



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamos Energetika Tanszék

Székely László

**Porok dielektromos jellemzőinek és
nedvességhüggő paramétereinek vizsgálata
elektrosztatikus porleválasztó leválasztási
fok javítása érdekében**

TDK dolgozat

KONZULENSENK

Dr. Kiss István
Dr. Tamus Zoltán Ádám

Budapest, 2019

Tartalom

Összefoglaló.....	3
Abstract	4
Bevezetés.....	5
1. Elektrosztatikus porleválasztó	6
1.1 Történeti áttekintés.....	6
1.2 Az elektrosztatikus porleválasztó előnyei-hátrányai.....	7
1.3 A villamos porleválasztók elvi felépítése.....	7
1.4 Működés közben előforduló jelenségek	9
1.4.1 Korrózió	9
1.4.1 Porréteg megtelepedése	9
1.4.2 Ellenkorona kisülés	10
1.4.3 Korona-quenching	10
2 Elektrosztatikai porjellemzők	12
2.1 Fajlagos térfogati ellenállás	12
2.2 Portöltődés	13
3 Mérési elrendezések	15
3.1 Fajlagos térfogati ellenállás meghatározása	15
3.2 Relatív permittivitás meghatározása.....	17
3.3 Tű sík elektród elrendezés.....	17
4 Mérési eredmények	21
4.1 Dielektromos jellemzők.....	21
4.2 Koronaáram-feszültség karakterisztika	24
5 Összegzés.....	28
Köszönetnyilvánítás.....	29
Ábrajegyzék	30
Irodalomjegyzék	31

Összefoglaló

Az iparban levő környezetszennyezés csökkentése sok esetben megköveteli a kibocsájtott por mennyiségének korlátozását. Ez a korlátozás nem csak az össz kibocsájtásra, hanem a 10 és 2.5 μm -es frakciókra is vonatkozik (PM10, PM2.5). Sok helyen alkalmaznak elektrosztatikus porleválasztókat a kívánt határértékek betartásához. Az évtizedekkel ezelőtt alkotott jogszabályok azonban, az idő előre haladtával folyamatosan szigorodtak környezetvédelmi szempontból.

Gyakori problémát jelent, hogy a korábban épített elektrosztatikus porleválasztókat nagyobb szemcseméretre tervezték és az eredeti működési feltételekkel vagy az időközben megváltozó tüzelési technológia miatt nem tudnak megfelelni az előírásoknak.

Annak érdekében, hogy ne kelljen lecserélni a teljes porleválasztó berendezést, a gyártók sokszor a meglévő korszerűsítését próbálják megoldani. Ehhez a legkézenfekvőbb megoldás a villamos paraméterek megváltoztatása, hiszen ebben az esetben nem nyúlunk bele magába a technológiai folyamatokba, azonban pusztán e paraméterek megváltoztatása nem mindig eredményezi a leválasztási fok javulását.

A témában végzett irodalomkutatót követően laboratóriumi keretek között méréseket végeztem ipari por jellemzőinek meghatározására, majd a páratartalmat növelve vizsgáltam, hogy nedvesség hatására miként változnak e paraméterek. A paraméterek meghatározását követően porral fedett tű-sík elrendezésben vizsgáltam a koronaáramokra gyakorolt hatását, hiszen a koronaáram és az elektrosztatikus porleválasztók leválasztási foka összefügg.

Abstract

In many cases, industrial pollution requires a limitation of the amount of dust emitted. This restriction applies not only to total emissions, but also to the 10 and 2.5 μm fractions (PM10, PM2.5). In many places, electrostatic precipitators are used to maintain the desired limits. However, legislation developed decades ago has become increasingly stringent with regard to environmental protection.

It is common problem that previously built-up electrostatic precipitators are designed for larger dust particle sizes and are unable to compliance specifications due to original operating conditions or changing fuel technology.

In order to avoid having to replace the entire dust separator equipment, manufacturers often try to upgrade their existing one. The most obvious solution to this is to change the electrical parameters, because in this case we do not touch the technological process itself, but simply changing these parameters does not always lead to a good separation.

Following the research on this topic, I carried out measurements within the laboratory to determine the characteristics of industrial dust, and then increased the humidity by examining how these parameters change under the influence of moisture. After the determination of the parameters, I examined the effect of the corona currents in a powder-covered needle-plane arrangement, because the corona current and the efficiency of electrostatic precipitator is related.

Bevezetés

A természetben sokféle porforrás létezik. A por az egyik leggyakoribb alkotóelem a világunkban. Mindig jelen van a levegőben és behatol különböző helyiségekbe, még az elhagyott intézményekben, nem használt lakóházakban is egy bizonyos idő eltelte után minden porréteg be van fedve, amelyet a szél a legkisebb rések révén fúj be. Következtetésképpen a levegőben mindig vannak olyan részecskék, amelyektől nem lehet megszabadulni speciális védőintézkedések nélkül. Az emberi tevékenység jelentősen növeli a légkör porszennyeződését, amely jól látható a nagyvárosokban.

Néhány technológiai eljárás annyira erős légköri kibocsájtást eredményez, hogy szűrés nélkül nem alkalmazható. Emiatt a levegőtisztítás bármely vállalkozásban az egyik fő folyamat, amelyet egy fontos szempontként figyelembe kell venni. Ezeknek a kibocsátásoknak nem az a fő problémája, hogy szennyeződés rakódik le a házakban, járművön, elektronikai eszközökön, hanem hogy az egészségre súlyosan károsító hatással lehet. A levegő vagy gázok nemkívánatos legkisebb szennyeződéstől történő tisztítását speciális szűrők végzik, amelyen keresztül a szennyezett levegő vagy gáz áramlik.

Számos porleválasztási technológia ismert, amelynek leválasztási foka a funkciójához képest eltérő lehet. Legközismertebb példák egyszerű szellőztető- és klímaberendezések, de példaként említhetem a műtőkben használt vagy éppen ipari berendezésekben használt porleválasztási technológiákat. Természetesen, a kibocsátások mennyiségének maximális értékét a légállapotról vonatkozó előírások vagy környezetvédelmi rendelkezések megszabják.

Az egyik jól ismert porleválasztásra használt eszköz az elektrosztatikus porleválasztó. A por szűrését az átáramló gázból a kisméretű szemcsék villamos feltöltését, mozgását valamint a Coulomb erőt kihasználva teljesíti. Azonban a környezetvédelmi előírások szigorodtak, így nem feltétlen tudja teljesíteni a jogszabály betartását, amely alapján átépítésre – technológia váltásra van szükség. Számos korszerű, új problémákat vet fel, hogy az eredeti működési feltételekre tervezett berendezés, nem képes teljesíteni a modern szabályozásokat.

1. Elektrosztatikus porleválasztó

A részecskék az ipari légszennyezés egyik problémája, amelyet ellenőrizni kell. Ez nem néhány ipárhoz kapcsolódó probléma, hanem számos iparágban megtalálható (kezdve a gyógyszeripartól át az erőművekben kiáramló füstökig). Az egyik legfontosabb részecskegyűjtő eszköz, amelyet manapság használnak az elektrosztatikus porleválasztók. Legfontosabb paramétere a leválasztási fok, amely igen sok elektrosztatikus és áramlástani tényező függvénye. A tényezők egy részének hatását fizikailag mindmáig nem sikerül megmagyarázni, előnyös és előnytelen hatásait csak egy a berendezésben található „manóra” tudjuk fogni [1].

Az elektrosztatikus porleválasztók fő tervezési szempontja a hatékonyság maximalizálása, azonban számos működési paraméter hátrányosan befolyásolhatja a kicsapódó anyag gyűjtési hatékonyságát. Leválasztási fok a működési paraméterek mellett a portulajdonságoktól is nagyban függ, amelyek közül a legfontosabb paraméterek a por ellenállása, permittivitása szemcsés felület tulajdonságai, a részecskeméret és részecske alakja.

1.1 Történeti áttekintés

Az elektrosztatikus porleválasztók működésének alapelvét a XVI-XVII. század tudósai fedezték fel. Az elektrosztatikus erő és a vele kapcsolatos összefüggésének felismerése és formába öntése érdekében a tudósok számtalan kísérletet végeztek el, ám jelentős áttörés a XVIII. század végére Coulomb nevéhez fűződik [2].

Az első kísérletekhez egészen 1600-ig kell visszamennünk az időben, amikor William Gilbert, angol fizikus megadja a fűtrészecskékre ható villamos erő tapasztalati leírását a *De Magnete* című művében. Benjamin Franklin leírja az elektromos tüzek hatásait, majd Giovanni B. Beccaria foglalkozik a füstös gázok villamos kisüléseivel és az ionszél jelenségével. 1878-ban R. Nahnwold leírja annak a jelenségét, hogy egy feszültségre töltött tűske hatása a levegőben lévő por csoportba rendezését megnöveli. Első iparban levő próbálkozás 1885-ben Sir Oliver Lodge javaslatára történt egy ólomkohászati üzemben.

Laboratóriumi kísérletezések sokaságának elvégzése után a XX. század elején Cottrell és Möller közös tapasztalatait egyesítő szabadalom útján elindult az elektrofilterek gyártása is.

A XX.század második felében a kutatók arra figyeltek fel, hogy a leválasztó térben döntő jelentősége van a tértöltésnek, illetve felfigyeltek a leválasztás fokát erősen rontó ellenkorona jelenségre is.

1.2 Az elektrosztatikus porleválasztó előnyei-hátrányai

A berendezések általában közel 100%-os leválasztási fokkal üzemeltethetők, a hatásfok csekély csökkenése is a környezet porterheltségének jelentős emelkedéséhez vezethet, így a környezetszennyezés minimalizálása érdekében nagyon fontos a pontos tervezés, építés valamint karbantartás.

A működés egyik nagy hátránya, hogy a más elven működő berendezésekkel szemben, a tápláláshoz nagyfeszültségű tápegység kell, ami jelentős energiaszükséglettel jár [3].

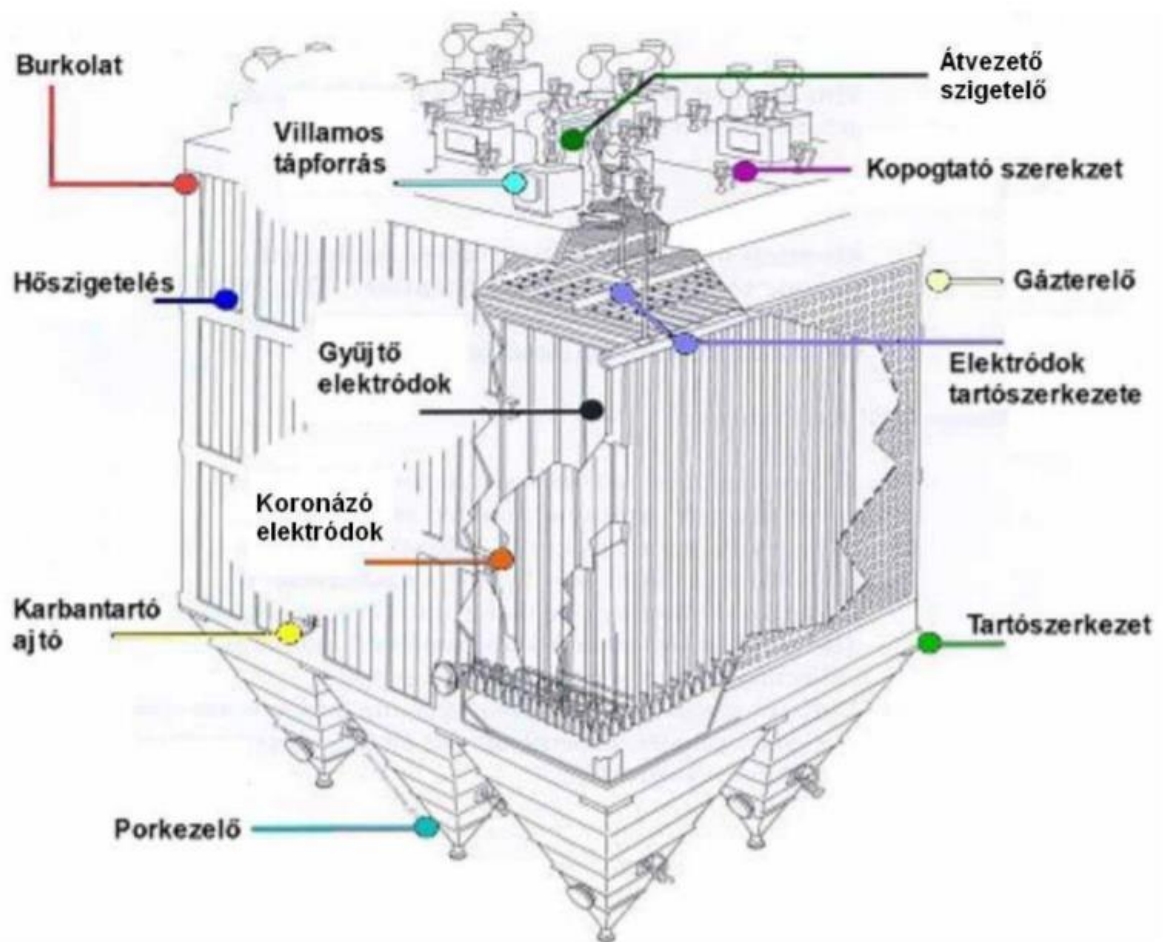
Hatalmas előnye viszont a magas leválasztási fok, ami más berendezésekkel nem érhető el, valamint az, hogy igen széles mérettartományra illetve szélsőséges körülmények közt is alkalmazható. Részletesebben kifejtve, az elektrosztatikus porleválasztók előnyei közé tartozik, hogy

- $0.01\ \mu\text{m}$ – $100\ \mu\text{m}$ nagyságrendig képes 99%-os leválasztási fokkal összegyűjteni a port,
- magas hőmérsékleten képes üzemelni (650°C -ig),
- nagy gáznyomás mellett üzemeltethető (10 Atmoszféra nyomásig),
- nagy áteresztőképességgel rendelkezik ($1500\ \text{m}^3/\text{s}$),
- nagy pormennyiséggel képes megbirkózni ($500\ \text{g}/\text{m}^3$) [4].

Fontos, hogy a berendezés folyamatosan üzemeljen, hiszen a magas beruházási költségek mellett (40M \$) az üzemeltetési költségei relatív alacsonyak. Jó és pontos tervezés és szabályozás kulcsfontosságú az üzemeltetés során.

1.3 A villamos porleválasztók elvi felépítése

Az 1. ábra Porleválasztó elvi felépítése [5] látható egy villamos porleválasztó elvi felépítése és főbb részei.



1. ábra Porleválasztó elvi felépítése [5]

A koronázó elektródok által töltések kerülnek a gázterbe, amelyek feltöltik az ott lévő részecskéket. A koronázó elektród és a földelt gyűjtőelektród között kialakuló, illetve a feltöltött részecskék által létrehozott tértöltés és a gyűjtő elektród között kialakuló térerősség a gyűjtőelektródok felé hajtja a feltöltött (por)részecskéket. A koronázó elektródok alakja, méretei eltérőek lehetnek, leggyakoribb kialakításuk: egyenes, kör keresztmetszetű huzal, spirális huzal, tüskés huzal, rögzített keretek. A nagyfeszültségű koronázó elektródok általában kerettel vannak rögzítve felülről, amelyen átvezető szigetelőkkel vezetik át az elektródot.

A villamos tápforrás a gázteret látja el töltésekkel, valamint ez szolgáltatja a megfelelő feszültséget a töltött részecskék leválasztását segítő térerősség létrehozásához. A megfelelő feszültség értéket úgy kell kiválasztani, hogy átütés ne történjen az elektródok között [6]. A porleválasztók villamos tápforrása alapvetően négy részből áll:

- automatikus feszültség szabályzó
- feszültségnövelő transzformátor
- nagyfeszültségű egyenirányító

- érzékelő

Általánosságban elmondható, hogy az iparban használt elektrosztatikus porleválasztók zömének működése 54-65 kV a feszültségtartományban van.

A gyűjtőelektródok feladata, hogy a feltöltött részecskéket összegyűjtsék, töltésüket elvezessék és a szemcséket magukon tartsák mindaddig, amíg valamilyen mechanikus módszerrel, pl. kopogtatással eltávolítják.

1.4 Működés közben előforduló jelenségek

1.4.1 Korrózió

Természetesen, mint a legtöbb eszköznél, a porleválasztók esetében is számolni kell a korróziós folyamatok kialakulásával, esetünkben a rozsdásodást lehet figyelembe venni. A folyamat a koronázó elektródokra lehet legnagyobb hatással, azonban villamos szempontból elegendő az elektródok végét vizsgálni, hiszen ott keletkeznek a koronakisülések. Az átütések erőhatást gyakorolnak az elektródok végére, ami miatt letörhet a tűskék vége, valamint kis keresztmetszeten kell kezdetben levezetniük a kialakuló nagy áramot, amely további roncsolást idézhet elő. A letört elektródvégek a koronakisülés intenzitását nagyban befolyásolhatják, hiszen kis távolságok esetén a görbületi sugarak méretei számottevő változást okoznak [7].

1.4.1 Porréteg megtelepedése

Nem megfelelő kopogtatás esetén a gyűjtő – de akár a korona - elektródokra tapadó porréteg túlságosan megvastagodhat.

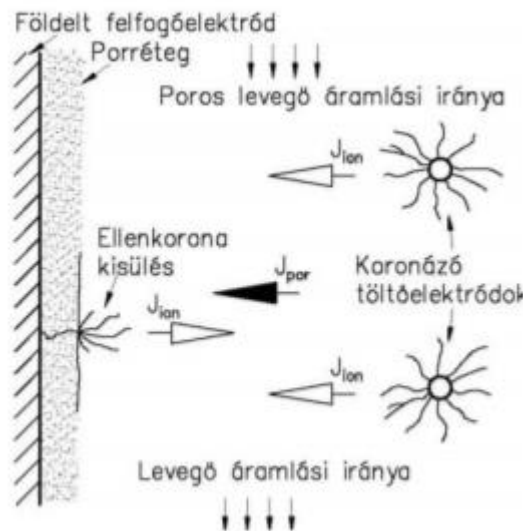
Ha a gyűjtőelektródára kis fajlagos ellenállású ($10^5 \Omega\text{m}$) porréteg tapad, a töltések rövid idő alatt áthatolnak a porrétegen, nem gyűlik össze a felszínen jelentős töltésmennyiség. A feszültség-áram karakterisztika hasonló az üres utcában mért eredményekhez.

A helyzet változik, amikor a porréteg fajlagos ellenállása nagyobb lesz ($10^8 \Omega\text{m}$). A töltés felhalmozódás számottevő, de a porrétegen belüli térerősség nem elég nagy ahhoz, hogy ellenkorona kisülést indítson el. Ilyen helyzetben megfigyelhető a koronaáram-elnyomás (korona-quenching). Ez az eset akkor fordul elő, ha a por viszonylag nagy vastagságú.

Nagyon nagy fajlagos ellenállás esetén ($10^{11} \Omega\text{m}$) a porrétegben képes nagyon nagy töltés felhalmozódni a vékony porréteg ellenére is, így a porrétegen belüli térerősség eléri azt az értéket, ami ellenkoronát hoz létre [8].

1.4.2 Ellenkorona kisülés

Nagy szigetelőképességű poroknál a töltések lassan tudnak eltávozni a szemcsék felületéről, így helyenként a felhalmozódó töltések akkora térerősséget hoznak létre, amely átüti a porrétetet. Ezt a jelenséget mutatja be az 2. ábra Ellenkorona kisülés jelensége:



2. ábra Ellenkorona kisülés jelensége

A jelenség kisebb fajlagos ellenállású por esetében is igaz, amennyiben elegendően nagy vastagságú por van jelen.

Az átütési pontok helyén koronakisülés jön létre, amelynek töltése ellentétes a koronázó elektród kisülésének előjelével. A leválasztási fokot amiatt rontja, mert a kisülések megjelenésével porrétet „robban” vissza a gázáramba, illetve létrejöhet pamatos kisülés majd teljes átütés is. Ha az átütési pontok száma megnövekszik, olyan mennyiségű pozitív töltés képes az áramlási térbe juttatni, amely erősen csökkenti a leválasztásban kulcsfontosságú negatív tértöltést [9].

1.4.3 Korona-quenching

Az elektrosztatikus porleválasztóba beáramló porszemcsék az ionfelhőbe érkezve elkezdnek töltődni. A töltött por villamos erőteret hoz létre. A corona-quenching jelenség ennek a jelenségnek köszönhető. A tértöltés miatt a porleválasztó berendezésekben megváltoznak az eredeti potenciálviszonyok, csökken a felületi térerősség értéke a koronaelektrodok végén, aminek következménye a koronaáram csökkenése. A portértöltés előjele megegyezik a koronaelektrod feszültségének előjelével. A corona-quenching rontja a porleválasztás hatásosságát.

A jelenséget ismerjük, azonban rendkívül nehéz modellezni laboratóriumi körülmények között, illetve a pontos mérése sem egyszerű. Gyakori eset, hogy az áram-feszültség karakterisztikából próbálunk következtetni a tértöltés értékére.

2 Elektrosztatikai porjellemzők

Az anyagok alapvető villamos tulajdonságainak meghatározásához a következő fizikai mennyiségek ismerete szükséges [10].

- fajlagos térfogati villamos ellenállás [ρ],
- fajlagos felületi villamos ellenállás [ρ_f],
- relatív permittivitás [ϵ_r],
- töltéscsökkenési időállandó [τ],
- veszteségi tényező [$\tan\delta$].

A hagyományos elektrosztatika szerint a töltéscsökkenési időállandó és a veszteségi tényező elhanyagolható a többi paraméterhez képest, így azokkal nem kell foglalkozni (esetünkben). A fajlagos felületi ellenállás poranyagok esetében nem jól definiált, hiszen ezt szilárd és folyékony anyagok esetében lehet elsősorban meghatározni, így poranyagok esetében a fajlagos térfogati ellenállást szokás vizsgálni. Azonban ez az érték is további paraméterek függvénye, hiszen a páratartalom (nedvesség), hőmérséklet, porszemcsék nagysága, tömörsége, szemcsék közti beszorult levegő is mind meghatározó paramétere lehet a fajlagos ellenállásnak.

2.1 Fajlagos térfogati ellenállás

Fajlagos térfogati ellenállások alapján az anyagokat 3 főbb csoportba szokás sorolni:

- villamos szempontból vezető ($<10^3 \Omega\text{m}$)
- disszipatív ($10^3 \Omega\text{m} \leq \rho < 10^6 \Omega\text{m}$)
- szigetelő ($10^6 \Omega\text{m} \leq \rho$)

Elektrosztatikai szempontból a disszipatív és villamos szempontból vezető anyagok egységesen vezető anyagnak minősülnek.

Ahogy a porjellemzők méréseinél is jeleztem, a pormérések rendkívül érzékenyek a környezeti paraméterektől, emiatt nagyon fontos a por lehető legpontosabb előkészítése. Tömörítés segítségével a porszemcsék felülete szorosabban érintkezik, valamint a szemcsék közötti légrés csökkenthető (ideális esetben megszüntethető). Az anyagjellemzők mért értéke így kevesebb parazitaként megjelenő additív tagot tartalmaz [11]. Porméréssel igazából nem tudom elkülöníteni a felületi illetve térfogati ellenállást, mérni csak a kettő eredőjét tudom. úgy

kezeljük a továbbiakban, mintha csak a térfogati ellenállást vizsgáljuk (tudván, hogy valamekkora hiba van így az elméleti térfogati ellenálláshoz képest).

A fajlagos térfogati ellenállás (ρ) megegyezik közel homogén térerősség esetén az elektródok közötti E villamos térerősség és J áramsűrűség hányadosaként.

Az Ωm -ben kifejezett fajlagos ellenállás értéke definíció szerint az 1 m hosszú és 1 m^2 keresztmetszetű vezető Ω -ban megadott ellenállását jelenti [12].

Különböző anyagok elektrosztatikai viselkedését nagyban tudja befolyásolni a fajlagos térfogati ellenállásuk. A porok szigeteléstechikai vizsgálatára igen kevés utalás szerepel a szakirodalmakban. A fő oka és nehézsége abban rejlik, hogy nagyon nehéz – szinte lehetetlen – reprodukálni egy-egy mérési eredményt, annak ellenére, hogy a fajlagos ellenállásnak nagyon fontos szerepe van az elektrosztatikus feltöltődések során. Ez amiatt szembetűnő, mert a témával foglalkozó szakemberek megállapítása szerint a porok elektrosztatikus viselkedését, tapadását, csomósodását döntően befolyásolja a porok fajlagos térfogati ellenállása. A felhasználó cégek gyakran saját mérési módszerüket, eredményeiket használják más szintén saját mérési eredmények összehasonlíthatósága gyanánt [13].

2.2 Portöltődés

A porszemcsék feltöltődésekor kettő nagyon fontos paramétert kell vizsgálni, a porszemcsék telítési töltését és a szemcse felületén a töltések változását időfüggvényében a telítési töltés eléréséig. Számos modell feltételezi, hogy a leválasztandó szemcsék gömb alakúak, és ez alapján határozzák meg a fenti paramétereket. Ez nyilván nem pontos meghatározás, de egyszerűsége miatt elterjedt a gyakorlatban. Későbbi években kifejlesztettek olyan modelleket, amely képes számolni forgásellipszoidra (pontosabb leírás diffúziós töltődésre).

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

$$Qt = \frac{12 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot E \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\epsilon_r + 2} \quad (1)$$

és a telítési töltődés folyamatának leírására a (2) képletet:

$$Q(t) = Qt \frac{t}{t + \tau} \quad (2)$$

$$\text{ahol } \tau = \frac{4 \cdot \epsilon_0}{\rho_i \cdot \mu_i}$$

Az egyenletekben szereplő jelölések:

- Q_t telítési töltés
- r porszemcse sugara
- E villamos térerősség
- ϵ_0 vákuum permittivitás
- ϵ_r relatív permittivitás
- μ_i ionmozgékonyosság
- ρ_i iontöltéssűrűség
- τ töltéscsökkenési időállandó [9].

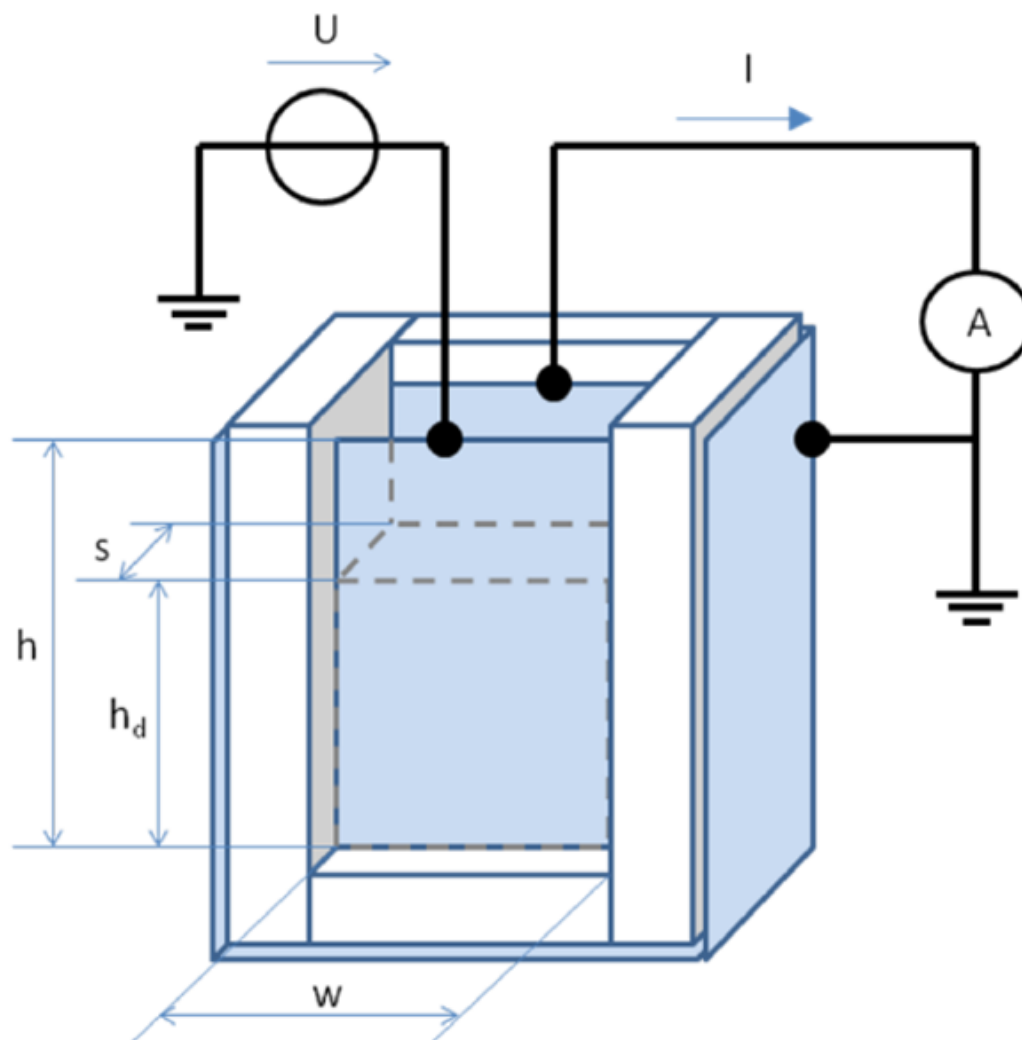
A felhalmozódik a töltés a porszemcséken, és nagy mennyiségben (bizonyos határt elérve) képes az eredeti térerősség komponenseket megváltoztatni, elnyomni, rontva ezzel a leválasztási fokot (korona-quenching).

3 Mérési elrendezések

3.1 Fajlagos térfogati ellenállás meghatározása

A minél jobb reprodukálhatóságot figyelembe véve a mérések során igyekeztünk ugyanolyan körülményeket teremteni minden mérés előtt, egy pormérésre alkalmas szonda segítségével.

A 3. ábra Mérési elrendezés a portulajdonságok vizsgálatára [14] mutatja a porjellemzők térfogati ellenállására alkalmas mérési elrendezést.



3. ábra Mérési elrendezés a portulajdonságok vizsgálatára [14]

ahol a jelölések az alábbiak:

- s a két elektród távolsága
- h a két elektród magassága
- w a két elektród szélessége
- h_d a por magassága a szondában

A jelölések alapján az alábbi fizikai és villamos jellemzők határozhatók meg közvetlenül:

- $A = h_d \cdot w$ a por felülete [cm^2],
- $R = \frac{U}{I}$ a por ellenállása [Ω].

Az elektródákban a por által betelített keresztmetszet 5700 mm^2 , az elektródok anyaga rozsdamentes acél, amely teflon keretbe van beillesztve. A teflon jó szigetelő képességének köszönhetően, az elektródok között levő porok tulajdonságainak meghatározásakor a keret villamos tulajdonságai nem okoznak jelentős hibát, valamint a külső elektromágneses jelektől egy árnyékoló fémelektród véd, amely körül öleli a teflonházat.

Az R ellenállást meghatározva, valamint a fémelektródok közötti távolság és a keresztmetszetük ismeretében meghatározható a por fajlagos ellenállása az alábbi képlet segítségével:

$$\rho = \frac{R \cdot A}{s} [\Omega \text{m}], \text{ ahol} \quad (3)$$

- R [Ω] az elektródok közötti mért ellenállás
- A [m^2] az elektródok felülete,
- s [m] az elektródok távolsága.

R ellenállásának meghatározásához az egyik elektródra (lemez) feszültséget kapcsolunk, majd a mért ellenállást meghatározott időközönként leolvassuk. A módszert áramválasz mérési eljárásnak is szokták nevezni [15]. A feszültséget és megfelelő időt a Nagyfeszültségű Laboratóriumban levő Metrel műszer segítségével történt, amely eszközön beállítottuk a megfelelő feszültségérték kiadását (250 V vagy 500 V), illetve 1 perces vizsgálati időtartamot.

A mérések során fontos, hogy a porok tömörsége is azonos (közel azonos) legyen, így összehasonlítható a mérési eredmények. Ennek ellenőrzésére folyamatosan mértük a szonda porral töltött súlyát, és addig tömörítettük a port adott térfogatot tartva, amíg meg nem egyeztek a korábbi mérések súlytömegével.

3.2 Relatív permittivitás meghatározása

Relatív permittivitás meghatározásánál a mérési elrendezés hasonló a fajlagos térfogati ellenállás méréseinél. Közvetlenül nem tudjuk megmérni a relatív permittivitás, de ismert az alábbi képlet, amely szerint:

$$\epsilon_r = \frac{C \cdot s}{\epsilon_0 \cdot A}, \text{ relatív permittivitás, ahol}$$

- ϵ_r relatív permittivitás,
- C elektródok közti kapacitás [F],
- s elektródok közötti távolság [m],
- ϵ_0 vákuum permittivitás, $[\frac{F}{m}]$
- A elektródok felülete [m^2].

A villamos paramétereket kézi mérőműszer segítségével tudtuk meghatározni. A kapacitás méréssel párhuzamosan végeztünk veszteségi tényező mérést is. A veszteségi tényező az ellenállás és kapacitáson keresztüli áram arányát adja meg:

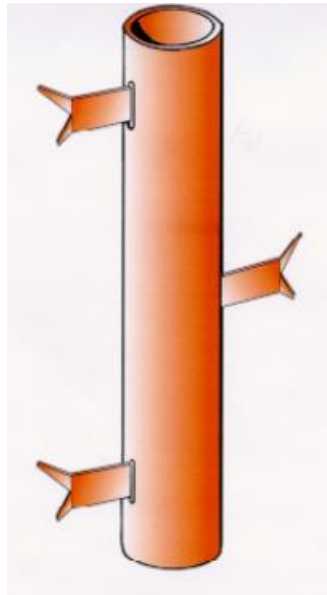
$$D = \frac{I_r}{I_c} \quad (4)$$

D értékének változtatási is mutatja, hogy az elektródok közti poranyag vezetőképessége hogyan változik.

3.3 Tű-sík elektród elrendezés

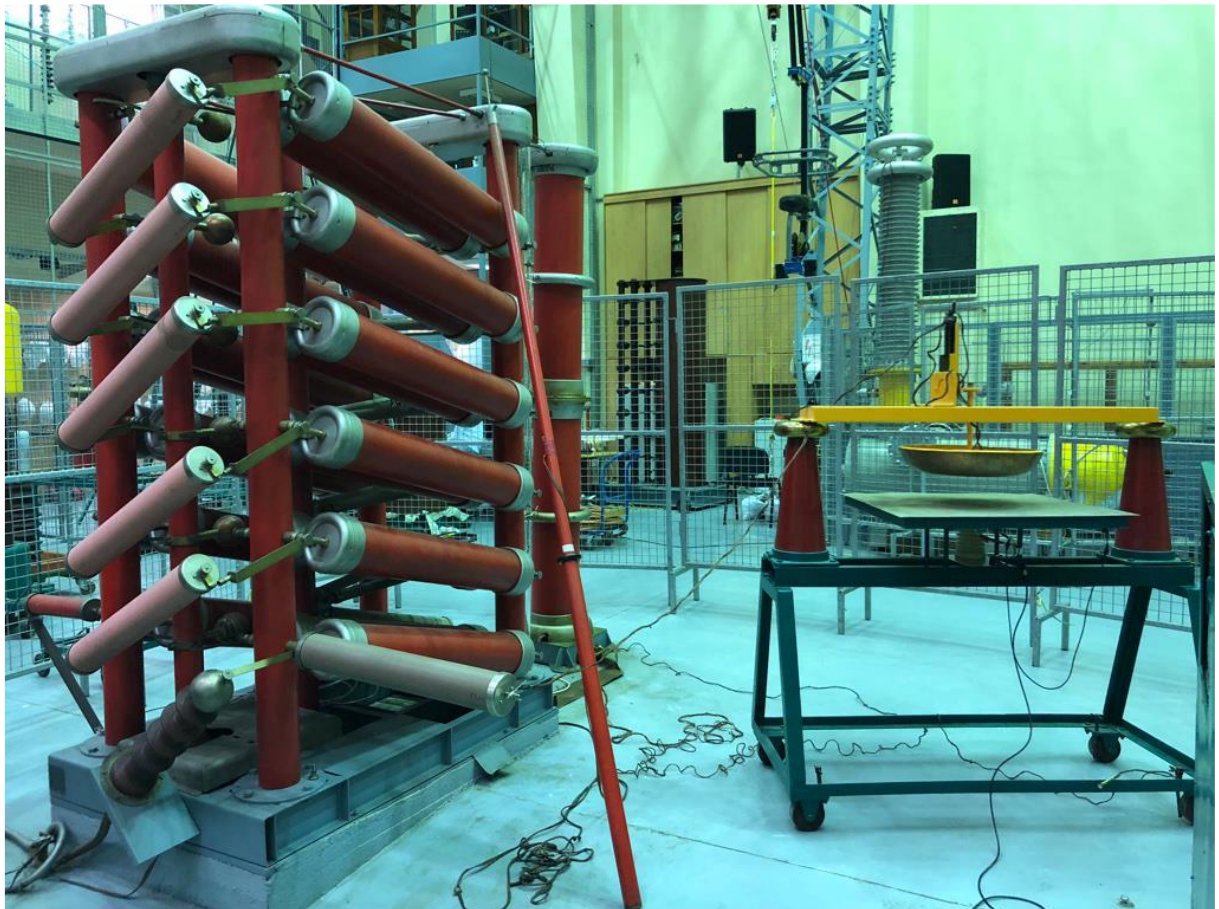
A mérések a Nagyfeszültségű Laboratóriumban történtek, a 750 kV-os lökésgerjesztő tápforrása, Rogowsky-elektrod, tű, ellenállások, fémlemez és védődiódák segítségével.

Tű sík elektród segítségével modellezhetünk egy porleválasztó elektródot lokálisan. Ha pontosabban megvizsgálunk egy porleválasztó elektródot, láthatjuk, hogy az elektródok végein tűskék vannak, mely segítik a koronakisülés kialakulását. Erre az elrendezésre látható egy példa a 4. ábra Elektrosztatikus porleválasztó elektród.



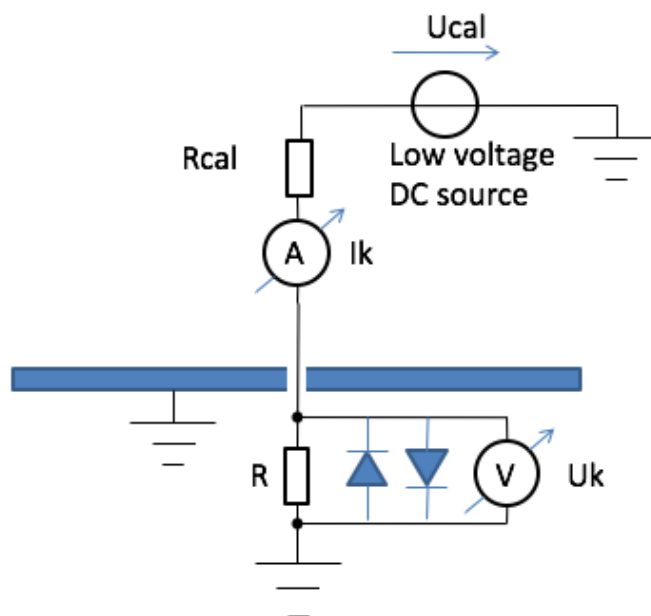
4. ábra Elektrosztatikus porleválasztó elektród[16]

Mivel a tüskék torzítják a teret olyan mértékben, hogy a koronakisülések létrejöjjenek, az elektród többi része (többi tüske kivételével) villamos szempontból nem számít a kisülések kialakulásában. Emiatt modellezhető egy tüske úgy, mint egy homogén teret torzító tű.



5. ábra Tű-sík elektród mérési elrendezés

A nagy egyenfeszültséget a 750 kV-os lökésgerjesztő tápforrása biztosította. Az állítható feszültségértéket toroid transzformátor segítségével oldottuk meg. Rogowsky-elektrod használatával kezdetben közel homogén térerősséget hozunk létre, ezzel kiváltva az elméletben 2 db végtelen hosszú sík lemez között kialakuló homogén térerősséget. Teljesen homogén térerősséget a lemez felületi egyenlőtlenségei illetve a ráakódó szennyeződések miatt nem lehet létrehozni, bár a közelítés így is igaz marad. Az alsó elektrod egy általunk szabályozható magasságú és lekerekítettségű fém tű, ami át van vezetve egy ellenálláson keresztül a földelt fém sík lemez közepén található lyukon. A tű merőleges a fémlemez síkjára, illetve párhuzamos a homogén erőterrel. A tű a körülötte lévő sík elrendezéséből kiáll, így megváltoztatva az elektromos térerősség homogenitását (a tű hegyén nagy térerősség torzulás jön létre). A Rogowsky-elektrod és földelt fémlemez között 10 cm távolságot állítottunk be.



6. ábra Feszültségmérés elvi rajza[17]

A fémtűvel sorosan egy általunk kiválasztott ellenállás csatlakozik, amelyen a koronakisülésből származó áram feszültséget ejt. A feszültség mérésére digitális multimétert alkalmazunk. Az ellenállással párhuzamosan egymással ellentétes irányú feszültségkorlátozó diódákat kapcsoltunk, hogy túlfeszültségtől és tönkremeneteltől megvédjük a feszültségmérő műszereinket, ahogy ezt a 6. ábra mutatja. A kialakításnak köszönhetően polaritástól függetlenül fellép ez a feszültségkorlát.

Az ellenállás meghatározására két szempontot kellett figyelembe venni. Egyrészt ne legyen olyan kicsi, hogy túl nagy feszültség keletkezzen a multiméter kapcsain, másrészt ne legyen olyan nagy, hogy a koronaáramok értékeit pontatlanul mérjük és ne okozzon számításba

vehető feszültségosztást az oszcilloszkóp belső ellenállásához képest. A kiválasztott ellenállás értékét $1500\ \Omega$ -ra választottuk.

4 Mérési eredmények

4.1 Dielektromos jellemzők

Az eltérő portulajdonságok és az iparban használt körülmények miatt a portulajdonságokat kemencés szárítás, felforrósítás közben mértük. Szükséges igen nagy hőmérsékleti tartományt vizsgálni, hiszen az iparban is különböző hőmérsékleten üzemelnek a porleválasztó berendezések.

Az öregítő kemencében kétfajta módon vizsgáltuk a villamos tulajdonságokat (amely pontosabban részletezve lesz a folytatásban), egyrészt szárítással a kiszáradt por jellemzőinek vizsgálatához, másrészt víz adagolásával megoldható a páratartalom növelése, azaz a poranyag nedvesítése. Ez a fajta vizsgálatra a jövőben is nagy hangsúlyt kell fektetni, mert a páratartalom növelésével megnő az átütési feszültség értéke, valamint teljesen más portulajdonságok alakulnak ki elektrosztatikai szempontból.

A kemencés szárítás előtt megmértük a szonda tömegét, amelynek értéke 593.386 g volt. Szárítás közben naponta megmértük a tömeget, hogy megtudjuk mennyit víz párolgott ki a poranyagból. Körülbelül 2 napra volt szükség, hogy a por teljesen kiszáradtnak lehessen venni, mert a megelőző és követő mérésen a tömegük különbsége néhány ezred grammnyi volt csupán.

A vizsgálat két különböző feszültségszinten, 1 KHz frekvencián és 1 perces feszültségtartás mellett történt. R1 jelöléssel a 250 V-os gerjesztésen mért ellenállást, R2 esetében az 500 V-os gerjesztésen mért ellenállás értékét értjük. Az első táblázat mutatja a száraz por vizsgálati eredményeit, míg a második táblázat a nedves por vizsgálati eredményeit:

T[°C]	R1 [MΩ]	R2 [MΩ]	C [pF]	D [Ir/Ic]
105	1780	1600	35.9	0.0888
120	1000	908	36	0.125
135	540	491	37	0.184
150	278	255	40.8	0.252
165	132	104	44.8	0.3525
180	50	42.4	51.8	0.5157
195	21.6	18.7	62.8	0.7083
210	10.6	9.02	78.5	0.9082
225	5.11	4.23	104	1.138
240	2.76	2.29	140.5	1.278

1. Táblázat Száraz por jellemzői

T [°C]	R1 [MΩ]	R2 [MΩ]	C [pF]	D [Ir/Ic]
105	61.8	52.8	42.6	0.3093
120	33.5	29.8	49.9	0.4945
135	22.2	19.7	54.6	0.6043
150	18.9	17.7	58.2	0.656
165	13.6	11.5	63	0.7859
180	6.34	5.47	79.6	1.095
195	3.99	3.43	96.9	1.305
210	2.56	2.23	116	1.472
225	1.73	1.51	158.1	1.517
240	1.03	0.892	219.3	1.559

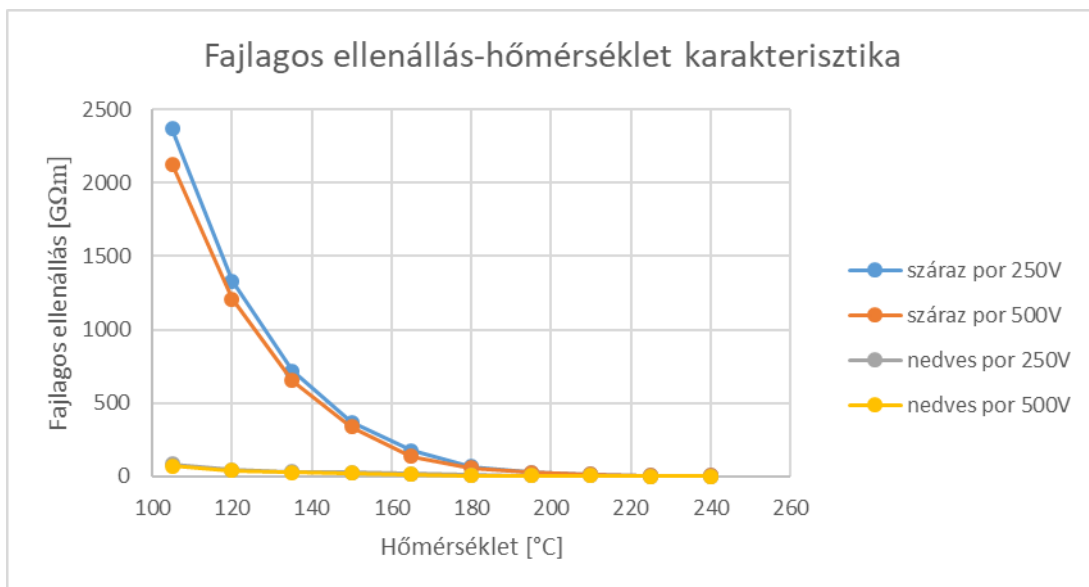
2. Táblázat Nedves por jellemzői

mely esetben, a táblázatban szereplő paraméterek:

- T : por hőmérséklete,
- R1, R2: por ellenállása 250 illetve 500V-os mérőfeszültségen,
- C : a két elektród között fellépő kapacitás
- D : a veszteségi tényező

A tű-sík elektród elrendezésben elsősorban a leválasztás hatékonyságát vizsgáljuk. Ezt természetesen befolyásolják a portulajdonságok, amelyek közül itt a legmeghatározóbb tényező a porjellemzők közül, a por ellenállása. Ugyanis a por ellenállástól is függ a töltések felhalmozódása, elszívárgása valamint az ebből következő egyéb jelenségek, mint például a korona-quenching jelenség, amely rontja a leválasztási fokot.

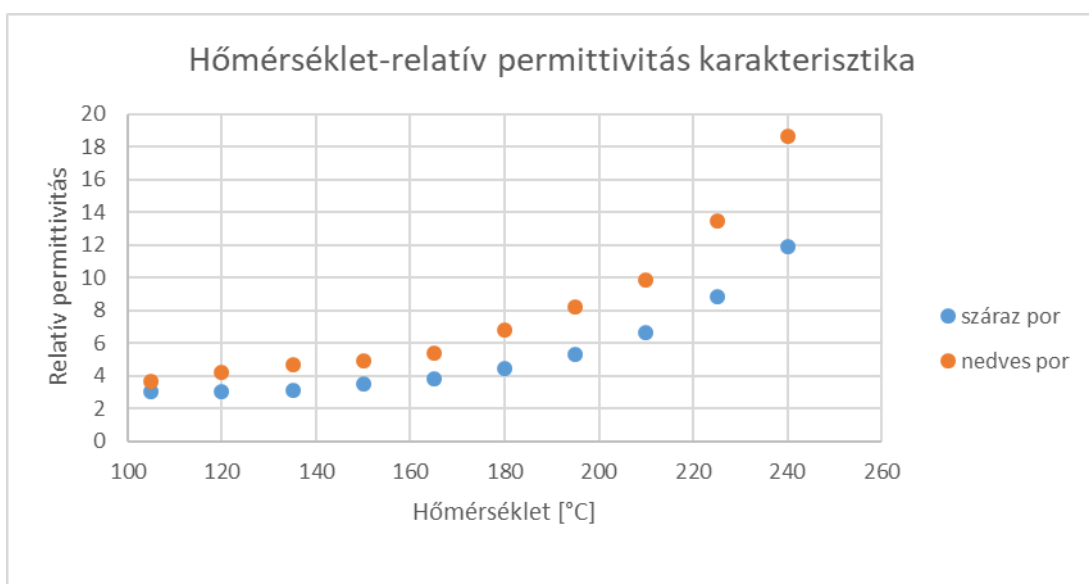
A 7. ábra Porellenállás-hőmérséklet karakterisztika jeleníti meg az ellenállás hőmérséklet függvényét.



7. ábra Porellenállás-hőmérséklet karakterisztika

A diagrammból jól látszik, hogy alacsony hőmérsékleten a por fajlagos ellenállása többszöröse a magasabb hőmérsékleten mért értékekhez képest. A porleválasztók zöme a 150-240°C közötti tartományban üzemel, azonban látszik az ábráról, hogy a berendezés tervezésekor figyelembe kell venni, hogy néhány fokok hőmérséklet különbség is teljesen más villamos paramétereket eredményezhet, elsősorban száraz porleválasztók esetében.

Páratartalom növelés esetében a por fajlagos ellenállása nagyságrenddel kisebb a 100°C fok környéki hőmérsékleten, amely a töltések jobb mozgását eredményezheti.



8. ábra Relatív permittivitás – hőmérséklet karakterisztika

A relatív permittivitás az (1) képlet szerint a telítési töltéssel van nagy hangsúlyban. Esetünkben azért nagyon fontos villamos paraméter, mert a porszemcsék feltöltődése hatással

van a por által kialakított tértöltésre, amely gátolhatja a porszemcsék gyűjtőelektród felé történő mozgásában. A permittivitás-hőmérséklet karakterisztikából látszik, hogy a hőmérséklet növelésével a permittivitás exponenciális jelleggel nő, azaz nagyobb hőmérsékleten több töltést tud „benyelni” egy-egy porszemcse. Jelentős különbség száraz por és nedves por között nem lép fel.

4.2 Koronaáram-feszültség karakterisztika

Minden előtt hangsúlyozni szeretném, hogy a koronakisülésekből származó áram mérésnél, fizikailag nem lehetett megoldani, hogy a kemencén belül adott hőmérsékleten történjen a pormérés, emiatt szükség volt kivenni a mintaanyagokat és átvinni a mérésre alkalmas helyre. Ez minden esetben körülbelül 1 percet vett igénybe, amely során a por hűlni kezdett.

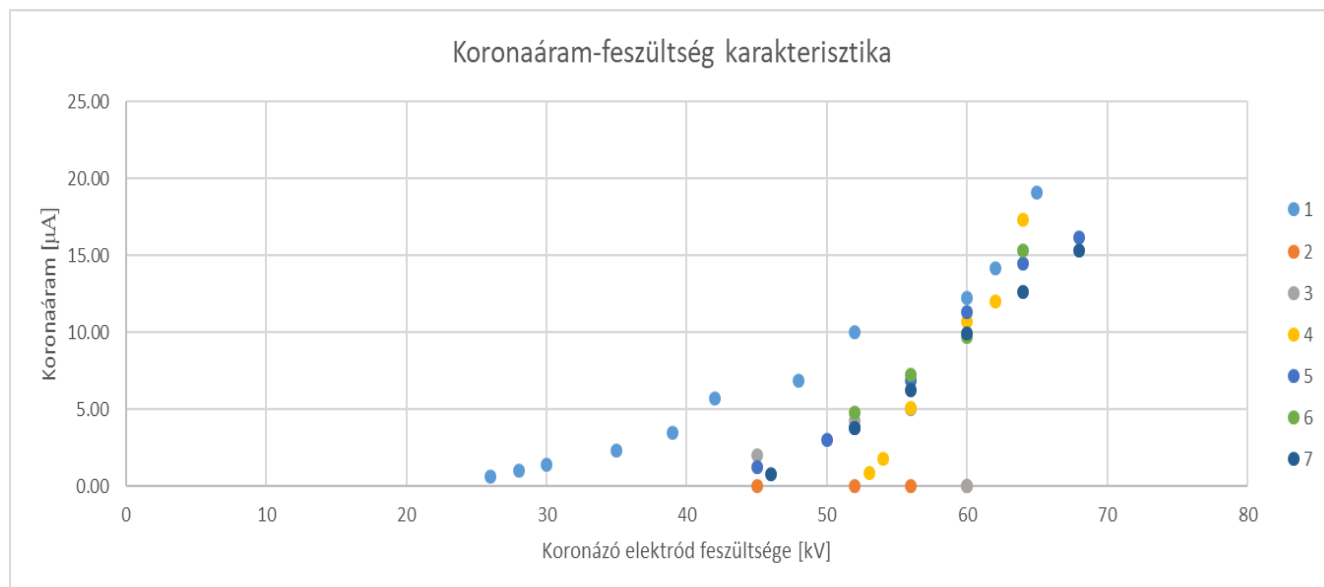
A mérések során több különböző esetet vettünk figyelembe, többek között a száraz forró por, nedves forró por illetve szobahőmérsékletű kezeletlen por használatát. Referencia mérésként por nélküli elrendezésben vizsgáltuk az átütési feszültséget, illetve az előtte kialakuló koronaáramok értékeit. A por nélküli elektród esetében vizsgálhatnánk az üresen járó porleválasztó áram karakterisztikáját, de mivel a gyakorlatban nem jellemző ez az állapot, így csak ellenőrzésként használtuk fel (porral fedett tű nagyobb átütési feszültségen vagy kisebb koronaáramok mellett üssön át).

A koronázó elektrodok feszültségét folyamatosan növeltük 2-5 kV-ként, és lejegyeztük az ellenálláson eső koronafeszültség értékét, magába foglalva a gyújtási feszültség értéket valamint az átütés pillanatában fellépő feszültség értékét. A koronaáram értékét az ellenállás és rajta ejtett feszültség értékéből az Ohm-törvény segítségével határozható meg,

$$I = \frac{U}{R}, \text{ ahol} \quad (5)$$

- I [A] meghatározandó koronaáram értéke,
- U [V] ellenálláson eső feszültség,
- R [Ω] az ellenállás, amely értéke 1500 Ω minden esetben.

A koronaáram-feszültség karakterisztikát több különböző porminta állapotban vizsgáltuk, ahogy ez a 9. ábra Koronaáram-feszültség karakterisztika látszik:



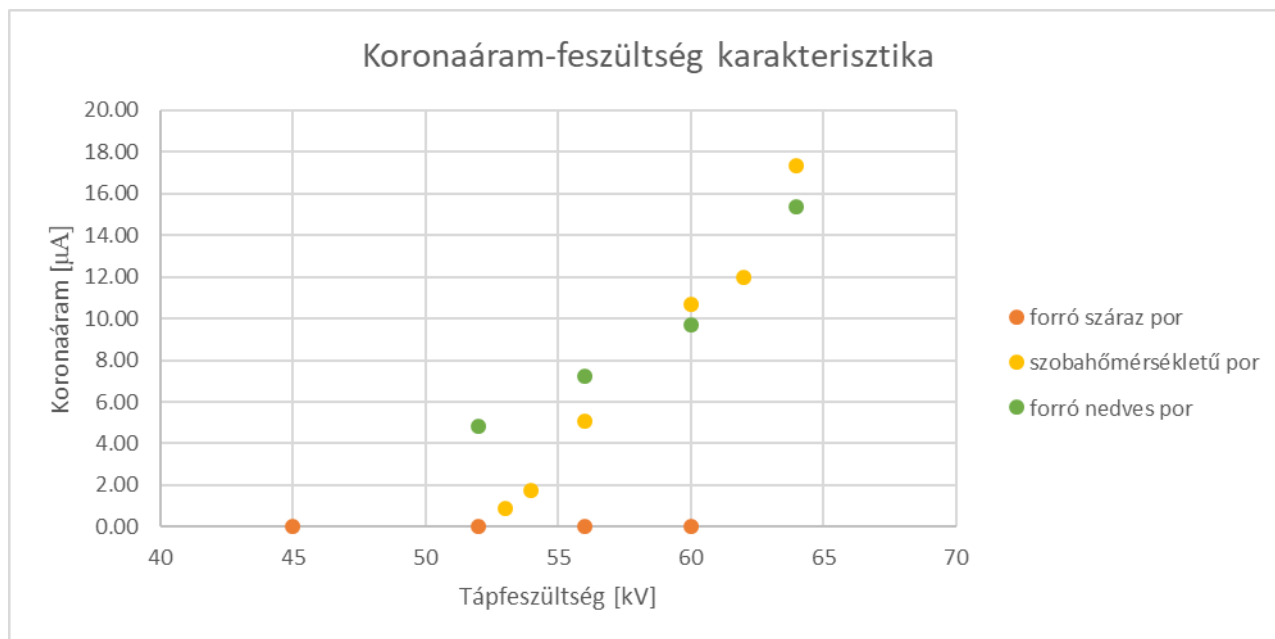
9. ábra Koronaáram-feszültség karakterisztika

ahol a számok az alábbi jelölést takarják:

1. por nélküli állapot
2. száraz forró por 1. mérés
3. száraz forró por 2. mérés
4. szobahőmérsékletű por
5. szobahőmérsékletű nedves por
6. forró nedves por 1. mérés
7. forró nedves por 2. mérés

A kutatás kettő legfontosabb esete a száraz forró por és a nedves forró por közti különbség, hiszen valós körülmények között a berendezések 150-250°C között üzemel, általában száraz üzemállapotban. A leválasztási fok javítása érdekében párasítás mellett is gondolkodnak a tulajdonosok, amelyet a laboratóriumi mérések során legpontosabban a nedves forró por esetéhez hasonlít. A fontos állapotokat szem előtt tartva készítettünk több mérést is e két releváns állapotról, ahogy az az ábrán is látszik.

Némiképp egyszerűsítve az ábrán, az alábbi karakterisztikákat érdemes kiemelni:



10. ábra Összehasonlításhoz szükséges legfontosabb áram-feszültség karakterisztikák

A méréseket 0 feszültségről növeltük kezdetben a gyújtófeszültségig, majd fokozatosan nagyobbra, a koronaáramok leolvasása mellett. A gyújtófeszültség után a térerősség akkora volt, hogy az ionszél elkezdte lassan a tűelektródról és körülötte a porszemcséket lebegtetni, majd „kifújni” a Rogowsky-elektrod és fémlemez közül.

Száraz por esetén az a megfigyelés történt, hogy nincs koronaáram érték, majd egy bizonyos feszültséget elérve rögtön átütés történt. Ezt a jelenséget azzal tudom magyarázni, hogy a por fajlagos ellenállása akkor volt, mint egy nagyon jó szigetelőanyag, a töltések megmaradtak a por felületén és nem engedte a koronakisülések kialakulását. Amikor átütés történt, az a sejtésem, hogy az ionszél a tű tetejéről „lefújta” a port, így a szabadon maradó hegyes tűvégen semmi sem gátolta a koronakisülés majd átütés létrejöttét, hiszen a feszültség már elérte az átütéshez szükséges feszültség értéket.

Szobahőmérsékletű port a gyakorlatban nem igazán használnak, összehasonlításképpen tettem bele a karakterisztikába. Szobahőmérséklet esetén a por magába szívja a környezete páratartalmát, amely a Nagyfeszültségű Laboratóriumban 48 % volt.

Forró nedves por esetén a karakterisztika nagyobb hőmérsékleten közelít a szobahőmérsékletű por mérési pontjait, a különbség elsősorban alacsonyabb hőmérsékleten látható. A gyújtófeszültséget elérvén a töltések megindulnak a poron keresztül, és mint ahogy a 4.1 fejezetben kifejtve láthattuk, a por fajlagos ellenállása kisebb nagyobb hőmérséklet esetén, emiatt nagyobb koronaáram értékeket mértünk. Nagyon jól megfigyelhető az is, hogy a

hőmérsékletnövekedés miatti permittivitás növekedés nehezíti a térerősség és vele együtt járó áramok növekedését is, amelynek köszönhetően egy „kevésbé meredek” görbét kaptunk.

5 Összegzés

A bemutatott kutatás célja, hogy a por dielektromos tulajdonságainak milyen hatása van az elektrosztatikus porleválasztók működés közbeni állapotára, illetve a leválasztás hatékonyságára. Különbséget tettünk száraz és nedves por jellemzői között, amelynek oka az volt, hogy az iparban is lehetséges nedvesítéssel javítani a leválasztási fokon.

A laboratóriumi mérések során az iparban meglevő hőmérsékleti körülményeket kemencékkel sikerült szimulálni. A koronakisülést tű segítségével sikerült létrehozni, belátva azt, hogy koronakisülések az elektródok végén tudnak kialakulni.

Az eredményekből jól látszik a fajlagos ellenállás hőmérsékletfüggése, amelyből leolvasható, hogy a technológia váltás vagy a por változtatása drasztikus hatást idézhet elő a későbbi működések során, és nagyon alacsony leválasztást is produkálhat. A por telítődési töltése arányos a relatív permittivitással. A relatív permittivitás a hőmérséklet növekedésével exponenciális jelleggel növekedik, azaz egyre több és több töltés képes megmaradni a porszemcséken, így képezve egy elektromos teret maga körül. A porszemcsék elektromos tere egy tértöltéses tartományt hoz létre a koronaelektrod és gyűjtőelektrod között, amely megváltoztatja az eredeti térerősségviszonyokat, így megnehezíti a tű végén kialakuló koronakisülés létrejöttét. Egy jól megtervezett berendezés adott technológiára és adott porjellemzők esetén üzemel úgy, ahogy azt eredetileg tervezik.

Egy rosszabb leválasztási fokkal rendelkező elektrosztatikus porleválasztóban az eredmények alapján érdemes lehet nedvesítést alkalmazni, amely a dielektromos jellemzők változtatásán keresztül javíthatja a leválasztás hatékonyságát.

A téma és a vele járó ipari alkalmazhatóság felkeltette érdeklődésemet, és a jövőben szeretném folytatni kutatásaimat e téren. Céljaim között van egy pontosabb mérési elrendezés kialakítása, amely segítségével pontosabb környezeti feltételekkel tudnék koronakisüléseket vizsgálni, valamint tovább kutatnék a témában, modelleznék és mérnék lerakódott porréteg hatását elektrosztatikus porleválasztó berendezés leválasztási fok javítása érdekében.

Köszönetnyilvánítás

Dolgozatom végére érvén szeretném megköszönni konzulenseim, Dr. Kiss István és Dr. Tamus Ádámnak a kutatási időszakom alatt nyújtott színvonalas támogatást és segítséget, Dr. Németh Bálintnak a BME Nagyfeszültségű Laboratórium vezetőjének, hogy rendelkezésre bocsátotta a kutatásomhoz szükséges eszközöket.

Köszönöm továbbá a Laboratórium technikusának, Murányi Istvánnak, hogy a mérések során jelenlétével felügyelt, és ha elakadtam, hasznos tanácsaival sikerült megoldanom a helyzeteket.

Szeretném továbbá megköszönni barátnőmnek, Romhányi Viktóriának, és családom türelmét és támogatását, amelynek köszönhetően és vele járó jó lelkiállapot mellett sokkal könnyebb volt megírni a dolgozatom.

Ábrajegyzék

1. ábra Porleválasztó elvi felépítése [16].....	8
2. ábra Ellenkorona kisülés jelensége.....	10
3. ábra Mérési elrendezés a portulajdonságok vizsgálatára[7]	15
4. ábra Elektrosztatikus porleválasztó elektród	18
5. ábra Mérési elrendezés elvi rajza	19
6. ábra Porellenállás-hőmérséklet karakterisztika	23
7. ábra Relatív permittivitás – hőmérséklet karakterisztika	23
8. ábra Koronaáram-feszültség karakterisztika	25
9. ábra Összehasonlításhoz szükséges legfontosabb áram-feszültség karakterisztika.....	26

Irodalomjegyzék

- [1] Leith, D.: History of electrical precipitator
- [2] Holics, L.: *Fizika*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1986, pp.501-518
- [3] Yamamoto, T.: *Some Aspects of Efficiency Theory for Electrostatic Precipitators*, 2nd Int. Conf on ESP, Kyoto, 1984
- [4] Barbarics, T.: *A villamos erőter meghatározása a tértöltések figyelembevételével*, Ph.D értekezés, Budapest, 2002
- [5] Balog E.: *Elektrosztatikus eredetű veszélyek kezelése, értékelése*, Doktori értekezés, Budapest, 2004
- [6] Csernátorny-Hoffer A. – Horváth T.: *Nagyfeszültségű technika*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1968
- [7] Tibor Horváth.: *Villámcsapások valószínűségének meghatározása elméleti úton*, Budapest, 1972
- [8] Kiss I., Székely L., Cselkó R., Berta I.: *Current-voltage Characteristic of Corona Discharge in a Needle Penetrating a Rogowski-Plate Arrangement*, IAS Annual Meeting 2019
- [9] Kiss I.: *Elektrosztatikus porleválasztó berendezések újszerű modellezése*, Doktori értekezés, Budapest, 2004.
- [10] Horváth T – Berta I.: *Static Elimination*, Research Studies Press (John Wiley and Sons Ltd.) Chichester, 1982
- [11] Montes, J.M. – Cuevas, F.G. – Ternero, F. – Astacio, R. – Caballero, E. S. – Cintas, J.: *A Method to Determine the Electrical Resistance of a Mettalic Powder Mass under Compression*, Metals 2017
- [12] Budó Ágoston: *Kísérleti fizika II.*, Budapest, Tankönyvkiadó, 1971
- [13] Celzard, Alain - Marêché, Jean-François - Payot, F.- Furdin, G - *Electrical conductivity of carbonaceous powders*. VL - 40 DO - 10.1016/S0008-6223(02)00196-3 JO - Carbon ER -
- [14] Kiss I., Iváncsy T., Németh B., Berta I.: *Some aspects of the reliability of ESP modelling*, Department of Electric Power Engineerint, Budapest 2019
- [15] Németh E.: *A műszaki gyakorlatban szigetelések vizsgálatára alkalmazható villamos jellemzők kapcsolata az alapvető dielektromos folyamatokkal*, Kanditátusi értekezés, 1974
- [16] Porle K.: *ESP Design and Industrial Applications*, ICESPXIII, India

- [17] Samat A.: *Examination of Lightning Protection Solutions of Renewable Energy Sources*, BSc Thesis, Budapest 2018