



## Villamos gáztisztítók – Mit hoz a jövő?

2013. december 5-én került sor az Energetikai Szakkollégium Jendrassik György emlékfélévének 7. előadására, melyben Dr. Kiss István Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem docense, a Villamos Energetika Tanszék vezetője beszámolt az elektrosztatikus porleválasztók fejlesztésének, alkalmazásának jelenlegi trendjeiről. Előadónk jelenleg is aktívan kutatja a területet, szeptember közepén pedig a világ többi szaktekintélyével és gyártójával közösen részt vett az indiai Bangalorban rendezett ICESP világkonferencián.



1. ábra, A konferencia bannerje

Alapvető tapasztalatként fogalmazta meg, hogy elengedhetetlen lényegesen nagyobb hangsúlyt fektetni a múlt megismerésére és a fizikai háttér részletes feltérképezésére. Célként tűzte ki, hogy a területen működő gyártók kollégáit megfelelő módon képezzék, így biztosítható leginkább a termékek járható irányú fejlődése.

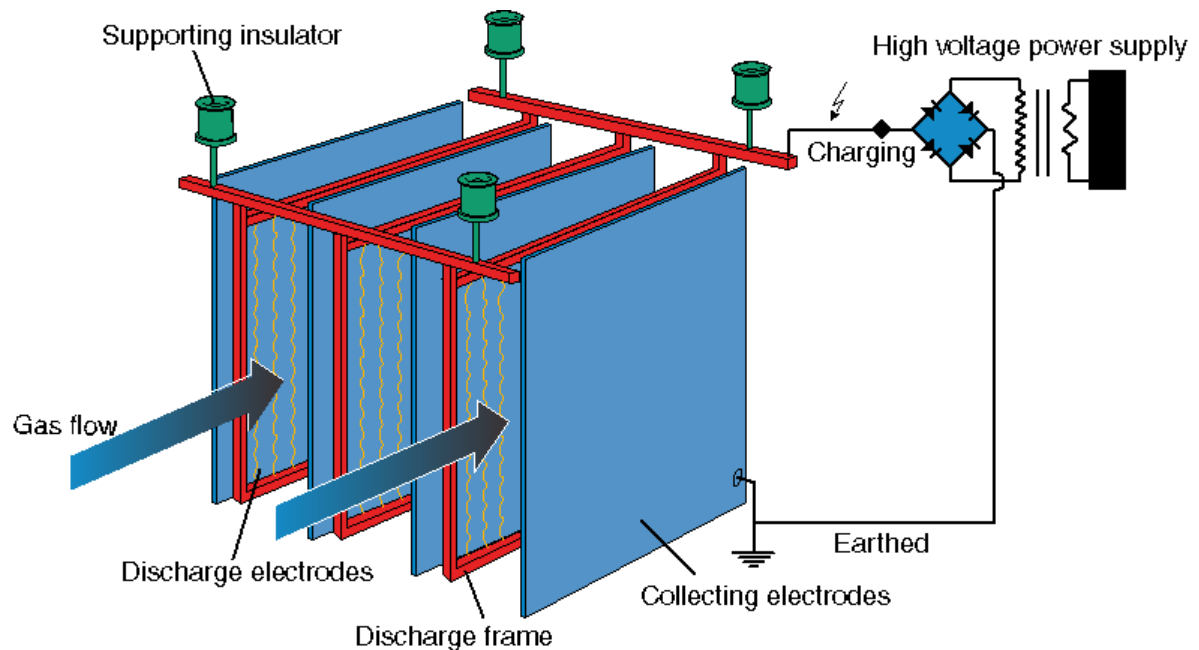
### A berendezések felépítése, működése

Az ESP-k<sup>1</sup> nem csak **por-**, hanem **pernye-** és **cseppleválasztásra** is alkalmasak a következőkben ismertetett elvek alapján. Ezekben a gigantikus ipari berendezésekben nagyfelületű földelt fémlemezeket, ún. **gyűjtőelektródokat** találunk. A köztük elhelyezett kis görbületi sugarú **koronaelektródok** koronakisülései ütközési ionozással töltik fel a részecskéket, így a rájuk ható elektrosztatikus erő a lemezek felé mozgatja őket, ezeket elérve megkötődnek a felületükön. Az rájuk lerakódó szennyeződést mechanikai úton távolítják el az ún. **kopogtatás** során.

---

<sup>1</sup> A rövidítés magyar és angol nyelven is használatos, feloldása: Elektrosztatikus Porleválasztó/Electrostatic Precipitator

A koronaelektrodokat gerjesztő tápegység transzformátorból és nagyfeszültségű egyenirányítóból áll. A korai kísérletek során a feszültség-áram karakterisztikát felvéve azt tapasztalták, hogy **negatív feszültségű táplálás** esetén magasabb az átütési feszültség, így **nagyobb koronaáram** érhető el. Éppen ezért ez a megoldás terjedt el a gyakorlatban.



2. ábra, Az ESP felépítése, forrás: Kjell Porle, ALSTOM

A koronázó elektrodok szerepét a korai eszközökben egyszerű huzalok töltötték be, melyeket a végükön súlyokkal feszítettek. A rajtuk megjelenő koronakisülés alakította ki a töltött részecskéket. Úgy látták, hogy ezen „sima” elektrodok felületén is létrejönnek ún. hot-spotok: ezekben a tartományokban voltak leginkább kisülések. Mivel eredendően nem homogén a létrejövő mező, különböző módokon próbálták meg a görbületet lokálisan növelni, a görbületi sugarat csökkenteni. Így alakultak ki a változatos formájú elektrodok.

Sajnos számolni kell a koronázó elektrodok felületére rakódó porral is, hiszen itt nagy a térerősség gradiense. A polarizáció/megosztás<sup>2</sup> során a pozitív és negatív töltésekre ható erők eltérőek lesznek, így a porszemcsék „odatapadnak”. Különösen kellemetlen ez a jelenség, ha nedvességet is kap a szennyeződés. Ezért a koronázó elektrodokat is tisztítani kell: ezeket is kopogtatják. A kellő merevség érdekében napjainkban **hengeres csőre rögzített tüskéket alkalmaznak koronaelektrodként**.

A gyűjtőelektrodok különböző felületi kialakításával igyekeznek kiküszöbölni a gázáram már kiült szennyeződésre gyakorolt visszakeverő hatását. Zsebeket képeznek rajtuk, hogy minél inkább csökkentsék a felülethez közeli gyors gázáramlást.

## Felmerülő kérdések

Jól lehet, hogy egy-egy azonos sorozatból származó leválasztó berendezés között elhanyagolhatóak a paramétereiket illető különbségek, mégis előfordult, hogy egyező

<sup>2</sup> Szigetelőben polarizáció, vezetőben megosztás jön létre

konstrukciók esetén a leválasztási fok egyik helyszínen 99,9% volt, egy másikon 85%. Az okokat vizsgáló kísérletek nem vezettek eredményre.

Végül **Oglesby** egy konferencián előállt elméletével: A **Gremlin's theory**, szerint a rosszabb leválasztási fokkal működő helyszínen egyszerűen a „gépbe bújt egy gonosz manó”. A humoros metafora rámutat: klasszikus megközelítés nem ad megfelelő magyarázatot a különbségre.

## A kutatások kezdete

A kutatók figyelme ezt követően a következő témakörökre irányult:

- **Villamos erőtér jellege** (iontöltés, a szemcsék töltődése, tértöltés)
- **Fluidum** (áramló, szennyeződéseket szállító közeg), az áramlási tér modellezése
- Por diffúziója
- És az előbbiek között fellépő kölcsönhatások: az elektromos- és az áramlási tér együtt határozzák meg a leválasztás fokát

Dr. Berta István (a BME Villamos Energetikai Tanszékének professzora) is ekkor kezdett foglalkozni a téma feltárásával. Munkatársaival a tértöltés hatásának fontosságát mutatták ki. A kísérletekből látszott, hogy a szemcsékre ható erő a félutca<sup>3</sup> közepén nem elég ahhoz, hogy gyorsítsa a porszemcséket. Vagyis a **tértöltés** fontosabbnak látszó hatást gyakorol a külső erőtérenél. Az áramlási tér „feladata”, hogy a szemcséket a lamináris áramlásba kényszerítse, ahonnan tovább haladnak a gyűjtőelektród felé, majd feltapadnak rá.

Az Áramlástan Tanszékkel együttműködve a tér sajátosságait is vizsgálták. Beigazolódott az az elmélet, melyet a numerikus számítások mutattak:

- A félutcában turbulens áramlás áll fenn.
- Az elektródok mentén lamináris az áramlás.

Ezt figyelembe véve új konstrukciókat terveztek, adaptálva a méretezéskor a legújabb elméleti és gyakorlati ismereteket.

Az előadó megjegyezte, hogy sajnálatos módon ezek a korai felfedezések gyakran feledésbe merülnek. Bizonyos gyártók minél nagyobb koronaáramot lehetővé tevő tápegységet kínálnak, bár fentiekből is sejthető, hogy alapvetően nem ez határozza meg a leválasztást.

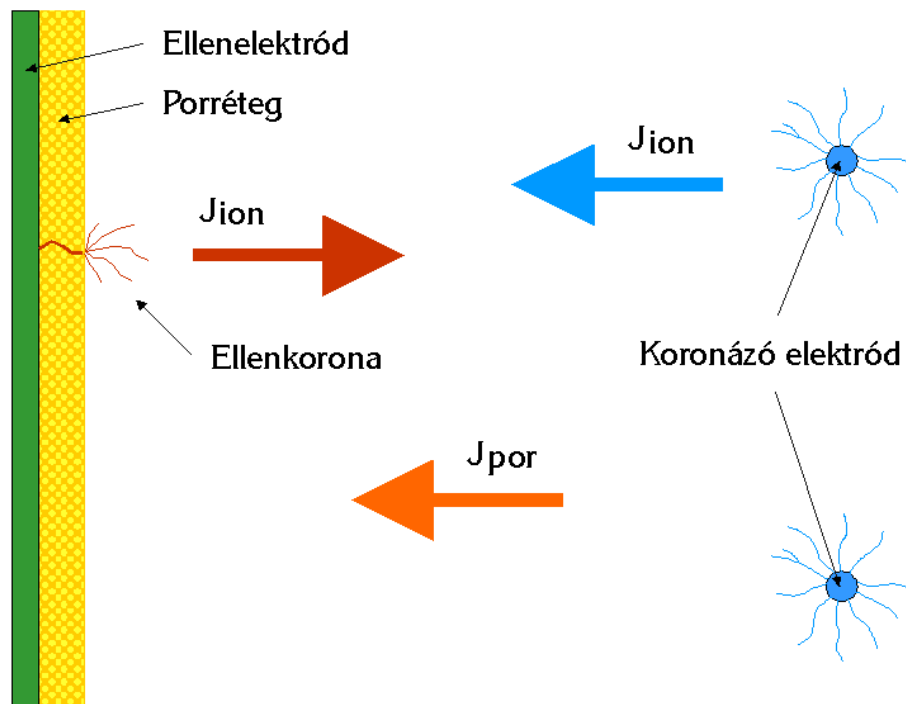
## Az ellenkorona-kisülések

A jelenség akkor kapott először publicitást, mikor egy japán professzor kutatásában az ellenállás függvényében vizsgálták a leválasztást. Felismerték: **nagy ellenállású porok** esetén nem vezetődik le a földelt elektródon a töltés, ennél fogva nagy térerősség jön létre, **átütés következik be**, vezető csatorna alakul ki. A koronához hasonló kisülés jön létre, de ez ellentétes ionokat juttat a félutcaáramba, **rontja a feltöltődés hatásfokát**. Ez hatással van a feszültség-áram karakterisztikára is:

---

<sup>3</sup> Két gyűjtőelektróda közötti távolság fele, itt található a koronalektródok

gyenge intenzitású lengések jelennek meg a koronaáramon. Amennyiben ez fokozódik, a tápegység nem tud stabil üzemet tartani, visszahajló ágba érünk a karakterisztikán.



3. ábra, Ellenkorona kisülések

Megtudtuk azt is, hogy normál üzembn sem állandó a tápfeszültség. Az üzemeltetés során **igyekeznek az átütési szint közelében tartani a feszültséget**: kis meredekséggel emelik, amint átütés jön létre visszaszabályoznak, és egy kicsit alacsonyabb szintről folytatják a lassú emelést.

A leválasztás során nehéz dolgunk van a szélsőséges ellenállás-értékű részecskékkel:

- Túl kis fajlagos ellenállás esetén hamar elvesztik a töltésüket, így könnyebben vissza térnek a gázáramba, mivel nem kötődnek meg a gyűjtőelektrodon.
- Túl nagy fajlagos ellenállásnál a fentebb ismertetett ellenkorona-kisülések okoznak instabilitást

A belső térben villamos (ion) szél jön létre, mely szuperonálódik az átáramlás miatt jelenlévő gázmozgással. Az áramló közeg mozgatja az ionokat, változtatja a tértöltés helyzetét. A kialakuló ionok hatására olyan turbulenciák alakulhatnak ki, melyek visszakeverik a már kirakódott port.

## Többszintű porleválasztó

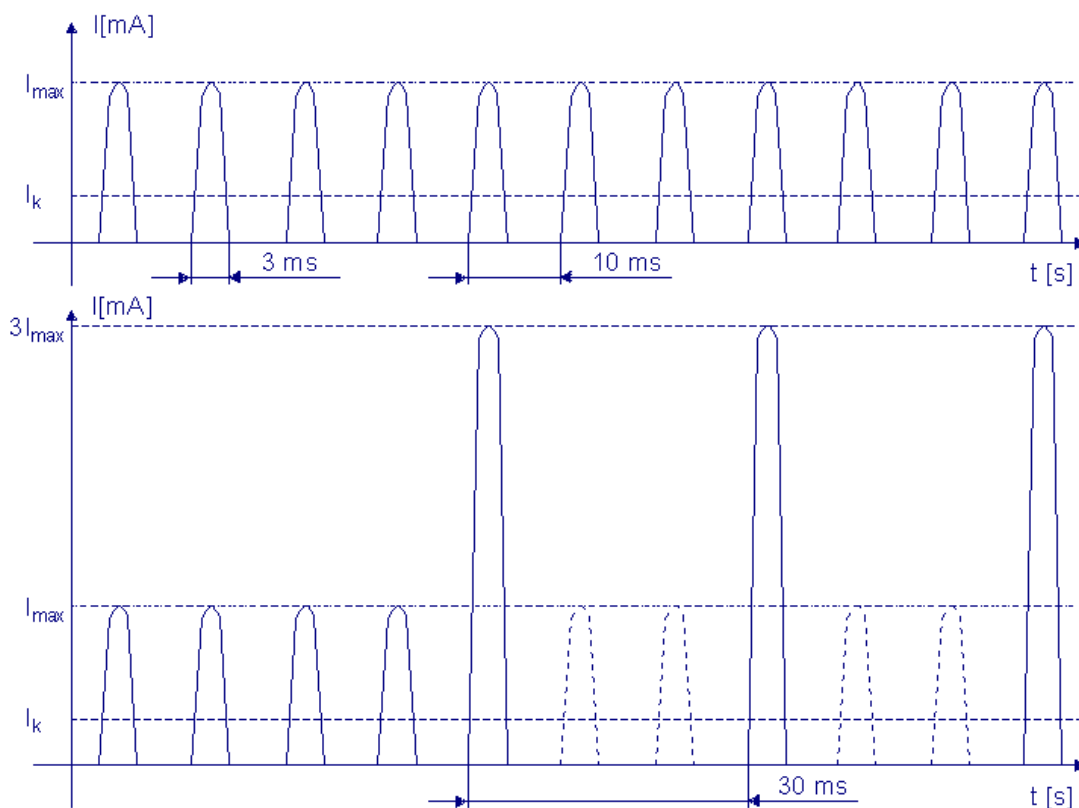
Alapötlete az, hogy jó hatásfokú leválasztást valósítson meg minél kevesebb kisüléssel előállított felesleges (nem a tértöltés létrehozásában résztvevő) ion létrehozásával. Két részre válik szét a berendezés működése:

- Az első zónában valósul meg a részecskék felöltése
- A további szakaszokba jelen lévő elektromos tér segíti a leválasztódást a gyűjtőelektrodon

## Impulzusüzemű táplálás

Ahhoz, hogy egy szemcse kellő töltést vegyen fel a koronaelektrod mellett, hosszabb ideig kell ott tartózkodnia. Amikor nincs külső térerősség, mely a gyűjtőelektrodok felé sodorná a szemcséket, van idejük feltöltődni. Ezek kívül a „kapcsolgatással”, áramcsökkenés, **energia-megtakarítás** is megvalósul, kisebb lesz a leválasztás teljesítményigénye.

Előadónk konkrét példaként említette a pécsi biomassza erőmű hatzónás leválasztójának viszonyait: az itt jellemző 60-70 kV átütési feszültségcsúcsnál felvett hatásos teljesítmény több száz kW. Nem tűnik jelentősnek az erőmű termeléséhez viszonyítva, mégis megtakarítás eszközölhető vele.



4. ábra, Impulzusüzemű táplálás

Továbbá **megnövelt feszültség** érhető el a koronázó elektrodákon: a csúcsnál elkezd kialakulni az átütési csatorna, a tápfeszültség kikapcsolása után azonban nem folytatódik a folyamat. Ezért ezzel a módszerrel nagy ellenállású poroknál is korlátozhatjuk az ellenkorona kialakulásának veszélyét.

Az impulzusüzemű táplálás időjellemzői is változtak a fejlődés során: a kezdeti berendezések periódusideje ms nagyságrendbe esett. Mostanra  **$\mu$ s körüli** lett ez az érték. Az iparban ns-os gerjesztést azért nem valósítanak meg, mert ekkor olyan jelenségek alakulnak ki (átütések, kisülések), melyek gátolják a folyamatos üzemet. Született viszont egy másik fontos felfedezés is: a nagy homlokmeredekségű feszültségváltások olyan (plazma) kémiai folyamatokat indukálnak,

melyek bizonyos toxikus vegyületeket bontanak. Ezen alapul a PPC: hideg (kisülési) **plazmával történő semlegesítés**, mely a kutatások ígéretes területe.

Összefoglalva azt mondhatjuk, hogy az impulzusüzemű táplálással csökken a kibocsátott por mennyisége és az energiaigény, javul a leválasztás.

## Tapasztalatok a konferenciáról:

- Európában több porleválasztót is impulzusüzemű táplálásra állítottak át.
- Az Unióban és az Egyesült Államokban impulzusüzem a jellemző (ROPE: Hagyják lecsengeni a feszültséget két csúc között, bizonyos portípusoknál nagyon előnyös)
- India és Kína a folyamatos táplálás híve, de nem a hagyományosnak mondható 50 Hz transzformátor és egyenirányító híd rendszerrel, hanem kapcsoló üzemű tápokat alkalmaznak kisebb bekerülési költséggel.

## A modellezés fontossága

Ahhoz, hogy meg tudjuk jósolni egy berendezés leválasztási fokát, a klasszikus számítások nem elegendőek, **numerikus módszerekre** van szükség. A BME áramlástan laboratóriumában lézerekkel vizsgálták a részecskék trajektóriáját és e kísérletek során jó egyezést állapítottak meg az elméleti modellel, amennyiben a berendezés méretei miatt a turbulens-lamináris rétegek kivehetőek voltak. Számítási eredményeik megegyeztek mások következtetéseivel is.

Manapság egyre többen használnak kommersz **térszámító programokat** (pl. ANSYS Fluent), a numerikus modellek alkalmazhatóságának megállapítására. Tendencia az egyre nagyobb pontosságú modellek használata, ám ez önmagában méretezésre nem alkalmas. A különböző paraméterek leválasztásra gyakorolt hatását máshogy kell megközelíteni

## Deutch-féle modell

Félutca, térerősség, áramlási sebesség és szemcsesugár közti összefüggést ad meg:

$$w = \frac{qEC}{6\pi\mu r}$$

$$\eta = 1 - e^{-\frac{wL}{hv}}$$

- Minél nagyobb szemcsetöltés,
- Minél nagyobb gázáramlásra merőleges sebesség,
- Minél hosszabb leválasztó,
- Minél kisebb elektródtávolság,
- Minél kisebb gázáram,

annál nagyobb a leválasztás. A modell alkalmazhatósága korlátozott.

## Matts-Ohnfelt:

**Tapasztalati konstansokkal** dolgozik. Ez sem írja le tökéletesen a rendszert, a leválasztás fokát nem becsüli jól, de segítségével hathatósan sikerült csökkenteni a kibocsátást.

Nem csak az összes leválasztás növekedett, de egy másik fontos paraméter mentén is sikerült előrelépni. Korábban az üzemeltetőknek abszolút határértékeket kellett betartaniuk, mely a kibocsátható por teljes mennyiségét korlátozta. Napjainkban a **kisméretű részecskefrakciókra** külön előírások vonatkoznak. Példának okáért a PM 10-es megjelölés a 10 µm-nél kisebb részecskékre ad határértéket. A PM 2,5 analóg az előzővel.

Az új berendezések a finom porok frakciójának leválasztásában is hatékonyabbak. Az ultrafinom (nm-es) poroknál különböző trükköket alkalmaznak, mert ebben a tartományban fizikai korlátok miatt eredendően alacsony a leválasztás. **Agglomerátorokkal** ellentétes töltésű részeket képezve egy mixerben tapadnak össze a részecskék, így kezelhető méretűvé válnak. Majd a hagyományos berendezésbe ezeket juttatjuk, ahol már leválasztásra kerülnek. A szilárd fázis kivonása mellett megjelentek technikák higany és egyéb **nehézfémek leválasztására** is.

A Pécssett 2009-ben kivitelezett berendezés egy másik érdekes feladatot is megvalósít. A három zóna szeparátorként is alkalmazható. Megfelelő táplálással az ottani fatüzelésű kazán által kibocsátott terméket szétválasztják. Az így nyert jó minőségű fahamu, a mezőgazdaágban használható fel.

## Mai berendezések paramétere

Korábban a gyártók titkos adatként kezelték a termékeik dimenzióit, így tapasztalati úton épültek a porleválasztók, mindenki igyekezett intuíció alapján úgy méretezni, hogy a lehető legnagyobb leválasztási fokot ériék el.

Jellemző méretek egy modern porleválasztóban:

- Szekció magassága: 16-18 m
- Gyűjtőelektrodok távolsága (utca) 400-1000 mm
- Zóna maximális hossza (elektrod szélessége): 6 m
- Külön táplálású kialakítás, zónánként külön kopogtatási gyakoriság, más feszültségimpulzusok alkalmazása
- Általában 16 m szélesség, ennél nagyobb igény esetén inkább két leválasztót használnak
- Tipikusan 3 zóna, maximum 9, eltérő kopogtatási programmal, esetleg különböző táplálással
- Gyűjtőelektrodok felülete maximum 8000 m<sup>2</sup>

## Mit hoz a jövő?

Előadónk vállalkozott arra, hogy a konferencián elhangzott előadások témája, száma alapján vázlatosan összefoglalja a főbb sodorvonalakat a különböző földrajzi területekről.

**Indiában és Kínában** jelentős üzemeltetési tapasztalat halmozódott fel a széntüzelésű erőművekkel kapcsolatban. Az itt jelenlévő sokrétű, nagy mennyiségű adatra, információra építve hatékonyan finomíthatóak a ma működő berendezések. Ezek alapján vizsgálták a rendszer működését különböző minőségű, tulajdonságú részecskék esetén. Egyik legmeghatározóbb faktor ezek között a fajlagos ellenállás megváltozása. Foglalkoztak a vegyi összetétel alapján történő permittivitás becsléssel is.

**Európában** főleg az ALSTOM cég jóvoltából kutatják a továbblépési lehetőségeket, ide kapcsolódik a BME-n végzett számítógépes modellező tevékenység. Cél, hogy javuljon a leválasztási fok kisebb szemcsékre is és olyan modelleket alkossanak, melyek lehető leghűbben írják le a berendezések működését.

Az **USA**-ból és **Kínából** erre a konferenciára a korábbi évekhez mérten lényegesen kevesebb cikk érkezett.

Szomorú felismerés volt, hogy a nagy cégek képviselői nem voltak a korábbi eredmények alapos ismerői, főleg a táplálás oldalról közelítették meg a jobb leválasztás lehetőségeit, holott a fentiekből is látszik, hogy nem ez, ami igazán meghatározó.

## Keping Yan professzor munkássága

Előadónk e kollégája kutatásairól részletesebben is beszámolt, hiszen olyan új irányokat jelöl ki a leválasztók tervezésében, melyek nem csak ígéretesek, de az eddigi nézetekkel helyenként szembemennek. A professzor korábban a rövid felfutású koronaimpulzusokat kutatta, majd a kínai kormány hazahívta, és tanszéket, anyagi forrásokat biztosított kutatásaihoz.

Ismerve az ország energiaellátását<sup>4</sup> kicsit sem meglepő, hogy jelentős számú felújítás, kivitelezés közreműködőjeként vesz részt a fejlesztésben, módszereit a gyakorlatban is könnyen kipróbálhatja<sup>5</sup>.

Célja, az alapvető fizikai folyamatok vizsgálata. Úgy véli, korántsem biztos, hogy a bevett módszer a legjobb a leválasztók tervezésénél. Más becslést alkalmaz a leválasztási fokra, mely az ún. **ESP index**:  $\log m = -\alpha E_a E_p s + \log(\beta M_0)$

- $E_p$ : legnagyobb térerősség
- $E_a$ : átlagos térerősség
- $s$ : 1 m<sup>3</sup> gáz 1 s alatt mekkora felületen adhatja le a port
- $M_0$ ,  $m$  a belép és kilépő koncentrációk

---

<sup>4</sup> A villamos áram jelentős része származik szénerőművekből

<sup>5</sup> 80 projekt résztvevője, melyek közül 6 jelenleg is aktív



Lehetséges fejlesztési módként jelöli meg, ha kevesebb gyűjtőelektrodát alkalmaznak, így **nagyobb utcák** jönnek létre. Eddigi tapasztalatok szerint valóban nő a leválasztás foka. Az újonnan épült erőműveknél alapvető cél a megfelelő leválasztás. Az új elveket szem előtt tartva a tervezés, méretezés alapjaiban változik meg. Az egyelőre csak tapasztalati tényeket igyekeznek fizikailag is alátámasztani, magyarázatot keres rájuk.

Érdekesség, hogy Yan professzor a pekingi Olimpia idején rohamtempóban szabályozta az ipari létesítmények kibocsátását, hiszen a főváros levegője nagymértékben szennyezett, és erre a problémára mindenképpen megoldást kellett találni. A drasztikus kormányzati intézkedések mellett az ő munkája is lehetővé tette azt, hogy az ötkarikás játékok idején kékebb volt az ég a stadionok felett.

## Motiváció, méretezés és modellezés

Számos oka lehet annak, hogy egy létesítmény porkibocsátása megugrik, lehet szó **kapacitásnövelésről**, vagy egyéb módosításról a termelési folyamatban. Ha egy vállalat erőművében olyan kibocsátási értékek jelennek meg, melyek átlélik a normákban rögzítetteteket, szabályozni kell a rendszert, hiszen a határértékek átlépéséből következő termelés kiesés a bevétel elmaradását is jelenti. Az esetlegesen beépítendő új helyszíneken pedig kezdeti cél a minél jobb leválasztási fokú ESP telepítése.

A méretezés során határozzák meg a berendezés alapvető méreteit, egyéb adatait, lefektetik a kereteket. A modellezés célja pedig a majdani működés minél pontosabb szimulációja, finombeállítások meghatározása, a táplálási módok, feszültség szintek, kopogtatási időállandó, és egyéb értékek rögzítése.

A fejlődés lehetősége adott, legyen szó a finom frakció hatékonyabb leválasztásáról, vagy teljesen új méretezési módszerek kidolgozásáról az legújabb kihívásokhoz.

**Pácsonyi Imre**  
**az Energetikai Szakkollégium tagja**