

Finom porok kibocsátásának csökkentése villamos porleválasztókkal

Ivancsy Tamás¹, Suda Jenő², Kiss István¹

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamos Energetika Tsz.

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Áramlástan Tsz.

Ivancsy.Tamas@vet.bme.hu; Suda@simba.ara.bme.hu; Kiss@ntb.bme.hu

Bevezetés

Az elektrosztatikus porleválasztó készülékeket (amelyeket helyesebb villamos gáztisztítónak nevezni, hiszen működési elvük a por-, pernye- és cseppleválasztást egyaránt lehetővé teszi, és manapság táplálásukra nem egyenfeszültséget alkalmaznak) az ipar különböző területein régóta alkalmazzák a széntüzelésű erőművektől a cementgyárakig. Elterjedtségüket többek között imponáló leválasztási fokuknak köszönhetik: a belépő szennyeződés tömegének akár 99%-át leválasztják, tehát a szennyezőanyag tömegének mindössze 1%-a (sok esetben kevesebb) lép ki a levegőbe.

Ugyanakkor az egyre szigorodó környezetvédelmi előírások [1] szerint nem csupán az összes porkibocsátást kell határérték alatt tartani, de a néhány mikron egyenértékű átmérőjűnél kisebb szemcsék kilépő koncentrációja sem haladhatja meg az előírt nagyságot. Kezdetben a 10 mikronos szemcseméret alatti tartományban kibocsátható mennyiséget szabályozták (jelölésére az angol Particulate Matter kifejezés alapján a PM10 rövidítést vezették be). Mára azonban megjelentek a PM2,5-re vonatkozó követelmények is, sőt várhatóan a PM0,1 szabályozás is hamarosan napvilágot lát.

A 2001. évi, 9. Nemzetközi Elektrosztatikai Konferencián J. S. Chang professzor (McMaster University, Kanada) felszólalásában az elektrosztatikus porleválasztók modellezésének rendkívüli időszerűségét azzal indokolta, hogy az eddigi berendezések mindegyike PM10-re készült, ezért a szigorúbb, PM2,5 szabályozás eredményeképpen a professzor - kissé sarkított - véleménye szerint az összes meglévő berendezést ki kell cserélni, vagy fel kell újítani.

Azóta számos kutatás (számítógépes modellezés és helyszíni mérés [2] kimutatta, hogy a jelenleg működő elektrosztatikus porleválasztó berendezések nagy részénél hiába imponáló az eredő leválasztási fok, a finom frakciókra érvényes érték annál drasztikusan rosszabb, vagyis az előírásokban szereplő követelmények betartásához valóban valamilyen technológiai fejlesztésre van szükség.

Cikkünkben ezt a témakört igyekszünk körbejárni, felvázolva egy saját fejlesztésű, a nemzetközi szakirodalomban publikált számítógépes modellt, értékelve a modell által szolgáltatott eredményeket és ismertetve azokat az újszerű megoldásokat, amelyek a finom porok kibocsátásának csökkentését célozzák.

Az elektrosztatikus porleválasztó berendezések modellezése

A elektrosztatikus porleválasztó berendezések modellezésének célja, hogy hozzásegítsen a bennük lejátszódó folyamatok alaposabb megértéséhez, rámutasson olyan összefüggésekre, amelyek a gyakorlatban hasznosíthatók, így végső soron elősegítse a berendezések fejlesztését, méretezését. Ugyanakkor a modellalkotásnál bizonytalanságot okoz a por és az áramló gáz tulajdonságainak időbeli változása, a részecskék alakjának változatossága, illetve

a különböző mérési eredmények bizonytalansága. Többek között ezeknek „köszönhető”, hogy - Senichi Masuda professzor (Tokio University, Japán) szavaival élve - az elektrosztatikus porleválasztó berendezések méretezése jelenleg inkább művészet, mint tudomány.

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamos Energetika Tanszék, Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoportjában Dr. Berta Istvánnak, a Nemzetközi Porleválasztási Társaság Igazgató Tanácsa tagjának vezetésével évtizedek óta foglalkoznak ezzel a „művészettel”. A kutatások eredményeit több hazai berendezés táplálásának korszerűsítésében hasznosították. Jelenleg az Áramlástan Tanszékkel együttműködve további intenzív kutatómunka folyik a modell továbbfejlesztésére.

A modell rövid leírása

A modell két fő modulból áll. Az első a villamos tér jellemzőinek a másik az áramlási tér jellemzőinek számítására szolgál. Az első modul a Laplace-Poisson egyenletet oldja meg az integrál egyenletek módszerével. A „P” pontban fellépő potenciál értékét megadó egyenletben (1) az első tag a tértöltés hatását írja le (ρ_V), a második az A_1 felületen található felületi töltéssűrűség (ρ_A) hatását írja le, míg a harmadik tag az A_2 felület dipólus momentumából származó potenciál nagyságát adja meg.

$$\varphi(P) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_V \frac{\rho_V}{r} dV + \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{A_1} \frac{\rho_A}{r} dA + \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{A_2} \frac{v}{r} \text{grad} \frac{1}{r} dA \quad (1)$$

A mi esetünkben ρ_A a korona és a felfogó elektródok felületi töltése, ρ_V az ionok és részecskék által létrehozott töltéssűrűség, míg a harmadik tagot elhanyagoltuk. A részecskék töltöttségének meghatározásakor mind a diffúziós mind a tértöltődést figyelembe veszi a modellünk. Minthogy a tértöltést befolyásolja a villamos térerősség és a villamos térerősséget befolyásolja a tértöltés, így a térerősség kiszámításához iterációra van szükség. Az (1) egyenlet iterációval történő megoldásához egy numerikus modul készült. A modul bemenetként egy adott időpillanat a sebesség terét és a koncentráció eloszlását kapja, valamint az ESP kamra geometriai és villamos paramétereit és a por tulajdonságokat (ezek az adatok a por töltődésének leírásához szükségesek[8]). A modul kimenete a sodródási sebesség villamos térből adódó összetevője. Ez (3) alapján határozható meg.

A másik modul az áramlási teret és a részecske transzportot számítja, azaz a részecske koncentráció eloszlást és a részecske sebesség eloszlást. Jelen esetben a c részecske koncentráció eloszlás meghatározására fókuszálunk, az egyszerű részecske transzport modellünkkel, ami a konvektív diffúziós transzport egyenletet (2) használja. Ebben a következő feltételezésekkel élünk: elhanyagolható az áramlás irányú részecske diffúzió és a villamos tér által létrehozott áramlási irányú sodródási sebesség.

$$v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_t}{Sc_t} \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} (c \cdot w_{th,y}) \quad (2)$$

A (2) egyenletben a gáz áramlási sebességének összetevőit v_x és v_y számítja a határréteg egyenletből véges differenciál módszerrel, ahol a turbulens viszkozitás ν_t a keveredési úthossz modell alapján kerül meghatározásra [9]. A részecske diffúziós tag a (2) egyenletben a turbulens viszkozitás és a turbulens Schmidt szám (Sc_t) helyi értékein alapul, és $w_{th,y}$ az elméleti sodródási sebesség a (3) egyenletnek megfelelően.

$$w_{th,y} = \frac{Q_p^\infty E_y}{3\pi\mu_p} Cu \quad (3)$$

(3) egyenletben Q_r° a telítési töltése a d_p átmérőjű gömb porszemcsének a Cochet egyenlet alapján. Emellett a (3) egyenletben a részecske sodródási sebesség módosítva van a Cunningham faktorról (Cu)[4], μ a dinamikus viszkozitása az áramló gáznak, és E_y a villamos térerősség vektor merőleges komponense. A részecske transzportra az Euler-i modellt alkalmazzuk.

Polidiszperz porterhelés kezelése

Az előző modell csak egy porfázist volt képes kezelni. Több porfázis (polidiszperz por) kezeléséhez a modellt fejleszteni kellett. A többfázisú port granulometrikus eloszlása szerinti részekre bontásával lehet kezelni. A portértöltés számítás alapja a kombinált töltődési modell, ami a diffúziós és a tértöltést is figyelembe veszi (6). Ebben az egyenletben d_p a porszemcse átmérője, ε_{pr} a relative permittivitása, míg λ az ionok szabad úthossza. Az iontértöltés villamos tér számítása a (4) mátrix egyenleten alapul. Polidiszperz esetben a modell a (6) és (3) egyenleteket minden porfázisra megoldja. A (4) és (5) egyenletekhez szükséges portértöltést a különböző frakciók tértöltésének szuperpozíciójával kapjuk. A probléma numerikus megvalósításához szükség van egy adatbázisra, amely az egyes porfázisokhoz tartalmazza a sebességteret, töltéeloszlást, és koncentráció eloszlást.

$$\underline{A}\rho_S + \underline{B}\rho_V = \varphi \quad (4)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}; \quad \sigma = \mu_i \rho_{ion}; \quad \text{div} \mathbf{J} = 0; \quad \text{div} \mathbf{D} = \rho_{ion} + \rho_{dust} \quad \mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}; \quad \mathbf{E} = -\text{grad} \varphi \quad (5)$$

$$Q_i = \left[\left(1 + \frac{2\lambda}{d_p} \right)^2 + \frac{2}{1 + \frac{2\lambda}{d_p}} \left(\frac{\varepsilon_{pr} - 1}{\varepsilon_{pr} + 2} \right) \right] \pi \varepsilon_0 d_p^2 E; \quad Q(t) = Q_i \frac{t}{t + \tau}; \quad \tau = \frac{4\varepsilon_0}{\rho_{ion} \mu_i} \quad (6)$$

Kétféle módon lehet a porfázisok adatait megadni a modellnek. Az első esetben a teljes koncentráció meghatározása után a különböző méretű szemcsék darabszámát, illetve az összes porszemcse darabszámát kell megadni. A másik lehetőség az egyes porfázisok koncentráció eloszlásának meghatározása külön-külön. A modellezés mindkét metódust használja.

A számítás eredményeként az egyes porfázisok mozgását kapjuk eredményül. A porfázisok koncentráció eloszlása és az összes por koncentráció eloszlása alapján meghatározható, hogy az egyes porfázisok porszemcséi hol érik el a felfogó elektródot. Ez a számítás kibővíthető a porvisszalépést modellező számításokkal. [5]

A polidiszperz port kezelő modell működésének szemléltetésére a tanszékek laboratóriumi modell porleválasztójának egy félutóját elemeztük, a kapott eredményeket a cikk második felében ismertetjük.

Az impulzus üzemi modellezésének nehézségei

A táplálási módok hatásának figyelembe vételéhez a modellbe a folyamatok időfüggését is be kellett építeni. Ez általánosságban a különböző paraméterek adott dt időlépésenkénti számításával lehetséges. Az előző fejezetben bemutatott, állandósult állapotot számító modell nem képes figyelembe venni az impulzus üzemi hatásait, mert az iteráció során állandósult állapotot feltételezve számol, azaz állandó gázáramot, feszültséget, ionáramot és bejövő promennyiséget feltételez. Ezért a modellt úgy kellett módosítani, hogy figyelembe tudja

venni a paraméterek időfüggését. Ehhez a tértöltést és a portöltődést számító modulokat kellett módosítani.

Az ion tértöltés számításnál feltételezzük, hogy adott tápfeszültségnél a korona áram állandóan jelen van a félutcában. Ez a feltétel csak akkor igaz, ha a tápfeszültség hosszabb ideig állandó, mint az ionoknak a fél utcán való áthaladásához szükséges idő. Feltételezve, hogy az ionmozgékonyosság állandó

$$\mu_i = 2 \cdot 10^{-4} m^2 / Vs \quad (7)$$

és a pszeudohomogén térerősség

$$E_{ps} = 20kV / 3cm \quad (8)$$

(modell porleválasztóban), az ionok félutcán való átlagos áthaladási ideje számítható a következő közelítő ion sebesség alapján (9)

$$\mu_i \cdot E_{ps} = 2 \cdot 10^{-4} [m^2 / Vs] \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 3^{-1} \cdot 10^{-2} [V / m] \approx 1.3 \cdot 10^2 m / s \quad (9)$$

így a 3 cm széles utcán az ionok körülbelül

$$t = \frac{3 \cdot 10^{-2} m}{1.3 \cdot 10^2 m / s} = 2.3 \cdot 10^{-4} s \quad (10)$$

idő alatt haladnak át.

Ez mikroszekundumos periódus időt feltételezve azt jelenti, hogy a tápfeszültség túl gyorsan változik ahhoz, hogy állandósult ionáramot feltételezhetnénk. Abban az esetben, ha a táplálás rövid impulzusai nagyobb áramimpulzusokat generálnak, a kisülés megváltozik. A korona elektródon a pamatos kisülés (korona kisülés) helyett csatorna kisülés lép fel. Ennek kiszámításához a Peek modell [7] már nem megfelelő.

Olyan modellre van szükség, amely képes a tápfeszültségben bekövetkező változásokat megfelelő módon követni, és rövidebb időlépésekre (Δt) képes számítani az ion tértöltést, mint a tápfeszültség periódus ideje.

Donor cella módszer

Az új modellünkben a donor cella módszert használjuk a félutcában az ion tértöltés meghatározására [10,12]. Ennek a módszernek az előnye, hogy irreguláris (nem egyenlő felosztású) rácsot használ. Így azokon a részeken lehet sűrűbb a rács, és pontosabb a számítás, ahol az értékek gyorsan változnak térben, és azokon a helyeken, ahol csak kis változások vannak a rács ritkább lehet, ezzel is gyorsítva a számítást.

A $\text{div } J = 0$ egyenlet érvényes a rács minden cellájára, azaz a cellába belépő töltéshordozók száma megegyezik a cellát elhagyó töltéshordozók számával. A cellában az áramsűrűség arányos az ionmozgékonyossággal (μ), a szomszédos cellák töltéssűrűségével (ρ_i), a két cella potenciál különbségével ($\varphi_j - \varphi_i$) és fordítottan arányos a cellák távolságával (Δ_{ij}), ami a cellák középpontjának távolsága.

$$J_{j,i} = \rho_j \cdot \mu \cdot \frac{\varphi_j - \varphi_i}{\Delta_{j,i}} \quad (11)$$

A cellát elhagyó töltéseknél a cella töltéssűrűségét vesszük figyelembe.

$$J_{k,i} = \rho_i \cdot \mu \cdot \frac{\varphi_i - \varphi_k}{\Delta_{k,i}} \quad (12)$$

Ha a $\text{div } J = 0$ egyenletet kiegészítjük a töltések rekombinációjából származó töltés veszteséggel, a következő egyenletet kapjuk

$$J_{j,i} \cdot L_{j,i} + J_{k,i} \cdot L_{k,i} + J_{l,i} \cdot L_{l,i} + R_i \cdot A_i = 0 \quad (13)$$

ahol R_i a töltéshordozók rekombinációs tényezője. A lineáris egyenletrendszer megoldása adja az ESP félutca ion tértöltés eloszlását.

Az iontértöltés sűrűség-változásának követéséhez a donor cella módszert módosítani kell egy időfüggő formára [10, 11]. Ez azt jelenti, hogy az áramok (ill. áramsűrűségek) egyensúlya helyett a szállított töltések egyensúlyát kell meghatározni. Ezért a dt időlépést vezetjük be, így meghatározható a töltés (az áram és az időlépés szorzata) ami a cellába belép illetve a cellából kilép. Ezzel az eljárással az ion tértöltés változása egy cellában megfigyelhető az idő függvényében.

Az időlépést (dt) olyan értékre kell választani, ami jelentősen rövidebb annál az időnél, amit egy töltéshordozó egy adott cellában tölt. Ez a feltétel biztosan teljesül, ha az időlépés kisebb, mint a legrövidebb cellaoldal (ds) hossza osztva az ionmozgékonyosság (μ) és a villamos térerősség (E) szorzatával.

$$dt \ll ds / (\mu E) \quad (14)$$

Az itt leírt eljárás szükségessé teszi a modell számítási eljárásának és az adatstruktúrájának módosítását. Új adatokat kell a meglévőkhöz adni, melyek a kezdő ion tértöltést tartalmazzák.

1. villamos térerősség kiszámítása az indulási ion tértöltés eloszlással
2. a donor cella módszernek megfelelően az áramok számítása
3. töltésvándorlás meghatározása a dt időlépés alatt, az indulási ion tértöltés eloszlás használatával
4. az aktuális ion tértöltés eloszlás számítása
5. az indulási ion tértöltés eloszlás lecserélése az újjal, és folytatás az 1. lépéstől

Az eredmények értékelése

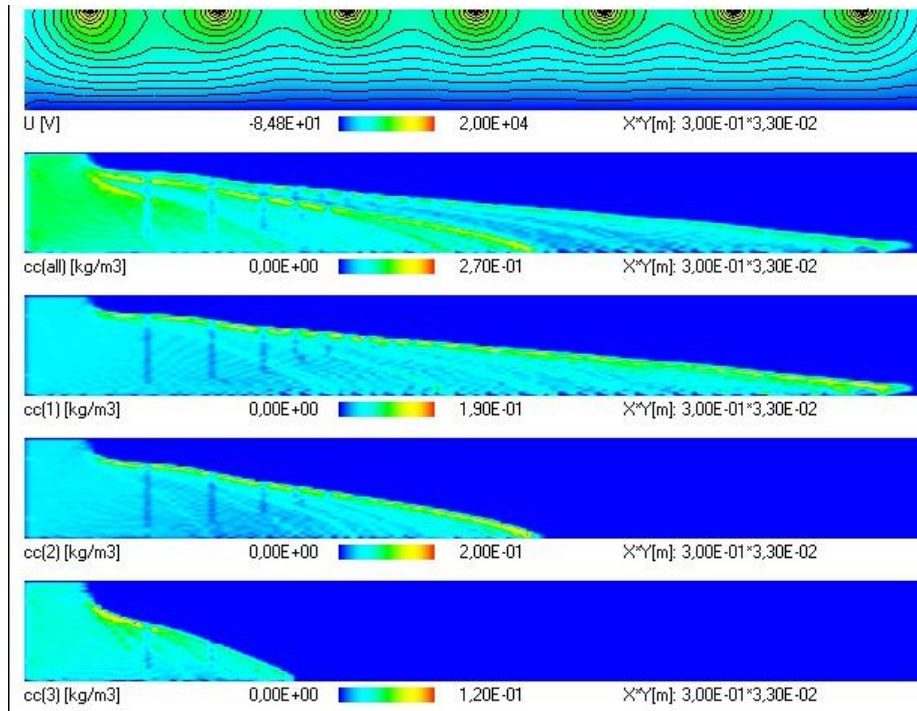
Az alábbiakban két számítási eredményt szemléltetünk. Az első a modell hitelesítéséhez használt laboratóriumi porleválasztó berendezés egyik félutcajára vonatkozik, amely 30mm széles és 300 mm hosszú. Három különböző porfázis lép be a félutcába a következő átmérőkkel: 1; 2 és 5 μm . A belépéskor a koncentráció 0,01; 0,05 és 0,03 kg/m^3 az egyes fázisokra. A részecskék fajlagos sűrűsége 2500 kg/m^3 és a relatív permittivitásuk 8, a gázsebesség a belépéskor 1 m/s. A számítási eredmények az 1. ábrán (ábrason) láthatóak.

Az ábrason első ábráján a félutcára érvényes potenciáeloszlást láthatjuk, 20 kV egyenfeszültségű táplálás esetén. Ezt követi a teljes portömeg, majd az egyes frakciók szemcséinek útvonalát szemléltető ábrák sorozata. Jól látszik, hogy mennyivel tovább utaznak a mikronos részecskék nagyobb átmérőjű társaiknál.

A 2. ábrán egy egyzónás ipari porleválasztó berendezés egyik félutcaját láthatjuk, amelynek szélessége 45 cm, mélysége 10 cm, az alkalmazott tápfeszültség pedig 70 kV. 0,01 kg/m^3 belépési koncentráció, 1 m/s gázsebesség esetén a 2 mikronos szemcsékből álló portömeg jelentős része jól látható módon elhagyja a félutcát. A kilépő portömeg belépési értékhez viszonyított aránya 1 mikronos ill. annál kisebb méretű szemcsékre még nagyobb, ami jól egyezik a szakirodalomban publikált eredményekkel. [2]

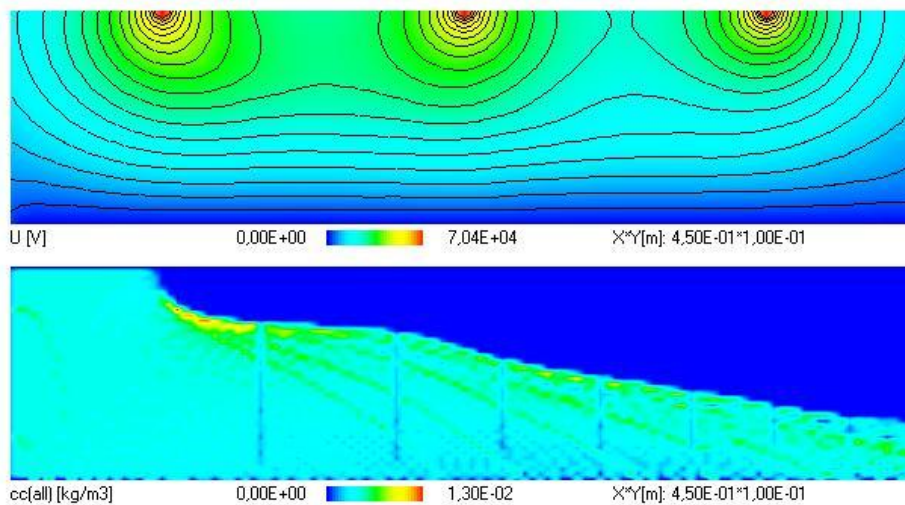
Újszerű megoldások

Az eredmények alapján kézenfekvőnek tűnik néhány olyan megoldás, amelyek segítségével csökkenthető lenne a finom porok kibocsátása (vagyis növekedne a finom frakciók leválasztási foka). Ilyen például



1. ábra

vxe[m/s]=1,00E+00 r0[m]=2,50E-03



2. ábra

- A félutca szélességének csökkentése
- A félutca hosszúságának növelése
- A zónák számának növelése
- A gázsebesség csökkentése

A fenti megoldások közös tulajdonsága, hogy alkalmazásuk rendkívül költséges, ezért a szakemberek igyekeztek (és igyekeznek ma is) gazdaságosabb megoldásokat találni. Az egyik ilyen megoldás az impulzusüzemű táplálás alkalmazása. Maga a módszer nem új keletű, a modern villamos gáztisztítók már javarészt ezt használják, és egyre több elavult elektrosztatikus porleválasztó berendezés kap impulzusüzemű táplálást a felújítás alkalmával. Méréssel és számítással is igazolható [3], hogy ez a táplálási mód hatékonyabb leválasztást

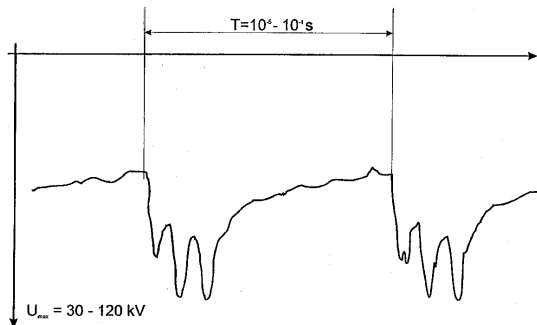
tesz lehetővé, és amellet, hogy kevesebb szennyezőanyag kerül a levegőbe, energiamegtakarítást is eredményez.

Az impulzusüzemű táplálásnak ez a hatása részint az ellenkorona kisülést korlátozó képességének köszönhető. Nagyobb szigetelőképeségű poroknál a szemcsék felületéről a töltések csak rendkívül lassan tudnak eltávozni az ellenelektrod felé. Így előbb-utóbb a felhalmozódó töltések helyenként akkora térerősséget hoznak létre, hogy átütik a porréteget. Az átütési pontok - első közelítésben - olyan „tüelelektrodokként” működnek, amelyek csúcán koronakisülés jön létre, mégpedig a valódi koronázó elektrodoknál lévő kisüléssel ellentétes előjelű. Ez az ellenkorona kisülés, amelynek hatására a porréteg töltésével ellentétes előjelű ionok jutnak a leválasztó térbe, rontva ezzel a leválasztási fokot.

Mínt hogy általában a porleválasztókban a koronázó elektrodokra nagy negatív feszültséget kapcsolnak, az ellenkorona következtében pozitív töltések jelennek meg. A folyamat kezdetén kialakuló átütés jelentékeny mennyiségű port „robbanthat” vissza a leválasztó térbe. Az ellenkorona kisülés a tapasztalat szerint akkor indul meg, ha a porréteg fajlagos ellenállása legalább $5 \cdot 10^8 - 10^9 \Omega m$.

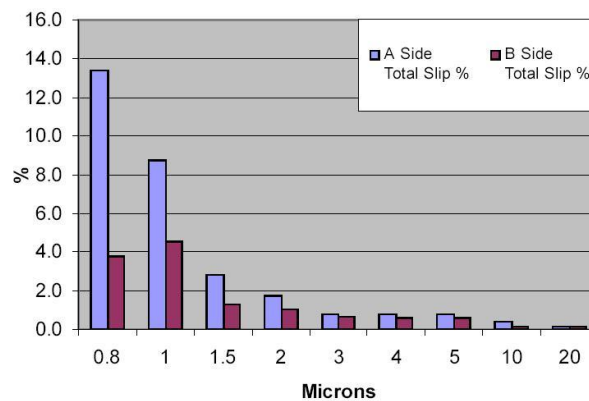
Negatív koronázó elektrodok esetén a különálló (porréteg-) átütési pontokból pozitív pamatos kisülés indul ki, amely könnyen átalakulhat a teljes leválasztó teret áthidaló átütéssé. Ezen kívül a porréteg nagy negatív felületi töltéssűrűsége miatt felületi terjedő kisülés is kialakulhat (surface streamer). Nagyobb fajlagos ellenállás ($10^9 - 10^{10} \Omega m$) esetén az átütési pontok száma annyira megnő, hogy az egész felületet beborító, parázsló (ún. general mode) ellenkorona kisülés jön létre, ugyanakkor a pozitív pamatok „eltűnnek”. A jelenség rendkívül sok pozitív töltést juttat a leválasztó térbe, így erősen csökken a leválasztásban kulcsfontosságú negatív tértöltés, ezzel pedig jelentősen romlik a leválasztási fok. Pozitív koronázó elektrodok esetén az ellenkorona kisülés negatív töltéshordozókat juttat a leválasztó térbe, de a porréteg felületén az előbb leírtakkal ellentétben nem különálló pontok, hanem parázsló foltok jelennek meg. [9].

Az impulzusüzemű táplálással elérhető, hogy az összegyűlt porréteget ne töltse feleslegesen az ionáram, a porréteg nagyobb vastagság mellett érje el az átütéséhez szükséges kritikus térerősséget, ami azt jelenti, hogy a por eltávolítását (pl. kopogtatással) nagyobb időközönként lehet végrehajtani. Az impulzus üzemű táplálás egy jellegzetes feszültség-idő diagramját mutatja a 3. ábra mutatja.



3. ábra

DUST SLIP OUT OF PRECIPITATOR



4. ábra

Egészen újszerű megoldást készítettek amerikai és ausztrál szakemberek. Az agglomerátornak nevezett berendezés az elektrosztatikus porleválasztó bemenete előtt található, és a belépő szemcséket több csoportra osztva, azokat ellentétes előjelű töltéssel látja el. Ezt követően az ellentétesen töltött részecskék összekeverednek, így a finom (1-2 mikronos, vagy annál kisebb) részecskék egymással, vagy a durvább szemcsékkel összetapadnak. Ez azt jelenti, hogy a porleválasztóba kerülő agglomerátumok már a kedvezőbb, nagyobb kiterjedésű szemcsékként viselkednek, így hatékonyabb leválasztás válik lehetővé [6].

Összehasonlításképpen a 4. ábrán az előbbi szakirodalomban található diagrammot szeretnénk bemutatni, ahol világoskék szín jelöli az agglomerátor nélküli, vörösés-lila az agglomerátorral ellátott porleválasztó berendezés porkibocsátásának alakulását az egyes frakciókra. (100% agglomerátor nélküli, teljes porkilépésre vonatkoztatva). A további kutatások jelenleg is folynak ez egyik ígéretes terület a zsákos- és a villamos porleválasztók együttes alkalmazása esetén várható leválasztási fok meghatározása.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki Dr. Berta István Professzor Úrnak a kutatómunkában nyújtott segítségével.

Irodalom

- [1] 14/2001. (V. 9.) KöM–EüM–FVM együttes rendelet
- [2] I. Gallimberti: **Detailed Mass Balance in Electrostatic Precipitators under industrial operating conditions**. Proc. of IX. International Conference on Electrostatic Precipitation, Kruger Gate, South Africa, 17-21 May 2004. (01.pdf)
- [3] Berta István: **Ipari elektrosztatikai technológiák hatékony működése és fejlesztése**. Kandidátusi értekezés, Budapest, 1987
- [4] S. Oglesby Jr., and G. B. Nichols: **Electrostatic Precipitation**. Marcel Dekker, New York, USA, 1978.
- [5] I. Kiss and I. Berta: **New concept of ESP modeling based on fuzzy logic**. *Journal of Electrostatics, Elsevier, 2001. Vol. 51-52. pp.206-211.*
- [6] W. Harrison, R. Truce, R. Crynak: **Result of the INDIGO Agglomerator Testing at Watson Power Plant**. Proc. of IX. International Conference on Electrostatic Precipitation, Kruger Gate, South Africa, 17-21 May 2004. (C04.pdf)
- [7] Gallimberti, I.: **Recent advancements in the physical modelling of electrostatic precipitators**. *Proc. 8th Int. Conf. Electrostatics. Poitiers, France, 1997.*
- [8] Chang, J.S.: **Electrostatic charging of particles**. *Handbook of electrostatic processes. Marcel Dekker, New York, 1995. pp. 39-49 (Chapter 3).*
- [9] Masuda, S. & Hosokawa, S.: **Electrostatic precipitation**. *Handbook of electrostatic processes, Marcel Dekker, New York, 1995. pp. 441-479 (Chapter21).*
- [10] Meroth, A.M., Gerber, T., Munz, C.D. & Schwab, A.J.: **A model of the non-stationary charge flow in an electrostatic precipitator**. *Proc. VI Int. Conf. Electrostatic Precipitation, Budapest, Hungary, 1996, pp 130-136*
- [11] Meroth, A.M., Nicolaus, S., Levin, P.L. & Schwab, A.J.: **Effective solution of 3D charge coupled problems in electrostatic precipitators**. *Proc.VI Int. Conf. Electrostatic Precipitation, Budapest, Hungary, 1996, pp 137-143.*
- [12] Jenei István: **Ózongenerátorok hatásfokának javítása a térjellemzők eloszlásának módosításával**. PhD értekezés. BME, 2006.