagolások, egyszerűsítések jelentősége kapcsán a felmerülő modellezésbeli és mérés technikai nehézségekre is utaltunk. Megállapítható, hogy a numerikus szimulációs modellezés kulcskérdései a villamos erőtér tekintetében a tértöltések illetve a villamos szél figyelembevétele vagy elhanyagolása, másrészt az áramlási tér tekintetében a leválasztóutca turbulens áramlási terének megfelelő modellezése - beleértve a koronaelektrodok áramlási nyomát, határréteg áramlás falközei tartományait és a villamos szél jelenségét. A por transzport modellezés tekintetében pedig kitértünk az EULER- ill. LAGRANGE-féle kezelésmód által meghatározott modellezési korlátok, előnyök ill. hátrányok értékelésére. A kísérleti vizsgálatok mérés technikai kulcskérdései közül legfontosabbnak pedig a szállító közeg sebességterének villamos erőtér jelenlétében történő mérése tekinthető. Az elvi megfontolásokból eredő mérés technikai nehézségek jelentőségét a szakirodalomban legtöbb esetben elhanyagolják. A modellmérések legfontosabb jellemzőinek bemutatása mellett kiemelten tárgyaltuk az áramlásba juttatott részecskék fényszórásán alapuló lézer-optikai mérés technikák alkalmazhatósági, jelfeldolgozási és kiértékelési kérdéseit is. A szakirodalomban a gázáramlás és a porszemcsék sebességterére vonatkozó eddigi kísérleti vizsgálatok alapvető hiányossága egy egész leválasztó utcára kiterjedő, megbízható, részletes mérés sorozat. Egy, mindezen kulcskérdéseket figyelembe vevő, komplex elektrofilter modell kifejlesztése során elengedhetetlen volt a szakirodalmi előzmények megfelelő részletességű feldolgozása.

---

### *Leválasztó modell kidolgozása, numerikus szimuláció*

A villamos és áramlási tér modellezéséhez a leválasztási folyamat elméleti alapjait tárgyaltuk az értekezés 3. fejezetében. Az elektrosztatikus leválasztó berendezésekkel kapcsolatos gyakorlati (felépítési, elvi működési) ismeretek rövid összefoglalása után a leválasztó elmélet villamos erőtér és áramlási tér modellezésével kapcsolatos kulcskérdéseit ismertettük, elemeztük a leválasztó modell felállítása során szükséges egyszerűsítések vagy elhanyagolások jelentőségét. A tértöltéses villamos erőtér, gázáramlás és a villamos erőtérben mozgó porszemcsék vizsgálata során a por koncentráció-eloszlás, porfázis áramvonalak és a leválasztási hatások meghatározását célul tűzve ismertettük az EULER-féle kezelésmódban kidolgozott por transzportfolyamatot leíró egyenleteket, meghatároztuk a por áramsűrűség vektor ( $j_p$ ) komponenseit, és ez alapján bemutattuk a pormozgás számítására kidolgozott porfázisra felírt áramfüggvény ( $\Psi_p$ ) módszert, és elemeztük a paramétervizsgálat során kapott modell számítási eredményeket.

Az elektrofilterekben lezajló kétfázisú elektrohidrodinamikusan áramlás a gyakorlati alkalmazás számára is fontos következtetéseket (koncentráció-eloszlás, leválasztási fok) eredményező numerikus áramlástan modellezésére a LAGRANGE-féle megközelítés nem célszerű a mai számítógépes kapacitás mellett. A LAGRANGE-féle leírásmódon alapuló nagy számítógépes erőforrás-igényű módszerek (pl. DNS, LES) manapság még csak kis-méretű, általában reguláris alakú geometriai tartományok esetén adnak lehetőséget véges számú részecskéből álló szemcsehalmaz követésére (pl. SOLTANI *et al.* 1998). Az ilyen elektrofilter modellek általában csak egyedülálló porszemcse pálya meghatározására szolgálnak. Az irodalomban legtöbbször kiindulásnak használt, általános célú, gyors számítást lehetővé tevő, de a legegyszerűbb fizikai megfontolásokra épülő és legtöbbször a paraméterek tapasztalatok alapján történő becslésével alkalmazott DEUTSCH-féle leválasztó modell (DEUTSCH, 1922) és annak továbbfejlesztett változatai pedig nem kellően részletesen írják le a jelenséget, az ilyen összetettségű kétfázisú áramlások kölcsönhatásainak kezelésére alkalmatlanok. A kétfázisú áramlás modellezésére az EULER-féle leírást alkalmaztuk. A numerikus áramlástan szimuláció során saját fejlesztésű kóddal és a FLUENT<sup>®</sup> kereskedelmi CFD kóddal is dolgoztunk.

A por transzportfolyamatának leírására és számítására kidolgozott kétdimenziós modellben az EULER-féle (ún. két közeges) megközelítést használjuk, amely a szállító gáz- és a benne diszpergált porszemcse-fázist két folytonos közegként modellezi. A por transzportegyenlet numerikus megoldása során porkoncentráció-eloszlás, leválasztási fok, és a porfázisra felírt áramfüggvény módszer alkalmazásával pormozgás áramvonalainak paramétervizsgálatát végeztük el. A két kontinuum fázist alkalmazó kezelésmód előnyei a két fázis kölcsönhatásának – a különös tekintettel a tértöltések hatásának – figyelembe vételekor kamatoznak. Az alapmodell elkészítése után a modell leválasztó berendezésen végzett LDA mérési eredményekkel való összehasonlítás céljából az áramlási tér numerikus szimulációját elvégeztük a FLUENT<sup>®</sup> CFD kód segítségével is. Ez a továbbfejlesztett modell alapján már a villamos erőtér gázáramlásra gyakorolt hatása (elektrohidrodinamikusan áramlási tér) is megvizsgálható, illetve a különböző leválasztótípus kialakítások részletes geometriai modellezése, így az utcaközépen elhelyezett koronaelektrod sor turbulens áramlási térre gyakorolt hatása is megvizsgálható, amelyet az LDA kísérleti eredményekkel összevetettünk.

A kidolgozott új leválasztó modell ún. modulrendszerként működik, amely lényege, hogy az áramlástan és villamos paramétereket számító modellek egy-egy külön modulként kapcsolódnak egymáshoz. Az áramlástan modul a számítási tartomány numerikus hálójának elkészítése után a gázközeg és a porfázis áramlási terének paramétereit, sebesség- és turbulencia-eloszlást, porkoncentráció-eloszlást, majd ezekből leválasztási fokot számít, míg a tértöltésekkel terhelt villamos erőteret a villamos erőtér számító modul határozza

meg. A villamos erőtér számító modult a Nagyfeszültségű Berendezések és Technika Csoport kutatói dolgozták ki, ld. KISS (2005) doktori értekezését. A két modul összekapcsolásával lehetővé vált a komplex leválasztási folyamat újszerű modellezése. A villamos erőtér modul praktikusán a leválasztótér a CFD szimuláció számára megalkotott numerikus hálójának 2D tartományára, a porfázis alapadatok és az alkalmazott  $U_0$  koronafeszültség alapján meghatározza a leválasztótérben a kiinduló  $\varphi$  potenciál és  $\mathbf{E}$  térerősség eloszlást,  $\rho_i$  ion- és  $\rho_p$  por tértöltés eloszlást. Majd az áramlási teret számító modul a számított villamos térerősség eloszlást valamint a gázáramlás kezdeti- és peremfeltételeit és a por jellemzőit figyelembe véve meghatározza a  $\mathbf{v}(x,y)$  gáz- és az  $\mathbf{u}_p(x,y)$  porfázis áramlási terét,  $c_p(x,y)$  koncentráció-eloszlást, és a leválasztási fokot. Mivel a leválasztótérben töltéshordozókat (nagyreszt ionokat) tartalmazó gáz és villamosan töltött szemcsékből álló porfázis van jelen, az ionok és a porfázis tértöltés-eloszlása jelentősen befolyásolja a kialakuló villamos erőtér  $\mathbf{E}(x,y)$  térerősség-eloszlását, a porszemcsék  $w_{th}$  elméleti vándorlási sebességét, ezáltal a  $c_p(x,y)$  porkoncentráció-eloszlást. A kidolgozott számítási modell összekapcsolt modulrendszerre így figyelembe tudja venni az inhomogén tértöltés-eloszlás hatását. A szimulációs eredmények alapján kimutattuk, hogy a legtöbbször helytelenül és indokolatlanul elhanyagolt tértöltések szerepe meghatározó jelentőséggel bír.

### *Kísérleti vizsgálatok*

A kísérleti vizsgálatokat egy laboratóriumi modell leválasztó berendezésen végeztük el. A korszerű optikai elvű áramlástan mérés technikák közül a Lézer Doppler Anemométer (LDA) használtuk egy elektrofilter utcában a turbulens sebességtér jellemzőinek mérésére, valamint lézersík áramlás láthatóvátételi vizsgálatokat is végeztünk a koncentráció-eloszlás kvalitatív vizsgálatára. A méréseket feldolgozó szakirodalom-kutatás alapján megállapítottuk, hogy az eddig végzett kísérleti vizsgálatok, amelyek a gázáramlás vagy a porszemcsék villamos erőtér jelenlétében történő áramlási sebesség mérését célozták meg, csak igen korlátozottan használhatók fel megbízhatóságuk vagy nem megfelelő részletességük miatt. Az általunk végzett mérésorozatok megtervezésénél arra törekedtünk, hogy a villamos erőtérben történő sebességmérés mérés technikai korlátait megismerve az elektrofilter utca turbulens sebességtérét minél részletesebben feltérképezzük. Nagy hangsúlyt fordítottunk a falközeli és az utcaközép tartományokra, a határréteg és a koronaelektrod sor mögötti nyom áramlási jellegzetességeinek feltérképezésére. A szakirodalom áttanulmányozása alapján pedig kimondottan egy egész utcára kiterjedő sebességtér mérési sorozat elvégzése volt a kísérleti vizsgálatok egyik alapvető célja, hogy a mérések elegendő részletességgel adják vissza egy teljes leválasztó utca áramlási terét. Ezt az indokolta, hogy a porfázis transzportfolyamatát meghatározó villamos és áramlási tér jellemzők az utcahossz mentén jelentősen változnak, így nem elegendő pl. egy egyedülálló koronaelektrodot tartalmazó leválasztó modellen elvégzett mérés. Szem előtt tartottuk azt is, hogy a mérések alkalmasak legyenek a numerikus szimulációval való összevetésre is, tehát a modell leválasztó minél egyszerűbb geometriai kialakítása mellett jól definiált áramlási és villamos paramétervizsgálat elvégzése volt a cél.

A 4. fejezetben mutatjuk be az elektrosztatikus leválasztó modell berendezés egy teljes utcájában elvégzett részletes LDA mérési sorozat főbb eredményeit. A leválasztó utcában mozgó részecskék turbulens sebességtérének főáramlási irányú ( $x$ ) és keresztirányú ( $y$ ) sebesség komponenseit ( $\mathbf{u}_{p,x}$ ,  $\mathbf{u}_{p,y}$ ) és turbulencia jellemzőket ( $T.I._p$ ) erőtérmentes ( $U_0=0kV$ ) esetben és villamos erőtérre jellemző különböző ( $U_0=0\div 20kV$ ) koronafeszültség értékek mellett is megvizsgáltuk, és annak főbb jellegzetességeit különböző keresztmetszetekben felvett sebességprofilok segítségével összehasonlító diagramokon ábrázolva elemeztük. A kísérleti vizsgálatok által a leválasztó utcában részletes képet kaptunk a részecskék leválasztási folyamatában meghatározó sebességtéréről. A por transzportfolyamatának

---

elemzésekor kihangsúlyoztuk, hogy a leválasztási folyamatban igen meghatározó a por-mozgást tekintve az, hogy az áramlási tér és a villamos erőtér jellemzői a leválasztó utcában térben jelentős mértékben változnak, amelyet az LDA mérések és kvalitatív lézersíkos áramlás láthatóvátételi vizsgálatok is megerősítettek

### *Turbulencia módosítás*

Felmerült a kérdés, hogy többfázisú áramlásokban, így az elektrofilter utcabeli áramlásban is, az általában gáz halmazállapotú (levegő) közegben a második fázis (általában diszpergált szilárd szemcse vagy folyadéksepp halmaz) milyen esetekben és mértékben befolyásolhatja a szállító közegáramlás turbulens jellemzőit ( $T.I.g$ ). Ha ez a módosító hatás jelentős, a többfázisú áramlások numerikus szimulációja rendszerint igen bonyolulttá válik a különböző fázisok egymásra gyakorolt hatásának figyelembevétele miatt (CROWE *et al.* 1996). Így az utóbbi években ipari jelentőségük miatt egyre intenzívebben foglalkoznak a részecske-fázis turbulencia-módosító hatásának vizsgálatával, melyet a numerikus szimulációs kapacitások és a kísérleti berendezések jelentős fejlődése is nagyban elősegített.

A diszperz fázis által a szállító gáz turbulens áramlási jellemzőire gyakorolt hatása annak egyfázisú áramláshoz képest mérve kifejezhető a relatív turbulencia változással ( $\Delta T.I.g$ ). A röviden csak turbulencia módosító hatásnak nevezett jelenségben szerepet játszó hatások megismerése az utóbbi évtizedben gyorsan fejlődő numerikus szimulációs kapacitások ellenére még számos további elméleti és kísérleti vizsgálatot igényelnek. A nyilvánvaló fontosságuk ellenére a kétfázisú áramlásbeli turbulencia módosítás kérdésére a kísérleti vizsgálatok során eddig viszonylag kevés figyelem összpontosult – többnyire érthető okokból, hiszen azok egyrészt olyan áramlást nem megzavaró mérés technikákat igényelnek, amelyekkel a szállító gázáramlás turbulens jellemzőit mind egyfázisú tiszta gáz áramlása, mind pedig a diszperz fázis jelenlétében (kétfázisú áramlásban) meg lehet határozni, majd az esetlegesen jelentkező gázáramlásbeli turbulencia intenzitás változását ( $\Delta T.I.g$ ) ki lehet értékelni. Annak érdekében, hogy jól detektálható turbulencia változást mérhessünk, célszerű olyan nyírórétegáramlást vizsgálni, amelyben jól kontrollálhatók és definiálhatók a gázáramlás turbulencia jellemzői. A jelen kísérleti vizsgálatokban egy iker-szabadsugár szélcsatorna nyírórétegáramlását használtuk, amelybe meghatározott  $d_p=10\div 300\mu m$  szemcseméret-tartományú spray vízcsepp-halmazt juttattunk.

A vizsgálatokhoz az ún. „VKI L-6” típusú iker-szabadsugár szélcsatornát használtuk, melyet korábban a nyíróréteg-áramlásbeli örvénystruktúrák áramlás láthatóvátételi és szemcse diszperziós vizsgálataihoz használt BORREGO (1981*a, b*) is.

A fentiek értelmében olyan korszerű mérés technikákat kellett alkalmaznunk a  $\Delta T.I.g$  relatív turbulencia módosítás mértékének meghatározásához, amelyek egyrészt alkalmasak az egyfázisú áramlás sebesség és turbulencia jellemzőinek mérésére (PIV), valamint a kétfázisú áramlásban mindkét fázis turbulens sebességterének mérésére (PTV/S/), illetve a diszperz fázis szemcsehalmazának jellemzőit is meg tudjuk határozni (PDA). A kutatás ezen részét a *Von Karman Institute for Fluid Dynamics* kutatóintézetben végeztük el, ahol mind a PDA, és PIV rendszerek, mind a legkorszerűbb PTV/S/ technika a vezető lézeroptikai mérés technikák közé tartozott, utóbbiakról bővebben ld. SCARANO & RIETHMULLER (1999) és ZIMMER (2000). A PTV/S/ technikáról továbbá bővebben lásd még USHIJAMA & TANAKA (1996) vagy HAAM & BRODKEY (2000) munkáját. A vizsgált iker-szabadsugár egy- ill. kétfázisú nyíróréteg-áramlására eddigi szakirodalmi ismereteink szerint még más helyen nem publikált új kísérleti vizsgálatokkal pedig a turbulencia módosítás fizikai modellezéséhez kívántunk hozzájárulni.

Az áramlási tér előzetes megismeréséhez és jellemzéséhez lézersíkos áramlás láthatóvátételi vizsgálatokat végeztünk a PIV rendszer impulzusüzemű Nd:Yag lézerével bevilágított mérőtérben. A spray cseppméret-eloszlásának és sebességterének meghatáro-

zásához Fázis Doppler Anemométert (PDA) használtunk. Az egyfázisú nyíróréteg áramlás turbulens sebességterének méréséhez PIV mérés technikát, a kétfázisú áramlás esetében pedig a PTV/S/ mérés technikát alkalmaztuk. A PDA mérések igazolták a LÁZARO & LASHERAS (1992) által is tapasztalt szemcseméret szerinti szelektív diszperziót. Az egyfázisú áramlásban alkalmazott PIV mérési eredményeit a VKI saját fejlesztésű PIV szoftverével (ld. SCARANO, 1997) értékeltük ki, mely alapján nagy térbeli felbontásban kaptunk áramlási tér és turbulencia jellemzőket. Kétfázisú áramlás esetén a PIV mérésekhez hasonló módon rögzített digitális képpárokat a ZIMMER (1998) által kifejlesztett PTV/S/ kiértékelő szoftverrel dolgoztuk fel. A PTV/S/ technika a PIV-tól annyiban tér el, hogy a képpárokon jelen esetben minimum egy nagyságrenddel egymástól eltérő méretű olajköd részecskék és spray cseppek rögzített képét nagyság alapján megkülönbözteti, és *mindegyik* részecske esetén megkeresi a  $\Delta t$  múlva rögzített képpáron a hozzátartozó legvalószínűbb elmozdulásvektort. Így a PTV/S/ a gáz és a diszperz fázis sebességterét külön-külön értékeli ki, és a PIV-vel megegyező rácspontra teríti a AGUI & JIMENEZ (1987) által javasolt módszerrel. A PTV/S/ technikát tesztelése céljából az egyfázisú áramlásban felvett PIV képpárookra is teszteltük. Az egyfázisú ill. kétfázisú áramlás során elvégzett PIV ill. PTV/S/ mérésekből a szállító közeg meghatározott  $\Delta T.I.g$  relatív turbulencia módosítás mértékét tudtuk meghatározni. Ennek értékelésében segít a szemcsehalmaz PDA méréseiből meghatározott kumulatív valószínűségi eloszlás sűrűségfüggvény alapján történő kiértékelése. A mérési eredményekkel kiegészítettük a GORE & CROWE (1989) által közölt, mérési eredményeket összefoglaló diagramot. A vizsgált kétfázisú áramlás térfogati aránya ( $\alpha_p$ ) és a szemcsék tehetetlenségi paramétere ( $\psi$ ) az ELGHOBASHI (1994) által a turbulencia módosítás értékelésére javasolt ( $\psi; \alpha_p$ ) diagrammal összhangban vannak. A vizsgált nyírórétegáramlásban mért eredmények összefoglaló értékelése céljából azonban a különböző átmérőjű szemcséknek a növekvő örvényméretű nyírórétegben folyamatosan változó  $\psi$  tehetetlenségi paramétere a főáramlási irány mentén ábrázolva javasoltuk bemutatni. A javasolt  $\psi=f(x, d_p)$  újszerű ábrázolásmód alapján az eddigieknél átfogóbban tudjuk megítélni adott kétfázisú áramlásra jellemző turbulencia módosítás mértékét.

#### 4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA TÉZISEKBEN

**1. Az elektrosztatikus leválasztóban lejátszódó folyamatok leírására egy áramlástanit modellt fejlesztettem ki, amely az eddigieknél átfogóbban modellezi a villamosan töltött porfázis transzportfolyamatát, így lehetővé téve a pormozgás és a gázáramlás az eddigi modelleknél átfogóbb áramlástanit szimulációját, amely a leválasztási folyamat összetett kölcsönhatásainak paramétervizsgálatára alkalmas.**

1.1 A téma kísérleti vizsgálatával és numerikus szimulációjával foglalkozó szakirodalom átfogó rendszerezése segítségével feltártam az eddigi modellek gyenge pontjait. Az elektrosztatikus leválasztás folyamatában lejátszódó áramlástanit jelenségek vizsgálatára egy újszerű áramlástanit modellt hoztam létre. KISS (2005) értekezésében tárgyalt villamos erőter számító modell integrálásával kidolgozott új leválasztó modell az egész leválasztási folyamatot modellezi. A leválasztóbeli gázáramlás, pormozgás és a leválasztási fok meghatározásának céljával kidolgoztam a villamosan töltött porszemcsék transzportfolyamatát leíró, tértöltéseket is figyelembe vevő áramlástanit modellt. (2.3, 3.3, 3.4 és 3.5 alfejezetek)

1.2 A kísérleti vizsgálatokkal alátámasztott numerikus szimulációs modell segítségével a szakirodalomban ismert jelenségekre elvégzett paramétervizsgálat alapján kimutattam az egyes áramlástanit tényezők jelentőségét a gázáramlás kialakulásában és számításában. Vizsgáltam a gázáramlás és a villamos erőter egymásra hatását. Létrehoztam az



---

elektrohidrodinamikus áramlási tér szimulációs modelljét, mely a valós leválasztóutca geometriai modellezése mellett lehetővé teszi a villamos szél gázáramlásra és porszemcse-mozgásra gyakorolt hatásának figyelembevételét. (3.4, 3.5 és 5.4 alfejezetek)

1.3 A modell alkalmas a leválasztótérben mind a villamos, mind az áramlástan hatások együttes vizsgálatára. A modell lehetővé teszi a koronaelektród sor áramlási nyomának figyelembevételét. Vizsgáltam a tértöltések által módosított villamos erőternek a gáz és porszemcse áramlására gyakorolt hatását: figyelembevételének ill. elhanyagolásának jelentőségét. Az új leválasztó modell figyelembe veszi az inhomogén eloszlású portértöltés hatását a töltéssűrűség-eloszlásban. (3.5, 5.2 alfejezetek)

## **2. A villamos erőterben mozgó, töltött porfázis transzportfolyamatának Euler-féle leírást alkalmazó modelljét hoztam létre, amely a por transzportegyenlet megoldásával alkalmas a porfázis áramvonalainak meghatározására az áramfüggvény módszer segítségével.**

2.1 A kutatás során megalkotott áramlástan modell a szakirodalomban még nem publikált módon kezeli a porfázis mozgását a tértöltéses villamos erőterben. A kétfázisú áramlás leírására az Euler-féle megközelítést alkalmazó modell a villamos erőterben mozgó porfázisra kidolgozott transzportegyenlet numerikus megoldásával határozza meg a pormozgását jellemző poráramvonalakat az áramfüggvény módszer segítségével. (3.5.7, 3.5.8 alfejezetek)

2.2 A kidolgozott Euler-féle leírást alkalmazó számítási modell lehetővé teszi a leválasztó utcabeli porkoncentráció-eloszlás és leválasztási fok meghatározását. Elvégeztem a portértöltés elektrosztatikus leválasztókra vonatkozó szerepének átfogó vizsgálatát, és paramétervizsgálattal bemutattam a tértöltések figyelembe vételének jelentőségét a pormozgás és leválasztási határfok számításában. (3.5.6, 3.5.9 alfejezetek)

## **3. Modell leválasztó berendezés egy teljes leválasztó utcájának turbulens áramlási terének kísérleti meghatározására a szakirodalomban megtalálható méréseknél részletesebb Lézer Doppler Anemométer mérési sorozatot végeztem. A leválasztó utca LDA mérési eredményeit a numerikus szimulációs eredményekkel összehasonlítva kimutattam a koronaelektród sor áramlási nyomának és a gyűjtőelektródok melletti falközeli határréteg-áramlás jelentőségét a leválasztási folyamat és a pormozgás áramlástan modellezésében.**

3.1 Az elektrofiterbéli mérésekre vonatkozó szakirodalom átfogó elemzése alapján elmondható, hogy a rendelkezésre álló mérési sorozatoknál részletesebb sebességmező méréseket végeztem POLYTEC LDV-380 típusú Lézer Doppler Anemométerrel egy 7 koronaelektródos modell leválasztóban. (2.4 és 4.5 alfejezetek)

3.2 A különböző áramlási és villamos paraméterek változtatása mellett LDA méréseket végeztem a leválasztó utca sebességterének turbulencia-eloszlásának meghatározására, mely alapján megállapításokat tettem a hossz-, ill. keresztirányú turbulencia-eloszlásra. A kísérleti eredményeket a numerikus szimulációs számításokkal összevetve elemzem. Kísérleti eredményekkel igazoltam, hogy a koronaelektród-sor áramlási nyoma hatással van a gázáramlás és a porfázis mozgására. Ennek kapcsán kimutattam, hogy a leválasztó utcában lejátszódó transzportfolyamat jellegzetességei csak sok koronaelektródos, teljes utca turbulens sebességméréseiből határozhatók meg. (4. fejezet, 4.6 alfejezet, 5.4.2 alfejezet)

3.3 Az áramlásba juttatott olajköd részecskék sebességterének villamos erőterrel és anélkül történő LDA mérésével hasznos információkat nyertem a poros gázok

elektrohidrodinamikus áramlásában lévő villamosan feltöltött szemcsék mozgását illetően. (4.6 alfejezet)

**4. Az elektrosztatikus leválasztó vizsgálata során előtérbe került a szekunder fázis által okozott turbulencia módosítás kérdése. E hatás vizsgálatára korszerű lézer-optikai elvű mérés technikákat /PDA, PIV, PTV(S)/ alkalmaztam egy- ill. kétfázisú nyíróréteg áramlás jellemzőinek mérésére és összehasonlítására, a szekunder fázis turbulencia módosító hatásának kísérleti úton való meghatározása céljából. Az egy- ill. kétfázisú iker-szabadsugár nyíróréteg áramlásra a fenti mérés technikákat együttesen először alkalmazva mérésekkel meghatároztam a turbulencia módosítás mértékét. Javaslatot tettem egy, a szemcsék tehetetlenségi paramétereit bemutató diagram használatára, amely a turbulencia módosítás újszerű, átfogóbb jellemzésére és értékelésére ad lehetőséget.**

4.1 Korszerű lézer-optikai levű mérés technikákat (Particle Image Velocimetry /PIV/, a Particle Tracking Velocimetry and Sizing /PTV(S)/, Fázis Doppler Anemométer /PDA/) alkalmaztam az egy- ill. kétfázisú nyíróréteg-áramlás turbulens sebességterének kísérleti vizsgálatára. Az egy- ill. kétfázisú áramlás sebességterének és turbulens jellemzőinek mérésére és összehasonlítására a szakirodalomban elsőként alkalmaztam együttesen a PIV és PTV(S) mérés technikákat. A kétfázisú közegáramlás mérések során a víz-spray szekunder fázis mozgásának jellemzésére pedig Fázis Doppler Anemométert alkalmaztam. (6. fejezet, 6.2, 6.3, 6.4 alfejezetek)

4.2 A speciális kétfázisú iker-szabadsugár nyíróréteg áramlásra vonatkozó kísérleti eredményeim jól illeszkednek Elghobashi (1994) összefoglaló diagramjához. A turbulencia-módosításra vonatkozó kísérleti eredményeimmel kiegészítettem Gore & Crowe (1989) kétfázisú méréseket összefoglaló diagramját. (6.4.5 alfejezet)

4.3 A mérési eredmények alapján azok összefoglalásaként kidolgoztam és javaslatot tettem a kétfázisú nyíróréteg áramlásra jellemző turbulencia módosítás mértékének jellemzésére alkalmas diagram alkalmazására, amely az egy- ill. kétfázisú áramlásban végzett PIV, PTV(S) ill. PDA mérési eredmények alapján a kétfázisú nyíróréteg áramlásban mozgó polidiszperz szemcsehalmaz tehetetlenségi paramétereit vizsgálva a gázfázisra gyakorolt hatásának a szakirodalomban eddig alkalmazott módszerektől eltérő módon, azoktól átfogóbb jellemzésére ad lehetőséget. (6.4.6 alfejezet)

## 5. AZ EREDMÉNYEK ALKALMAZHATÓSÁGA

A tézisekben megfogalmazott eredmények mind az elektrosztatikus leválasztási technológia kísérleti vizsgálata és numerikus szimulációs modellezése területén, mind a kétfázisú áramlásokban tapasztalható turbulencia változtatás fizikai modellezése kapcsán gyakorlati jelentőséggel bírnak. A tértöltéses erőterben mozgó porszemcsék transzportfolyamatának leírására Euler-féle kezelésmódban kidolgozott modell a poráramvonalak áramfüggvény módszerrel történő meghatározásával, a koncentráció-eloszlás számításával és a leválasztási fok különböző paraméterekre való vizsgálatával az eddig modelleknél összetettebb leválasztó modellt eredményezett, mely a leválasztó technológiában igen fontos paraméterek és jelenségek vizsgálatára alkalmas, így új berendezés tervezésekor, vagy meglévő berendezés hatékonyság-növelését célzó hibakeresésben/felújításában kaphat szerepet. A turbulencia módosítás kérdéskörében pedig a kétfázisú nyíróréteg áramlás kísérleti vizsgálatára együtt először alkalmazott PDA, PIV és PTV(S) mérési eredmények a turbulencia módosítás témabeli vizsgálatokat gazdagítják és annak fizikai modellezéséhez járulnak hozzá a tehetetlenségi paraméterre vonatkozó javasolt vizsgálati módszer segítségével.

## 6. A SZERZŐ PUBLIKÁCIÓI A PhD ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN

- KISS, I., SUDA, J.M., KRISTÓF, G. & BERTA, I. (1998) The turbulent transport process of charged dust particles in electrostatic precipitator. *Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. Electrostatic Precipitation ICESP VII*, KOREA Kyongju, 20-25. Sept. 1998. pp.196-203.
- SUDA, J.M., BERTA, I., KRISTÓF, G. & LAJOS, T. (1998) Numerical computation of particle transport in turbulent flow field in electrostatic precipitator. *Proc. First Conf. Mech. Eng. GÉPÉSZET 1998*, HUNGARY Budapest, 28-29. May 1998. pp.883-888.
- SUDA, J.M., KISS, I., KRISTÓF, G., LAJOS, T. & BERTA, I. (1999) Investigations on the role of the inhomogeneity in flow and electric field conditions in particle transport modelling in ESPs. *Proc. 11<sup>th</sup> Conf. Fluid and Heat Machinery and Equipment*, HUNGARY Budapest, 6-9. Sept. 1999. Paper No.48. CD-ROM
- SUDA, J.M. (1999) Anwendung der Elektrischen Abscheider in Luftreinigung. *Frühlingsakademie'99 „Verkehr und Ergonomie“ Bajor-Magyar Szakértői Értekezlet és Tavaszi Akadémia*, HUNGARY Balatonfüred, 23-28. April 1999. /orális előadás/
- KISS, I., SUDA, J.M., SZEDENIK, N. & BERTA, I. (1999) New results in ESP modelling. *Proc. Electrostatics 1999 10<sup>th</sup> Int. Conf., Institute of Physics - Conference Series Number 163: IOP Publishing LTD, BRISTOL IPS BP11S, ISSN: 0951-3248, ISBN 0 75030638 6*, UK Cambridge, 28-31. March 1999. pp.299-304.
- SUDA, J.M., KISS, I., KRISTÓF, G. & LAJOS, T. (1999) Particle transport process simulation in ESPs using CFD modelling. *Proc. Int. Conf. microCAD'99 Section A: Geoinformatics. Environmental Protection* ISBN 963 661 350 8 ö, ISBN 963 661 351 6, HUNGARY Miskolc, 24-25. Febr. 1999. pp.109-115.
- SUDA, J.M. (2000) Experimental investigation on turbulence modification by particles in shear layer flow using L-6 twin-jet wind tunnel. *Von Kármán Institute for Fluid Dynamics VKI-PR 2000-20*, Diploma Thesis.
- ZOLNAI, Z., SUDA, J.M. ÉS LAJOS, T. (2000) Új eredmények a poros gázok tisztításában. *GÉP, A Gépipari Tudományos Egyesület Műszaki Folyóirata*, ISSN 0016-8572, LI. évf. 2000/1-2. pp.14-22.
- KISS, I., SUDA, J.M. & IVÁNCZY, T. (2001) Elektrosztatikus porleválasztók modellezése. *Proc. A Tudomány Napja*, Dunaújváros, 2001. október 31. /konferencia előadás ill. cikk/
- ZIMMER, L., SUDA, J.M. & BUCHLIN, J.-M. (2001) Study of the turbulent modifications induced by water droplets in a shear layer flow by means of PTV-Sizing. *DLR - Mitteilung* (3) pp.1235-1247.
- ZIMMER, L. & SUDA, J.M. (2001) Study of the turbulent modifications induced by water droplets in a shear layer flow by means of PTV-Sizing. *Proc. 4<sup>th</sup> Int. Symp. Particle Image Velocimetry*, GERMANY Göttingen, September 17-19. 2001.
- KISS, I. & SUDA, J.M. (2001) Villamos és áramlási terek komplex modellezése az elektrosztatikus porleválasztókban. *Ipari Nyílt Nap – Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem*, 2001. február 28. /orális előadás/
- SUDA, J.M., ZIMMER, L. & BUCHLIN, J.-M. (2001) Experimental investigation on turbulence modification by droplets in shear layer flow. *Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. Multiphase Flow ICMF 2001*, USA LA New Orleans, May 27. – June 1. 2001. Paper No.177.
- SUDA, J.M., KISS, I., LAJOS, T. & BERTA, I. (2001) Study of particle dispersion and turbulence modification phenomena in electrostatic precipitators. *Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. Electrostatic Precipitation ICESP VIII*, USA AL Birmingham, May 14–17. 2001. Vol.I. Paper(A1-3)
- SUDA, J.M. (2002) Lézer Doppler sebességmérés és műszaki alkalmazásai. GTE Gépipari Tudományos Egyesület Áramlástechnika Szakosztályi ülés, Áramlástan Tanszék BUDAPEST, 2002. május 14.
- KISS, I., SUDA, J.M. & IVÁNCZY, T. (2002) The effect of the spatial distribution of particles on the ESP performance. *Proc. Scientific Colloquium on High Voltage Engineering*, SLOVAKIA Kosice, June 11-12. 2002, pp.255-259.
- KISS, I. & SUDA, J.M. (2002) Elektrosztatikus porleválasztók. *MEE Magyar Elektrotechnikai Egyesület Vándorgyűlés “A mérnök környezete – a környezet mérnöke” / “A környezetvédelem szolgálata” szekció*, 2002. szeptember 26.
- SUDA, J.M., WUNDERLICH, B., LANZKE, A., KISS, I. & PAP, E. (2002) On the measurements of particle flow field in a model electrostatic precipitator with Laser Doppler Velocimetry. *Proc. Third Conf. on Mech. Eng. GÉPÉSZET 2002*, HUNGARY Budapest, May 30-31. 2002. (oral pres.)
- SUDA, J.M. & ZIMMER, L. (2002) Single and two-phase flow measurements in a plane free shear layer flow via PIV and PTV(S) techniques. *Proc. Third Conf. on Mech. Eng. GÉPÉSZET 2002*, HUNGARY Budapest, May 30-31. 2002., Vol. 1. pp.426-430.
- SUDA, J.M., WUNDERLICH, B., KISS, I. & PAP, E. (2003) On the Laser Doppler Velocimetry measurements and numerical simulation of particle flow field in a model electrostatic precipitator. *Proc. Conf. Modelling Fluid Flow CMFF'03 - 12<sup>th</sup> Int. Conf. Fluid Flow Technologies*, HUNGARY Budapest, Sept. 3-6. 2003, ISBN 963 420 778 2 Vol. II. pp.728-735.
- IVÁNCZY, T., KISS, I., SUDA, J.M. & BERTA, I. (2004) Efficiency of the precipitation of fine particles influenced by the ESP supply mode. *Proc. 9<sup>th</sup> Int. Conf. Electrostatic Precipitation ICESP IX*, SOUTH AFRICA Kruger Gate Mpumalanga, May 17–21. 2004. Paper No. A01.
- IVÁNCZY, T. & SUDA, J.M. (2005) Behavior of polydisperse dust in electrostatic precipitators. *J. Electrostatics Vol. 63, Issue 6-10*, pp.923-927. IF: 0.986 (A J. Electrostatics 2005 évre vonatkozó JCR (Journal Citation Report) impakt faktor adata)
- IVÁNCZY, T., SUDA, J.M., KISS, I. & BERTA I. (2005) Behavior of polydisperse dust in electrostatic precipitators. *Proc. 10th Int. Conf. Electrostatics*, FINLAND Espoo/Helsinki, 15-17. June 2005. (presentation without proceedings)
- SUDA, J.M., IVÁNCZY, T. & KISS, I. (2005) Turbulent flow field of the model ESP influenced by the inlet conditions – comparison of experimental and CFD results. *Proc. Int. Conf. microCAD'05*, HUNGARY Miskolc, 9-11. March 2005. ISBN 963 661 646 9 ö, ISBN 963 661 652 3 Section F. pp.113-120.

- SUDA, J.M. (2005) Elektrofiter modell berendezés kísérleti és numerikus áramlástanai vizsgálata. *GÉP, A Gépípari Tudományos Egyesület Műszaki Folyóirata*, ISSN 0016–8572, 2005/01. LVI. évf., pp.34–38.
- SUDA, J.M., IVÁNCZY, T., KISS, I. & BERTA, I. (2006) Complex analysis of ionic wind in ESP modelling. *Proc. 10<sup>th</sup> Int. Conf. Electrostatic Precipitation ICESP X*, AUSTRALIA Cairns, 25-29 June, 2006. Paper No. 053.
- IVÁNCZY, T., SUDA, J.M., KISS, I. & BERTA, I. (2006) Novel ESP model for impulse energisation. *Proc. 10<sup>th</sup> Int. Conf. Electrostatic Precipitation ICESP X*, AUSTRALIA Cairns, 25-29 June, 2006. Paper No. 054.

## 7. IRODALOMJEGYZÉK

- AGUI, J. & JIMENEZ, J. (1987) On the performance of particle tracking. *J. Fluid Mech.* Vol. **185**, pp.447-468.
- BORREGO, C.A. (1981a) Contribution to the understanding of transport mechanisms and turbulence structure in a plane mixing layer: Measurement techniques for the search of quasi-ordered structures. *Ph.D. Thesis*, Von Karman Institute for Fluid Dynamics - Université Libre de Bruxelles.
- BORREGO, C.A. (1981b) The design of low turbulence wind tunnel for mixing layer study (VKI L-6). *VKI unpublished report*, Von Karman Institute for Fluid Dynamics.
- CHANG, J.S. (2003) Next generation integrated electrostatic gas cleaning systems. *J. Electrostatics* Vol. **57**, Issues 3-4., pp.273-291.
- CROWE, C.T., TROUTT, T.R. & CHUNG, J.N. (1996) Numerical models for two-phase turbulent flows. *Annual Rev. Fluid Mech.* Vol. **28**, pp.11-43.
- DEUTSCH, W. (1922) Bewegung and Ladung der Elektrizitätsträger im Zylinderkondensator. *Annalen d. Physik*, Vol. **68**, pp.335-344.
- ELGHOBASHI, S.E. (1994) On predicting particle-laden turbulent flows. *Appl. Sci. Res.* Vol. **52**, pp.309-329.
- GORE, R. & CROWE, C.T. (1989) Effect of particle size on modulating turbulence intensity. *Int. J. Multiphase Flow* Vol. **15** No. 2, pp.279-285.
- HAAM, S.J. & BRODKEY, R.S. (2000) Motions of dispersed beds obtained by particle tracking velocimetry measurements - Part II. *Int. J. Multiphase Flow* Vol. **26** No. 9, pp.1419-1438.
- JAWOREK, A., KRUPA, A. & CZECH, T. (2007) Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A brief review. *J. Electrostatics*, Vol. **65**, Issue 3, pp.133-155.
- KISS, I. (2005) *Elektrosztatikus porleválasztó berendezések újszerű modellezése*. Ph.D. értekezés.
- LÁZARO, B.J. & LASHERAS, J.C. (1992) Particle dispersion in the developing free shear layer Part 1. Unforced flow., Part 2. Forced flow. *J. Fluid Mech.* Vol. **235**, pp.143-221.
- SCARANO, F. (1997) Improvements in PIV image processing, application to a backward facing step. *VKI Project Report 1997-01*, Von Karman Institute for Fluid Dynamics.
- SCARANO, F. & RIETHMULLER, M.L. (1999) Iterative Multigrid Approach in PIV Image Processing with Discrete Window Offset. *Exp. Fluids*, Vol. **26**., pp.513–523.
- SOLTANI, M., AHMADI, G., OUNIS, H. & MCLAUGHLIN, J.B. (1998) Direct simulation of charged particle deposition in a turbulent flow. *Int. J. Multiphase Flow* Vol. **24** No. 1, pp.77-92.
- USHJAMA, S. & TANAKA, N. (1996) Three-dimensional Particle Tracking Velocimetry with laser-light sheet scannings. *Transactions of the ASME – I, J. Fluids Engineering* Vol. **118**, pp.352-357.
- ZIMMER, L. (1998) *Development of a Particle Tracking Velocimetry and Sizing Technique. Applications to liquid sprays*. VKI-PR 1998-28 Diploma thesis. Von Karman Institute for Fluid Dynamics.
- ZIMMER, L. (2000) Particle Tracking Velocimetry and Sizing technique in two-phase flows. *VKI LS 2000–01*, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, ISSN 0377–8312.

## 8. JELÖLÉSJEGYZÉK

### LATIN BETŰS JELÖLÉSEK

$c_p$	por koncentráció [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
$d_p$	szemcseátmérő [ $m$ ]
$E$	villamos térerősség vektor [ $V \cdot m^{-1}$ ]
$E$	leválasztási fok [-]
$\mathbf{j}_p$	por áramsűrűség vektor [ $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ]
$T.I.$	turbulencia intenzitás [%]
$\mathbf{u}_p$	porszemcse sebesség vektor [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$U_0$	koronafeszültség [ $V$ ]
$\mathbf{v}$	szállító gáz sebesség vektor [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$w_{th}$	elméleti vándorlási sebesség [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$x$	$x$ főáramlási irányú koordináta [ $m$ ]
$y$	$y$ keresztirányú koordináta [ $m$ ]

### GÖRÖG BETŰS JELÖLÉSEK

$\alpha_p$	térfogati arány [-]
$\varphi$	villamos potenciál [ $V$ ]

$\rho_i$	ion töltéssűrűség [ $C \cdot m^{-3}$ ]
$\rho_p$	por töltéssűrűség [ $C \cdot m^{-3}$ ]
$\psi$	tehetetlenségi paraméter [-]
$\Psi_p$	por áramfüggvény [ $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ]

### ALSÓ INDEXEK

g	gáz
i	ion
p	porszemcse, részecske
th	elméleti

### RÖVIDÍTÉSEK

DNS	direkt numerikus szimuláció
LES	nagy örvény szimuláció
PM	Particulate Matter