

Székely László, Dr. Kiss István

Páratartalom növelés hatása az elektrosztatikus porleválasztás folyamataira

Az elektrosztatikus porleválasztókat (ESP) széleskörűen használják ipari környezetben a rendkívül nagy leválasztási fokuk miatt (>99%), a kibocsájtott szemcsék mennyiségének határértéken belül tartása érdekében. A problémát a néhány mikronos vagy kisebb átmérőjű szemcsék adják, amelyek nagy mennyiségű áramlásakor a felhalmozódó tértöltés annyira megnövelheti, hogy visszaszorítja a korona áramot (corona quenching).

Néhány esetben a rossz leválasztási fokkal rendelkező porleválasztó berendezés javítása érdekében gőzt juttatnak vissza a leválasztási térbe. A páratartalom növelése számos paramétert megváltoztat, az eredeti elektrosztatikai és áramlási folyamatokra is nagy hatást gyakorolhat.

Cikkünkben bemutatjuk a „hagyományos” (ESP) és a gőz visszavezetéssel kiegészített elektrosztatikus porleválasztók (Wet ESP) főbb jellemzőit. A kutatás folytatásaként laboratóriumi mérések során portulajdonosságokat határoztunk meg, hogy azok bemenő adatként szolgáljanak majd numerikus modellekhez.

Electrostatic precipitators are widely used in industrial environments due to their high collection efficiency (>99%) to keep the amount of particles emitted within their limit. The problem is caused by particles of a few microns or smaller in diameter, when flowing in large volumes, can increase the accumulated space charge so much as to produce corona quenching.

In some cases, in order to increase the efficiency, steam is returned to the separation space. Increasing the humidity changes several parameters and can also have a major impact on the initial electrostatic and hydrodynamic processes.

In our article, we present the main features of conventional and wet (WESP) electrostatic precipitator. As a continuation of the research, we determined dust properties during laboratory measurements to give as input data for numerical models.

Kulcsszavak: Elektrosztatikus porleválasztó, ipari elektrosztatika, páratartalom, átlagos szabad úthossz

1. BEVEZETÉS

Az elektrosztatikai jelenségeket már az ókori Görögországban felismerték, azonban a 18-19. századig háttérbe szorultak, elsősorban különböző játékos kísérleteket valósítottak meg velük. A 19. század második felében

alakult ki az elektrosztatika elméleti háttere, de a 20. századi robbanásszerű ipari forradalomban kezdtek el a témával mélyrehatóbban foglalkozni.

Az ipari termelés folyamatosan változott (például műanyagok előállítás), ami miatt a korábbiakhoz képest sok baleset, tűz és robbanás keletkezett, továbbá különböző technológiai problémák adódtak az egyre kisebb elektronikai eszközök gyártásával kapcsolatban. Az előzőekben vázolt pontok miatt a korszakban az elektrosztatikus jelenségektől igyekeztek védeni magukat, a veszélyek ellen felkészülni. Azonban, párhuzamosan a veszélyhelyzetekkel, elkezdtek felismerni az elektrosztatikus jelenségeknek pozitív, az ipar számára hasznosítható oldalát is.

2. ELEKTROSZTATIKUS PORLEVÁLASZTÓ

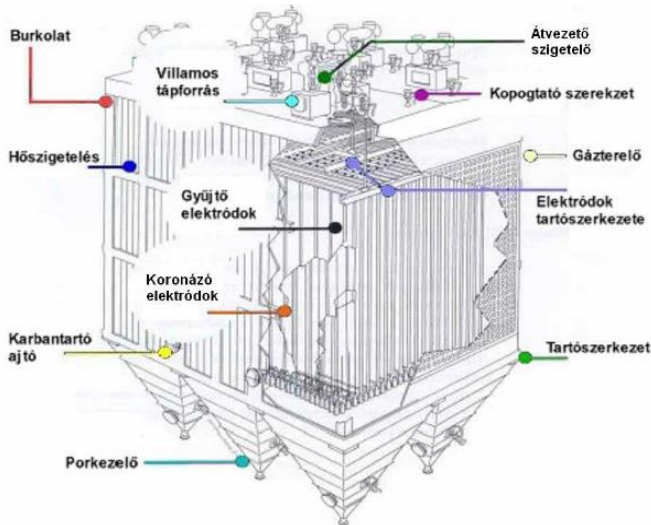
Új technológiák, új iparágak fejlődtek ki, felismerve a lehetőséget a feltöltött anyagok közötti taszítás és vonzás fizikájában. Beszélhetünk különböző festék- és porszórás eljárássokról (elektrosztatikus festék- és porszórás, fénymásolás) de akár nagyobb volumenű, leválasztási technológiába tartozó, a környezetünk tisztaságának megóvása érdekében telepített elektrosztatikus pernye-, csepp- és porleválasztókról. Nagy erőművek, és nagy környezeti terheléssel üzemelő ipari üzemek ma már el sem képzelhetők valamilyen kibocsájtást szinten tartó vagy csökkentő technológia alkalmazása nélkül.

A porleválasztási technológia lehet száraz és nedves is. Az egyes berendezések témát érintő fő mutató száma a leválasztási fok, amely lehet a teljes leválasztásra vonatkozó (összesített, por tömegre) vagy frakcióportalánítás (bizonyos méretű szemcsék kiválasztása). Az emberi légútra veszélyes frakciók a kis átmérőjű, néhány mikronos és kisebb átmérőjű tartományban levő szemcsék, így célszerű ezeket helyben összegyűjteni, szétterjedésüket és lerakódásukat meggátolni.

Nagy ipari üzemekben és erőművekben széles körben elterjedt az elektrosztatikus porleválasztók használata. A főbb előnyük a többi porleválasztási technológiával szemben, hogy széles hőmérséklet tartományban működnek (35°C-800°C), nagy por-mennyiséget képesek kiszűrni (néhány 100 g(m)⁻³), nagy áteresztő képességgel rendelkeznek (1500 m³(s)⁻¹, széles szemcseméret tartományban képesek a port 99%-os hatásfokkal leválasztani. A pontos paraméterek értéke a fizikai berendezés előre megtervezett konstrukciójától függ.

2.1. Száraz működésű porleválasztó felépítése

Ezeknek a gigantikus ipari berendezéseknek a felépítése nem túl bonyolult. A porleválasztó kamrában földelt (ún. gyűjtőelektródok) és nagyfeszültségű (koronaelektrodok) elektródok találhatóak, szigetelések, tartó- és kopogtató szerkezetek, valamint működtető elektronika. Egy elektrosztatikus porleválasztó berendezés felépítését az 1. ábra mutatja be.



1. ábra Száraz elektrosztatikus porleválasztó egy típusának felépítése [1]

A por leválasztását a koronázó elektródból induló kisülések segítik, melyek a belépő levegőmolekulákat ionizálják, és ezek az ionok megtapadva a porszemcsék felületén, a gyűjtőelektrod felé sodródnak. A megtapadó szemcsék elvesztik töltésüket, ezt követően vagy lezuhannak a gyűjtőelektrodról a gravitáció miatt, vagy kopogtató szerkezet segítségével távolodnak el róla.

A koronaelektrodokat gerjesztő tápegység transzformátorból és nagyfeszültségű egyenirányítóból áll. Tapasztalati úton meghatározták, hogy negatív feszültségű táplálással nagyobb koronaáramot lehet elérni, emiatt (habár az ózon kibocsátás nagyobb) ez a megoldás terjedt el a gyakorlatban. Az elektródok alakja különböző geometriájú lehet. Elterjedt a hengeres cső és rárögzített tüskés megoldás. A térerősség nagy gradiense miatt számolni kell a koronaelektrod felületére tapadó porral is (gradiens effektus).

A berendezések típusától függően létezik egyfokozatú vagy többfokozatú. A több fokozat célja a jó leválasztási fok megvalósítása kevesebb olyan kisüléssel, amely nem vesz részt a portöltés létrehozásában. Az ilyen típusú berendezéseknél az első zónában a por/pernye szemcsék feltöltése zajlik, további szakaszaiban a jelen lévő villamos tér segítségével a leválasztás.

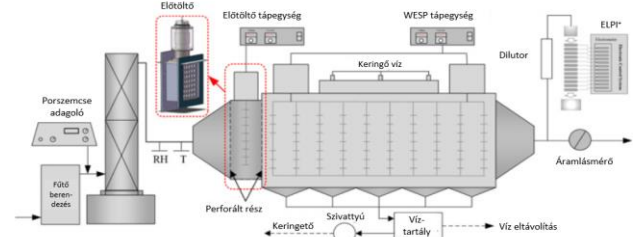
2.2. Nedves működésű porleválasztó felépítése

Már a korai 1910-es években igény jelentkezett új típusú elektrosztatikus porleválasztókra, amikor felismerték a problémát, hogy a nagy ellenállású porok leválasztása kisebb mértékű vagy éppen, ha a leválasztandó anyag gázfázisú magas hőmérsékleten, ezért hűtésre szorul. Bizonyos típusú gázok abszorbeálására igény mutatkozott, hogy a szennyező anyagok egy része kondenzálódjon, mielőtt elérné a füstkivezető kéményt. Így tulajdonképpen cseplevélés történik.

A probléma kompenzálására gyártották a nedves típusú elektrosztatikus porleválasztókat, először 1907-

ben. További előnye, hogy képes a néhány mikronos és szubmikronos szemcsék nagy leválasztási fokkal való leválasztására [2].

Felépítésük nagyon hasonlít a száraz típusúéhoz, azonban fontos kiegészítő eleme folyadék vagy gőzviszszavezető cső, továbbá, hogy a kopogtatás helyett víz-sugárral is eltávolíthatják a megtapadó port.



2. ábra Nedves elektrosztatikus porleválasztó egy típusának felépítése [1]

Annak ellenére, hogy több mint 100 éves múltja van, kevésbé jól ismert technológia.

Alapvetően 3 különböző megvalósítása létezik a porleválasztást illetően. Az első, hogy a gyűjtőelektrod felületén folyamatosan áramló vízréteget folytatnak, így a por vagy szennyeződés a vízzel együtt leválik a gyűjtőelektrodról. A második, hogy adott időközönként nagy nyomású víz-sugárral tisztítják meg az elektródok felületét. Végül a harmadik típusú megoldás, hogy kis- és közepes nyomáson állandó víz-sugarat/permetet juttatnak a teljes leválasztó térbe. A cikk további részében a harmadik megoldás körülményeit részletezzük.

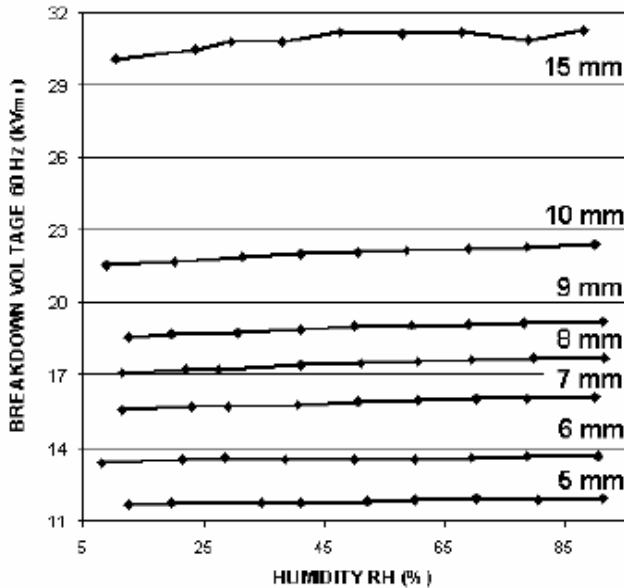
3. PARAMÉTEREK KÖZÖTTI ÖSSZEFÜGGÉSEK

Tapasztalati úton rájöttek arra, hogy folyamatos gőz-hozzávezetéssel nagyobb villamos térerősség jöhet létre anélkül, hogy átütés következne be. Fontos szempont, hogy a porleválasztó berendezés a víz forráspontja felett üzemeljen (a bejuttatott víz se hűtse le túlzott mértékben), különben számolni kell az elektródok gyorsabb korróziójával, ami a gyakori kopogtatás hozzájárulásával hamar mechanikai problémákhoz vezethet. A karbantartási munkálatoknak rendkívül nagy költsége van, valamint hosszadalmas és az ESP kulcsfontosságú szerepe miatt a gyár leállításához vezethet.

3.1. Átütési feszültség

A leválasztást több paraméter befolyásolja. Az egyik, hogy hol történik az átütés. Az átütést az elektronok által megtett átlagos szabad úthossz befolyásolja, mely értékére a páratartalom növelésével módosítható. Átütés szempontjából az elektronok szabad úthosszának csökkentése az átütési feszültség növekedését eredményezi.

A vízgőz nagyobb átütési feszültséget eredményez, mint a levegő, ebből eredően a vízgőz és levegő keveréke (nagyobb páratartalom) nagyobb átütési feszültséggel rendelkezik (3. ábra).



3. ábra Átütési feszültség alakulása különböző elektród távolságok esetén, a páratartalom függvényében [4]

A jelenség azzal magyarázható, hogy a páratartalom növekedésével az aktív zóna kiterjedése csökken. Ezáltal az elektronok szabad úthossza csökken, nagyobb térerősség szükséges az ütközési ionozás létrejöttéhez.

A nagyobb átütési feszültség azt jelenti, hogy a feszültséget növelve egyre nagyobb felületi térerősség jön létre a koronázó elektródokon, azaz nagyobb a koronakisülés intenzitása, és a vele együtt járó koronaáram értéke megemelkedik. Általánosságban elmondható, hogy a nagyobb koronaáram nagyobb leválasztási fokkal jár együtt. Néhány esetben ez nem igaz, hiszen a megnövekedett töltésszám ellenkorona kialakulásához vagy korona „quenching”-hez vezethet. Ezekben az esetekben a leválasztási fok javítása érdekében impulzus üzemi táplálást szoktak használni [5].

4. TÖLTŐDÉS HATÉKONYSÁGA

A töltődés hatékonysága nem csak az átütési feszültségtől függ, hanem az ionok átlagos szabadúthosszától is, azaz, hogy mekkora távolságot tesz meg az (általában negatív oxigén) ion. Fontos különbség az elektronok átlagos szabad úthosszával szemben, hogy jelen esetben nem a koronázó elektródok közvetlen környezetében vizsgáljuk a részecskéket. A vizsgált terület már a koronakisülés úgynevezett aktív zónáján kívüli rész, ahol a lelassuló elektronok negatív ionokat hoznak létre. A legfontosabb kérdés, hogy az ion találkozik-e a szennyeződés (vagy por) részecskéivel vagy sem. A legkedvezőbb eset, ha a por több ionnak tud nekiütközni és így jobban fel tud töltődni.

Az ionok a finom szennyeződést diffúziós töltődés segítségével töltik. Ezt a folyamatot befolyásolja az ionok szabad úthossza.

Az ionok átlagos szabad úthossza meghatározható az alábbi képlet alapján [6]:

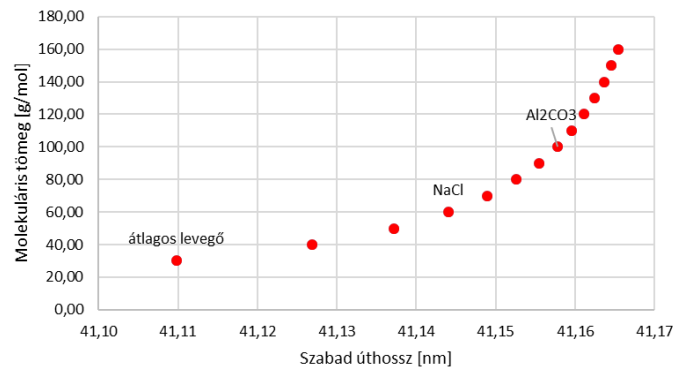
$$\lambda_{ion} = 1.329 \cdot \frac{Z_{ion}}{e} \cdot \sqrt{\frac{k \cdot T \cdot M_{ion} \cdot M_{levegő}}{(M_{ion} + M_{levegő}) \cdot N_a}} \quad (1)$$

ahol Z_{ion} az ionmozgékonyosság, e az elektron töltése, k a Boltzmann állandó, T hőmérséklet, M_{ion} az ion molekuláris tömege, $M_{levegő}$ a levegő moláris tömege és N_a az Avogadro szám. Gyakori eset, hogy a porleválasztó NaCl molekulákat kell leválasszon.

Ha az ionmozgékonyosság $1,9 \cdot 10^{-4} m^2(Vs)^{-1}$, $T=25^\circ C$, M_{ion} $58,5 g(mol)^{-1}$, $M_{levegő}$ pedig az átlagos $29 g(mol)^{-1}$ -nak választjuk, a többi fizikai állandó, akkor az átlagos szabad úthossz $41,1 nm$.

Az (1) egyenlettel számolva több különböző molekula tömegét figyelembe véve, meghatározható az egyes esetekhez tartozó szabad úthossz, amely a 4. ábrán látható.

Molekuláris tömeg - szabad úthossz karakterisztika



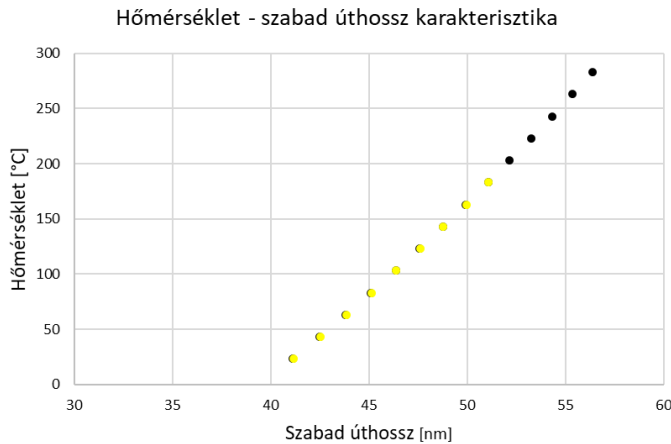
4. ábra Különböző anyagok esetén meghatározott ionokhoz tartozó átlagos szabad úthossz

A számítás során feltételeztem, hogy a porszemcsék között az átlagosnak minősülő levegő kisebb hányadot vesz ki egységnyi térfogatban, túlnyomó részt pedig a vizsgált anyagok (Nátrium-klorid, Alumínium-oxid) töltik ki. A feltételezés csupán az egyszerűsítés kedvéért értelmezhető, a valóságban az anyag maga a porszemcsé, viszont két szemcsé között lévő távolság mikroszkopikusnak nézve hatalmas.

Végeredményként mindenképpen elmondható, hogy csupán a molekulák tömegét figyelembe véve, az átlagos szabad úthossz nem változik számottevően.

A porleválasztó kamrában kialakult nagy hőmérséklet – ahogy az 5. ábrán látszik is -, hatással van az átlagos szabad úthosszra, hőmérsékletskálán emelkedve növekszik.

A vízgőz bejuttatása a leválasztó térben sokszor csökkenti a leválasztó tér hőmérsékletét, így az ionok átlagos szabad úthossza is csökken.

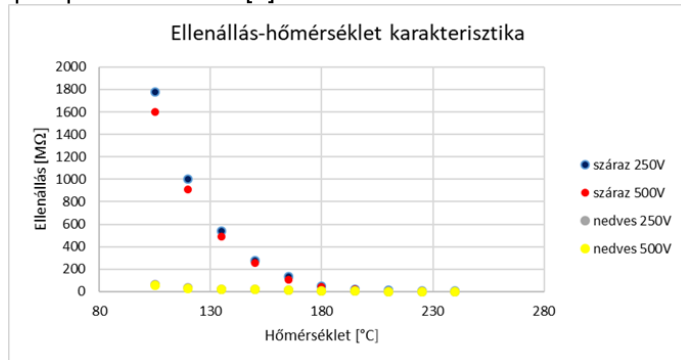


5. ábra Átlagos szabad úthossz hőmérséklet függése

4.1. Por ellenállása

Nagyon nagy fajlagos ellenállású porok esetén a porréteg felületén képes olyan mértékű töltés felhalmozódni, hogy ellenkorona-kisülés alakuljon ki. A nedvesség hatására a porszemcsék hajlamosabbak az összetapadásra, így vastagabb réteg is kialakulhat a gyűjtő elektródokon. Amennyiben a port melegíteni kezdjük a víz forráspontjánál alacsonyabb hőmérsékleten, akkor az ellenállás növekszik (ahogy csökken a por nedvességtartalma; egyben a relatív páratartalom is csökken), azonban egy bizonyos hőmérséklet után az ellenállás csökkenni kezd. Ennek magyarázata, hogy a por már szigetelőanyagként viselkedik, és növekvő hőmérséklet felett szigetelőanyagok karakterisztikájának megfelelően csökken az ellenállása, ami a 6. ábrán is látszik.

A témában korábbi cikk keretein belül számításokat végeztünk, melyben meghatározásra került egy vizsgált ipari por ellenállása [7].



6. ábra Vizsgált ipari por ellenállása a nedvesség és hőmérséklet függvényében, 250V és 500V-os vizsgáló feszültséggel

A por ellenállását 250 V-os és 500 V-os vizsgáló feszültséggel is mértük száraz, illetve nedves (páratartalomban gazdag) környezeti állapotában is. A hőmérséklet függvényében azt állapítottuk meg, hogy 100°C felett a növekvő hőmérséklettel drasztikusan csökken a por ellenállása.

A párás környezet további előnye a kisebb ellenállás mellett, hogy az összetapadt szemcsék nagyobb felületen tudják befogadni az ionokat, nagyobb erő vonzza őket a gyűjtőelektród felé, valamint a gravitáció is nagyobb hatást fejt ki rájuk.

4.2. Relatív permittivitás

A porszemcsék feltöltődésekor két fontos paramétert kell figyelembe venni, a porszemcsék telítési töltését és az ehhez szükséges időfüggvényt. Elemi szinten ezeket mérni szinte lehetetlen, modellekkel követhető nyomon, azonban bonyolultsága miatt gyakran a modellek is gömb alakú szemcsékkel számolnak. A nagy mennyiségben felhalmozódó töltések az átáramló portömegben képesek akkora töltésgócot kialakítani, amely képes viszszaszorítani a koronázó elektródon létrejövő koronakisülés intenzitást.

A porleválasztó modellek nagy része a Pautheiner-Moreau-Hanot összefüggést használja a telítési töltés meghatározására:

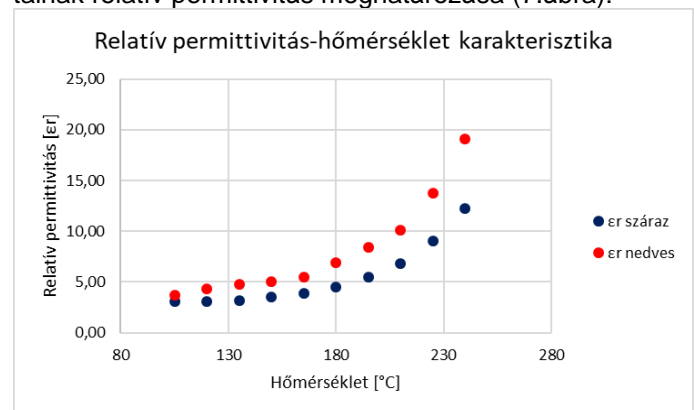
$$Q_t = (12 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot E \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r) / (\epsilon_r + 2) \quad (2)$$

ahol Q_t a telítési töltés, r a porszemcse sugara, E a porszemcse közvetlen környezetében levő villamos térerősség, ϵ_0 a vákuum permittivitás és ϵ_r a por relatív permittivitása.

A relatív permittivitás közvetlenül nem mérhető, azonban a kapacitásokkal kifejezve következtethető:

$$\frac{C_x}{C_0} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{r,x} \cdot \frac{A}{d}}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{r,l} \cdot \frac{A}{d}} = \frac{\epsilon_{r,x}}{\epsilon_{r,l}} \quad (3)$$

ahol C_x a szigetelőanyaggal teljesen kitöltött elektródok kapacitása, C_0 az ugyanazon méretű és elrendezésű vákuumban elhelyezett elektródok kapacitása és $\epsilon_{r,l}$ a levegő permittivitása, ami állandó és értéke 1. Részletesebb kifejtés megtalálható korábbi cikkünkben [7]. A cikk végeredményei között szerepelt, a különböző por állapotainak relatív permittivitás meghatározása (7. ábra):



7. ábra Vizsgált ipari por relatív permittivitása nedvesség és hőmérséklet függvényében

Nagy hőmérsékleten a relatív permittivitás akár többszörös értéket is felvehet alacsonyabb hőmérsékleten üzemelő berendezésekhez képest, ami azt jelenti, hogy a porszemcsék másfélszer annyi töltést képesek befogni. Egyrészt így könnyebben tudnak leválni a nagyobb villamos erőhatás miatt, azonban együtt jár azzal is, hogy a töltésgóc is nagyobb méretű, emiatt a jelenség káros (koronakisülés csökkentő) hatása is megnövekedik. A tértöltés csökkentése érdekében gyakran nem állandó táplálást alkalmaznak, hanem szüneteket iktatnak be (impulzus üzem).

4.3. PARAMÉTERVIZSGÁLAT HASZNÁLHATÓSÁGA, FOLYTATÁS

A témával foglalkozó BME kutatócsoport létrehozott egy numerikus modellt, amelyet az évek során folyamatosan fejlesztnek. A modellel numerikus eljárások segítségével nyomon követhető az egyes folyamatok elektrosztatikai és hidrodinamikai lejtésűsége. A szimulációkkal máig több különböző paraméter hatását sikerült modellezni [8],[9].

Minden szimuláció során a peremfeltételeket a száraz porleválasztó tulajdonságai szerint állítottuk be. Jövőbeli célunk, hogy a modell kiterjeszhető legyen nedves porleválasztók modellezésére is, melynek kezdő lépéseként a bemenő paraméter vizsgálatait kezdtük el.

5. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] **Balogh E:** Elektrosztatikus eredetű veszélyek kezelése, értékelése, Értekezés, Budapest, 2004
- [2] **Tzu-Ming Chen, Chuen-Jinn Tsai, Shaw-Yi Yan, Shou-Nan Li:** An efficient wet electrostatic precipitator for removing nanoparticles, submicron and micron-sized particles, *Separation and Purification Technology*, Volume 136, 2014, Pages 27-35, ISSN 1383-5866,
- [3] **M. Radmilović-Radjenović, B. Radjenović, Ž. Nikitović, Š. Matejčik, M. Klas:** The humidity effect on the breakdown voltage characteristics and the transport parameters of air, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Volume 279, 2012, Pages 103-105,
- [4] **D. Rodriguez, R. S. Gorur and P. M. Hansen,** "Effect of humidity on the breakdown characteristics of air in uniform field for the very low frequency (VLF) band," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 16, no. 5, pp. 1397-1403, October 2009,
- [5] **A. Zukeran, P.C. Looy, A. Chakrabarti, A.A. Berezin, S. Jayaram, J.D. Cross, T. Ito, Jen-Shih Chang:** Collection efficiency of ultrafine particles by an electrostatic precipitator under DC and pulse operating modes," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. 5, pp. 1184-1191, Sept.-Oct. 1999, doi: 10.1109/28.793383.
- [6] **Ye Zhuang, Yong Jin Kim, Tai Gyu Lee, Pratim Biswas:** Experimental and theoretical studies of ultra-fine particle behavior in electrostatic precipitators, *Journal of Electrostatics*, Volume 48, Issues 3–4, 2000, Pages 245-260,
- [7] **Székely L., Kiss I.:** Porok villamos tulajdonságainak vizsgálata az elektrosztatikus porleválasztás hatékonysága szempontjából, KLENEN konferencia, 2020, Visegrád
- [8] **T. Iváncsy, I. Kiss, J. Suda, I. Berta:** Efficiency of the precipitation of fine particles influenced by the ESP supply mode, ICESP IX - Mpumalanga, Krugan National Park, South Africa, 2004
- [9] **Tamás Iváncsy, Jenő Miklós Suda:** Behavior of poly-disperse dust in electrostatic precipitators, *Journal of Electrostatics*, Volume 63, Issues 6–10, 2005, Pages 923-927