

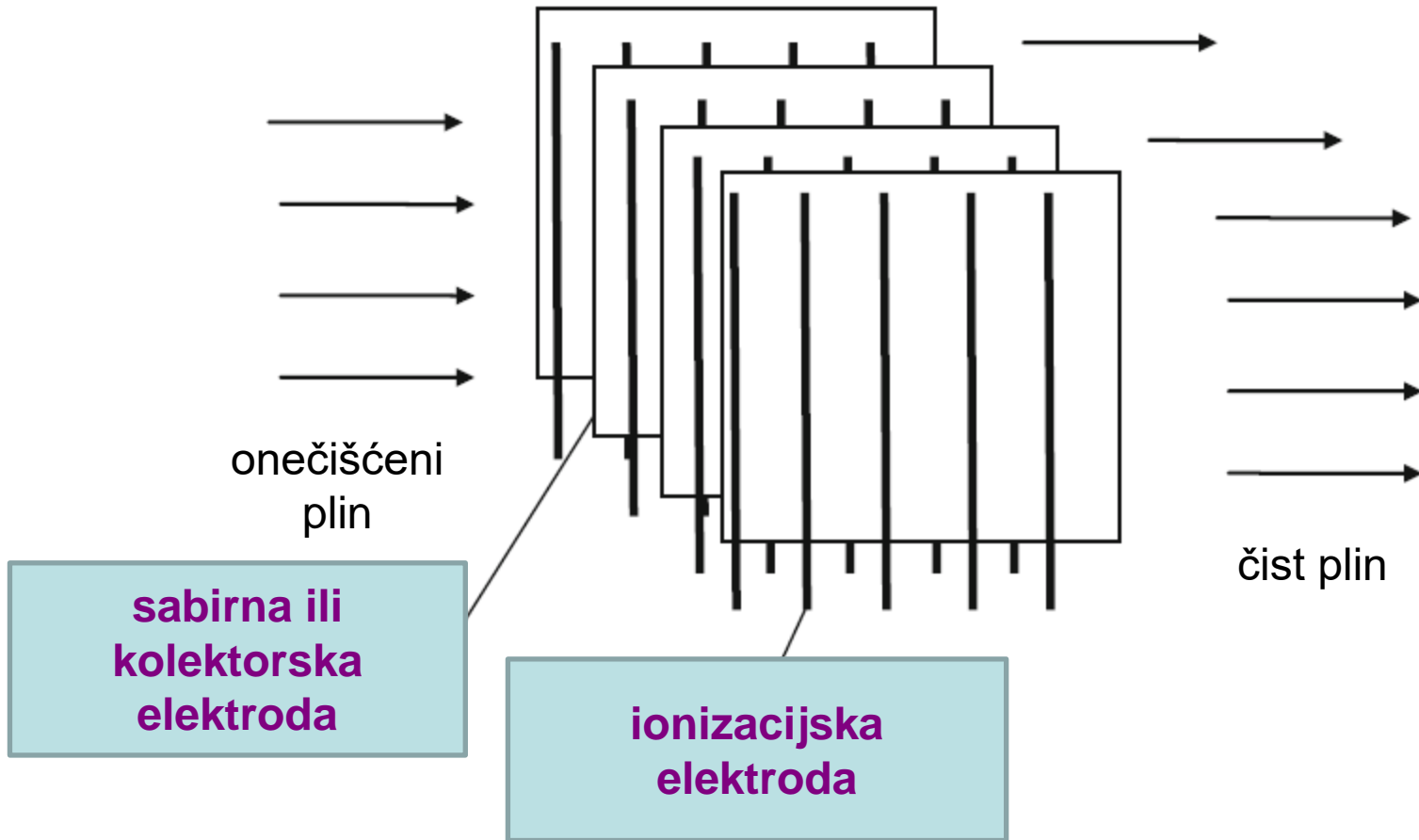
Uklanjanje čvrstih onečišćujućih tvari/suspendiranih čestica suhim postupcima - otprašivanje:

Elektrostatski precipitatori/taložnici (elektrofiltri), ESP



za uklanjanje čestica dimenzija
1-10 μm , a uglavnom $< 5 \mu\text{m}$

Unutrašnja konfiguracija visokotlačnog ESP



- koriste električnu energiju (električna svojstva čestica) za izdvajanje čestica iz pl. smjesa
- koriste se za separaciju finih čestica (čak $< 0,1 \mu\text{m}$) iz svih vrsta otpadnih plinova s relativno velikom učinkovitošću (čak do 100 %)
- uređaji u kojima se krute čestice ($\text{PM}_{2,5}$ i manje) uklanjaju iz plina na način da se električki nabiju djelovanjem jedne elektrode (**ionizacijske elektrode**) uslijed čega se sakupljaju na drugoj elektrodi (**sabirnoj ili kolektorskoj elektrodi**)
- jedan od ključnih parametara ESP:
omjer površine sabirne (kolektorske) elektrode i protoka plina \Rightarrow veći omjer podrazumijeva bolju učinkovitost, ali i veliku sabirnu površinu koju je potrebno osigurati
- nabijanje krutih čestica provodi se ioniziranjem plina koji prolazi između elektroda pri čemu **nastali ioni plina električki nabijaju čestice**. Za ionizaciju plina koristi se **pojava korone**.

Ključni stupnjevi:

- generiranje električnog polja i električnih naboja,
- prijenos naboja na česticu,
- kretanje nabijene čestice u el. polju do sabirne elektrode,
- adhezija nabijenih čestica na površini sabirne elektrode,
- mehaničko uklanjanje sloja čestica sa sabirne elektrode.

Učinkovitost ESP zavisi o:

a) Parametrima vezanim uz čestice:

- koncentracija čestica
- električna vodljivost/otpornost na vodljivost
- kemijski sastav čestica i otpadnog plina
- temperatura (čestica odn. otpadnog plina koji se pročišćava)
- veličina i raspodjela veličina čestica koje se uklanjaju
- higroskopsnost, mogućnost aglomeriranja čestica...

b) Procesni parametrima:

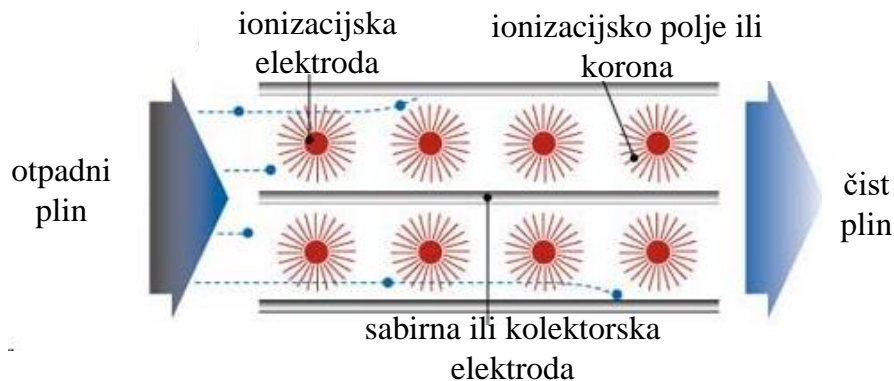
- protok
- sastav onečišćenog plina
- temperatura...

Dijelovi sustava

- izvor napona (+ transformatori),
- ionizacijska elektroda i sabirna/kolektorska elektroda,
- ulaz i izlaz plina,
- sabirnici ("*hoppers*"),
- sustav za čišćenje (elektronski, vibracijski, ispiranje...),
- vanjsko kućište oko elektroda (ljuska).

Korona

- **korona** se može pojaviti na elektrodi priključenoj bilo na pozitivan, bilo na negativan napon; **negativna korona** stabilnija je od pozitivne, te napon narinut elektrodi može biti viši kad je negativna, pa je to razlog da ***ionizacijska elektroda gotovo u pravilu ima negativan napon***
- plin se ionizira jednostavno i jeftino pojavom korone
- **korona - električna pojava do koje dolazi kad gradijent jačine električnog polja oko elektrode prekorači određenu graničnu vrijednost, pri čemu njezino nastajanje zavisi o jačini napona, obliku i udaljenosti elektroda, gustoći, vlazi, vodljivosti čestica i temperaturi plina**
- **pojava korone je jača ako je radijus zakrivljenja površine izbijanja manji** (zbog toga se **ionizirajuće (aktivne) elektrode rade u obliku žice**), tj. što su električne silnice zbijenije
- nasuprot tome, **sabirne ili kolektorske (pasivne) elektrode rade se u obliku cijevi ili ploča**, jer je na njima pojava korone nepoželjna
- pri pojavi korone dolazi do emisije svjetla u njezinoj blizini i pojave siktavog zvuka



- da bi se korona pojavila na samo jednoj elektrodi, polje mora biti heterogeno, tj. imati veću jakost u blizini ionizacijske elektrode u odnosu na sabirnu elektrodu

- **zbog pojave korone nastali ioni** kreću se pod utjecajem jakog električnog polja (20-100 kV, najčešće 40-60 kV zavisno o udaljenosti između elektroda) brzinom od 40-50 m/s; ioni koji tom brzinom udare u ionizacijsku elektrodu izbijaju iz njezine površine elektrone, koji ubrzani električnim poljem udaraju u molekule plina izazivajući time njegovu ionizaciju,
- ioni plina na svom putu prema kolektorskoj elektrodi nabijaju čestice sudarajući se s njima ili prijanjaju na njih (krupnije čestice),
- prijanjanje tzv. ionskom difuzijom prevladava u slučaju sitnijih čestica,
- nabijene čestice putuju prema kolektorskoj elektrodi zajedno s ionima, čije ih strujanje i mehanički povlači sa sobom,
- ESP rade pri protocima od 1-10000 m³/min, uz širok raspon koncentracija čestica (0,0002-200 g/m³);
- čestice veličine od 0,1 do 200 μm mogu se odvojiti/ukloniti s učinkovitošću do 99,9 %

Gdje se postavljaju ESP?

- prije skrubera za uklanjanje SO₂
- prije predgrijača zraka (vrući plinovi) ili poslije predgrijača zraka (hladni plinovi)
- prije sustava za SCR NO_x (vrući plinovi, malo krutih čestica)

Plinovi na ulazu u ESP mogu, ali ne moraju prethodno biti obrađeni (uklanjanje dijela čestica pomoću mehaničkih kolektora, dodatak kemikalija u cilju promjene fizičkih značajki plina i poboljšanja djelovanja ESP)

Alternativa za elektrofiltre:

vrećasti filtri zbog:

- a) veće učinkovitosti (uz odgovarajuće uvjete rada)
- b) manje zavisnosti o značajkama čestica koje se uklanjaju

Prednosti ESP u odnosu na ostale uređaje

- uklanjanje čestica širokog raspona dimenzija (0,01 - 500 μm)
- vrlo učinkoviti ($> 99,5 \%$), čak i kad se radi o vrlo malim česticama (izlazna koncentracija manja od 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),
- koriste se za obradu velikih volumena plina (10^5 - $10^6 \text{ m}^3/\text{h}$) uz istovremeni mali pad tlaka (100-1000 N/m^2),
- mogu raditi pri različitim temperaturama (do 600 $^\circ\text{C}$),
- kratko vrijeme obrade (0,1 -10 s),
- malen pad tlaka (npr. kod malih brzina strujanja plina od ca. 0,3 - 3 m/s),
- mala potrošnja energije (0,1- 0,8 kWh/m^3),
- mali radni troškovi (osim u uvjetima kad se želi postići vrlo velika učinkovitost),
- kontinuiran i dugotrajan rad,
- prikladniji za primjenu od njihove alternative (vrećasti filtri), posebno ako je otpadni plin koji je potrebno obraditi vruć ili vlažan (što onemogućava primjenu vrećastih filtara)!

Nedostaci ESP:

- veliki kapitalni troškovi,
- zahtijevaju puno prostora,
- ne mogu se koristiti u promjenjivim uvjetima rada (protoci, temperatura, količina krutih tvari); kad se jednom instaliraju nisu fleksibilni na promjene radnih uvjeta,
- ne mogu se koristiti za smanjenje emisija plinova, izuzev posebnih izvedbi,
- ograničena primjena za obradu eksplozivnih i zapaljivih aerosola,
- nisu pogodni za rad sa česticama koje pokazuju veliku otpornost na vođenje struje (primjenljivi na čestice s el. otporom od ca. 10^6 - 10^{13} Ω cm),
- potreba za pažljivim vođenjem procesa (i održavanjem sigurnih uvjeta rada),
- nastajanje ozona tijekom negativnog izbijanja elektroda za vrijeme ionizacije...

Izvedbe elektrofiltara

1. S obzirom na način provedbe procesa i uklanjanja krutog materijala

a) *suhi postupak*

mehaničko (ili akustičko) uklanjanje vrijednih materijala u sabirnicima

b) *mokri postupak*

povremeno ili kontinuirano ispiranje sabirnih elektroda (injektiranje ili raspršivanje vode) - dio vode za ispiranje može se reciklirati; mehanički sabirnici zamijenjeni su sa sustavom za drenažu:

- obrada dimnih struja, kiselih maglica;
- uklanjanje čestica koje su mokre/ljepljive,
- obrada zapaljivih/eksplozivnih čestica,
- mokri postupak je učinkovitiji, ali nužna je daljnja obrada otpadnih voda/mulja;
- omogućavaju istovremeno uklanjanje krutih čestica i plinovitih onečišćujućih tvari (para)

Izvedbe elektrofiltara

2. S obzirom na napon ESP dijele se na:

- a) *visokonaponske ESP* (30-100 kV; često 40-60 kV)
- b) *niskonaponske ESP* (12-13 kV) - za izdvajanje fino dispergiranih kapljica

3. S obzirom na broj stupnjeva ESP mogu biti:

- a) *jednostupnjeviti ESP – Cottrelovi taložnici*
(ionizacija plina i prikupljanje čestica u jednom stupnju i istom el. polju)
– gotovo svi industrijski ESP (za prljavije plinove)
- a) *dvostupnjeviti ESP*
(u prvom odjeljku ioniziraju se čestice u plinu, a u drugom dolazi do njihovog sakupljanja) - (za manje prljave plinove)

4. S obzirom na izvedbu/oblik elektroda:

- a) pločasti
- b) cijevni

Različita područja primjene:

a) uglavnom za ind. i termoenergetske svrhe

- termoelektrane
- spalionice i postrojenja za sinteriranje
- industrija cementa
- proizvodnja gipsa, H_2SO_4 , fosfora, čađi
- katalitičko krekiranje nafte
- metalurška ind.

b) prilikom kondicioniranja zraka

- u kućnim sustavima i javnim građevinama, kazalištima i sl.
-

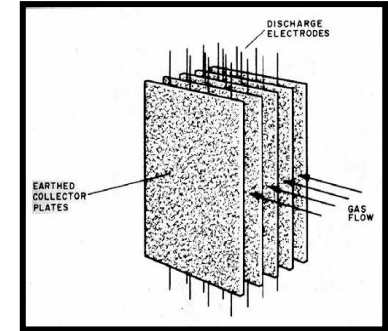
Stupnjevi procesa elektrofiltriranja:

1. uspostavljanje električnog polja
2. stvaranje električnih naboja
3. prijenos elektr. naboja na površinu čestica koje se uklanjaju
4. kretanje nabijenih čestica u električnom polju do sabirne elektrode
5. adhezija nabijenih čestica na površinu sabirne elektrode
6. uklanjanje sloja krutih čestica sa sabirne elektrode (uglavnom diskontinuiran proces)
7. sakupljanje uklonjenih čestica u sabirniku
8. uklanjanje krutih čestica iz sabirnika

Princip rada

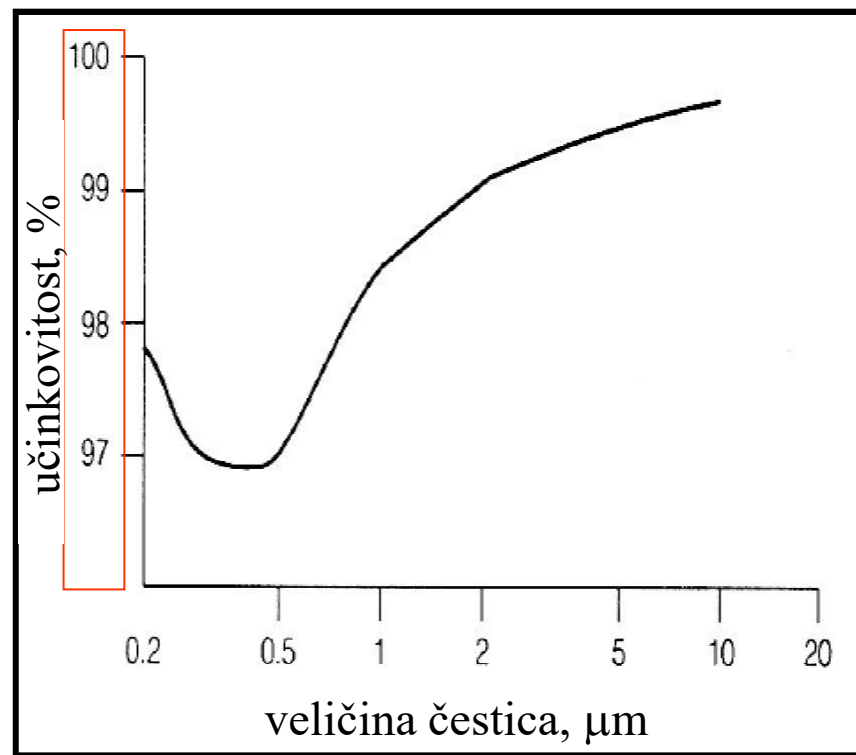
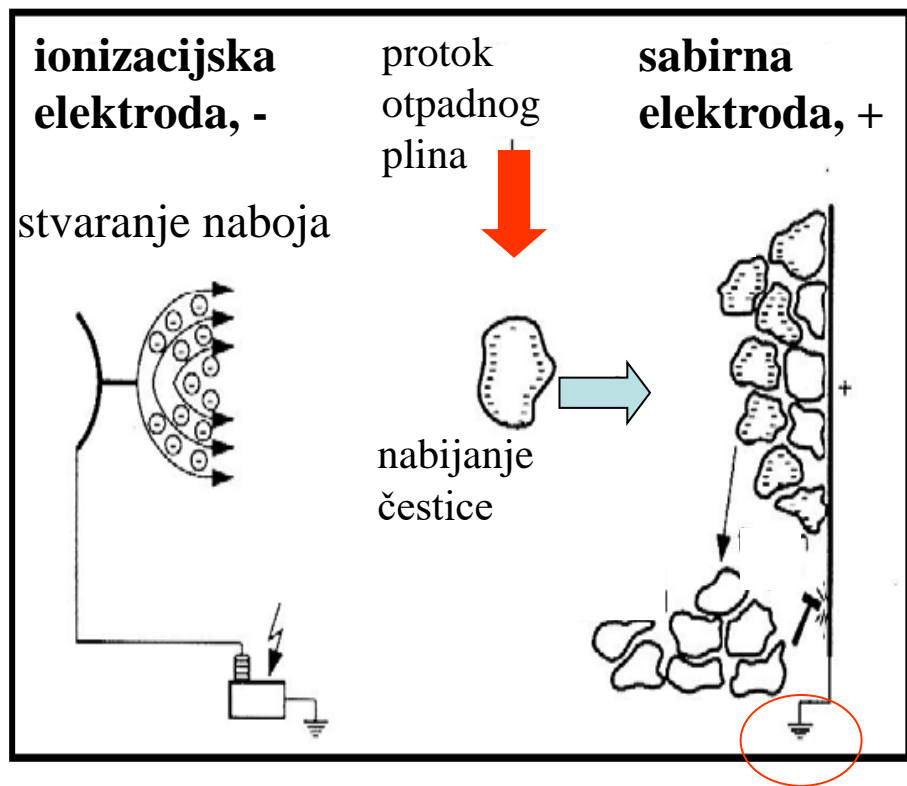
- **elektrostatske sile** - pokretačka sila za dovođenje čestica na stijenke elektrode
- **ionizirajuca (ili aktivna) elektroda** ionizira plin (obično ima negativan naboj) – najčešće oblik žice
- **kolektorska (pasivna) elektroda** (suprotnog naboja od ioniz. elektr.) – oblik ploče, cijevi ili heksagonalan oblik
- **dvije osnovne izvedbe elektrofiltra: pločasti i cijevni**

Pločasti ESP



- uobičajeni elektrofiltar je pločaste izvedbe!
- nabijene elektrode i pločaste elektrode povezuju se u **kaskade**; ploče formiraju ravne prolaze za plin;
- u centralnom dijelu svakog prolaza su nabijene elektrode; na pločama čestice gube naboj i vežu se jedna na drugu tvoreći “kolač”;
- sloj čestica koji se nakupi nakon određenog vremena rada uklanja se ***mehaničkim sustavom protresivanja ili pomoću elektromagnetskih sila...***
- kontinuiran rad
- uobičajena linearna brzina plina koji prolazi kroz elektrofiltar je manja nego u ciklonu, kao i pad tlaka koji pritom nastaje

Princip rada i učinkovitost zavisno o veličina čestica:



napon: 20 - 80 kV, prosjek je ~ 40 kV
zavisno o udaljenosti između elektroda
- visokonaponsko istosmjerno električno polje

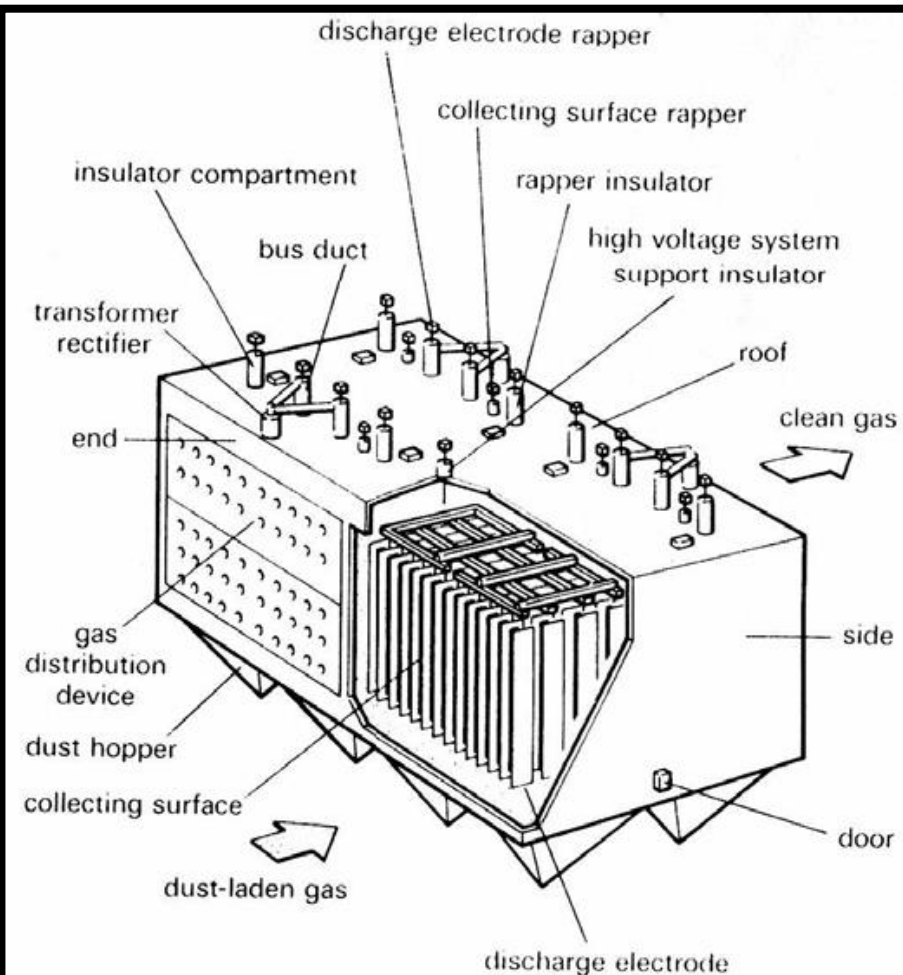
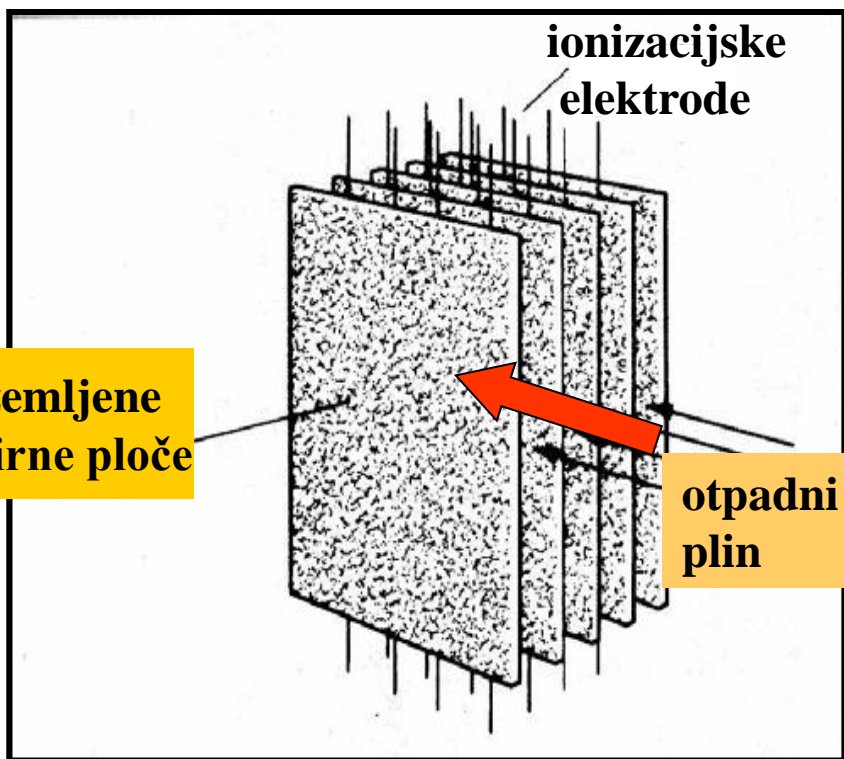
Slobodni elektroni na površini nabijene elektrode:

Slobodni elektroni na površini nabijene elektrode:

- mogu se neposredno vezati na česticu dajući joj naboj i na taj način uzrokovati kretanje čestice prema sabirnoj elektrodi
- mogu se adsorbirati na molekulu plina (elektronegativni plinovi, kao što su CO_2 , SO_2 , i dr.) i ionizirati je, pri čemu nastaje negativan naboj uzrokuje gibanje prema sabirnoj elektrodi

Izvedba pločastog elektrofiltra

- dominiraju u praksi



Dimenzije ploča: 1 do 2 m široke i 3 do 6 m visoke

Udaljenost ploča: 15-35 cm

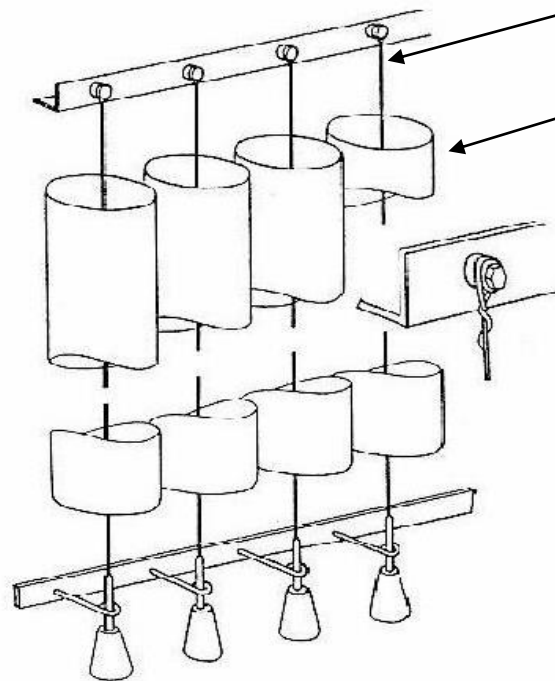
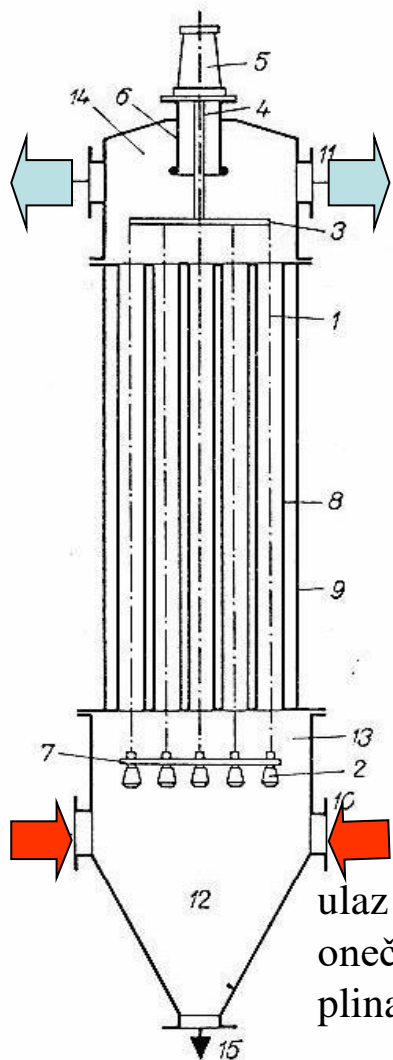
Brzina plina: 0,5-0,6 m/s

- koriste se za obradu velikih količina značajno onečišćenog plina
- elektrode izrađene od nekorozivnog materijala (uglavnom čelik)

Pločasti ESP sastoji se od:

- ionizacijske elektrode,
- kolektorske elektrode,
- nosača okvira s elektrodama,
- visokonaponskih izolatora,
- brtvi koje sprječavaju izlaženje plina,
- utega za napinjanje ionizacijske elektrode,
- uređaja za potresanje/uklanjanje sakupljenog materijala
- sabirnika za uklanjanje prašine

- udaljenost između elektroda određuje se prema koncentraciji čestica u plinu koje je potrebno ukloniti;
- manji razmak između sabirnih/kolektorskih elektroda snižava potreban napon na ionizacijskim elektrodama i smanjuje dimenzije cijelog postrojenja, ali otežava rad zbog mogućeg začepljenja.



ionizacijska elektroda

sabirna elektroda

Izvedba cijevnog elektrofiltra

Promjer sabirne elektrode:
50-200 mm (300 mm)

Duljina sabirne elektrode:
2-5 m

Brzina plina:
1-2 m/s

- koriste se za uklanjanje malih koncentracija krutih čestica; ranije su razvijeni, ali danas su potisnuti iz prakse

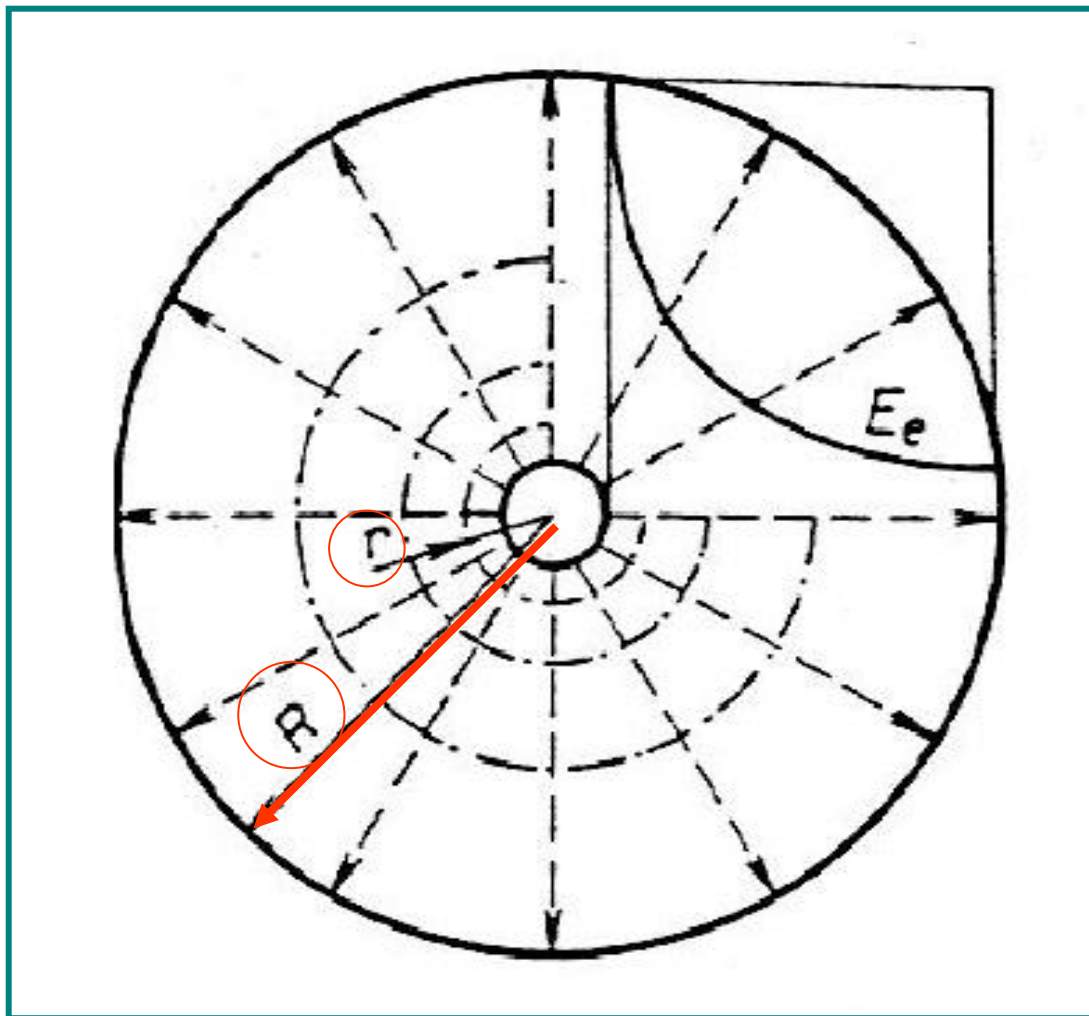
Kapacitet uređaja se povećava paralelnim postavljanjem više cijevi

1 — discharge electrode; 2 — tensioning weight; 3 — suspension frame; 4 — suspension rod; 5 — insulator; 6 — suspension-rod sheath; 7 — guide (spacer) frame; 8 — collecting electrode; 9 — casing; 10 — inlet stub; 11 — outlet stub; 12 — hopper; 13 — inlet plenum chamber; 14 — outlet plenum chamber; 15 — dust discharge port.

Električno polje u elektrofiltru, konfiguracijski koeficijent, F

žica u cijevi:

$$F = \ln \frac{R}{r}$$



Različite izvedbe ionizacijske i sabirne elektrode

➔ povećanje kapaciteta

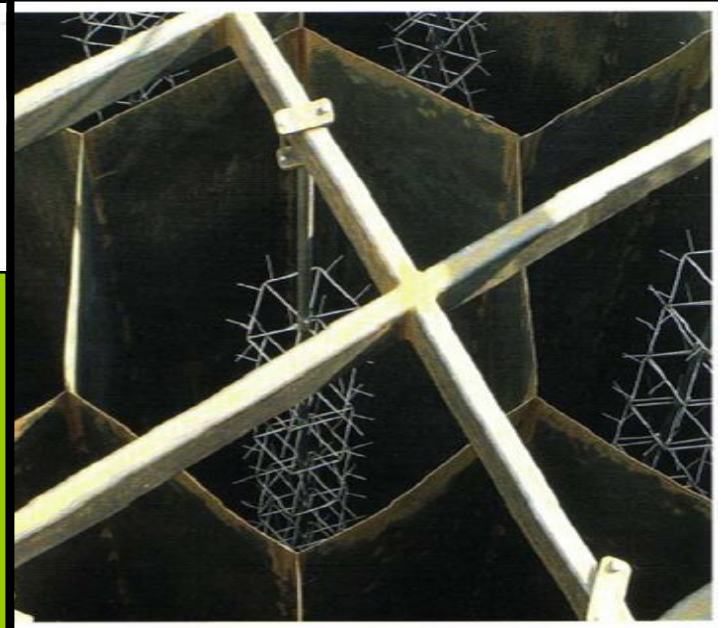
$F = \ln \frac{R}{r}$

$F = \ln \frac{4R}{\pi r}$

$F = \ln \frac{4R}{\pi r} + D$

$D = \sum_{n=1}^n \ln \left(\frac{\cosh \frac{\pi}{2} n\delta + 1}{\cosh \frac{\pi}{2} n\delta - 1} \right)$

$\delta = d/r$

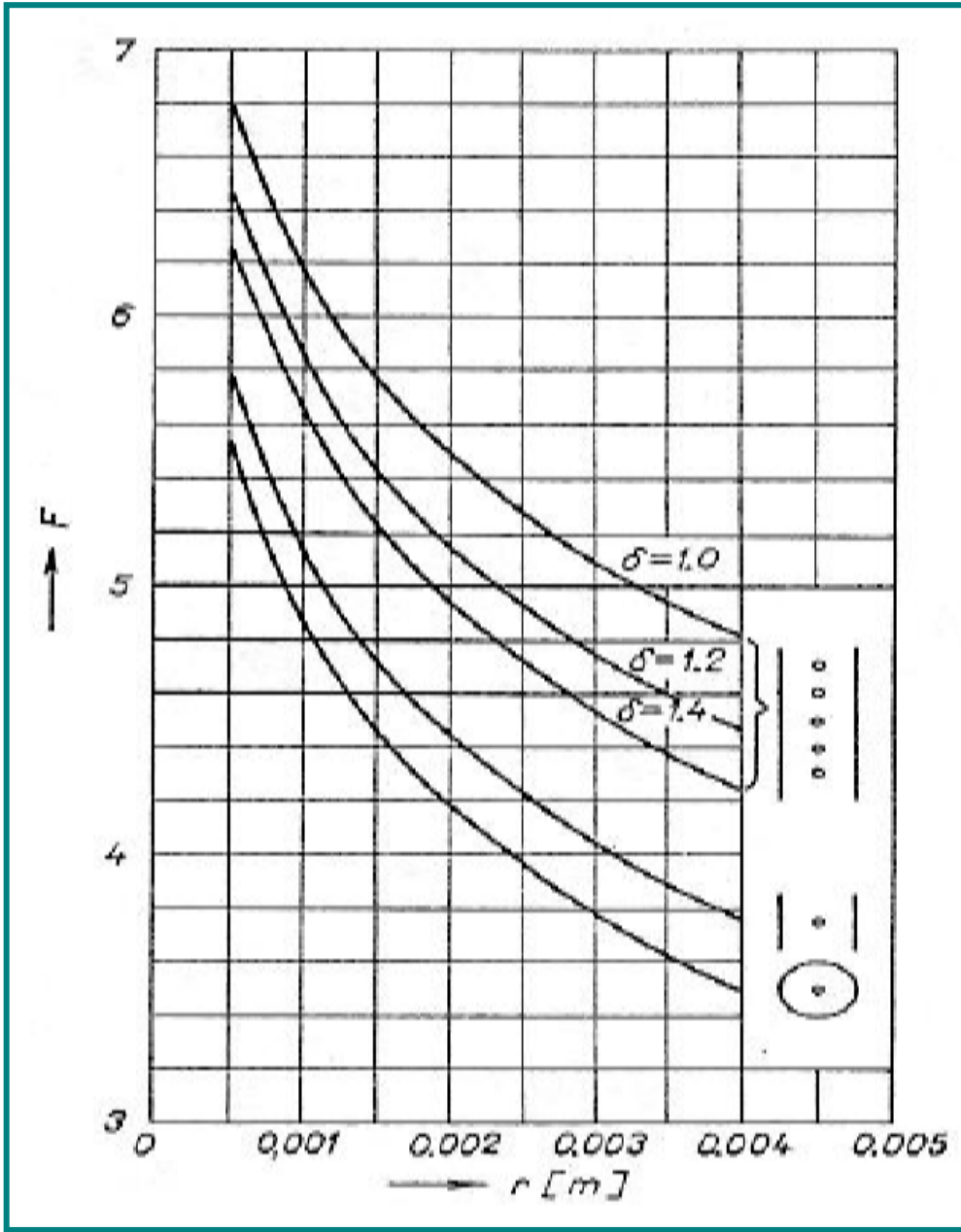


F- konfiguracijski koeficijent
d - relativna udaljenost elektroda

- žica u cijevi
- žica između dvije ploče
- više žica između dviju ploča

sabirna elektroda:

- kružni oblik
 - heksagonalni oblik
- promjer: 50-200 mm,*
dužina: 2-5 m



Konfiguracijski koeficijent, F

- za različite izvedbe ionizacijske i sabirne elektrode (različit δ , različit r)

$$\delta = d / r$$

Jačina električnog polja u idealnim uvjetima, E:

$$E = \frac{U}{r \ln(r_s / r_n)}$$

U – napon

r – lokalni radijus

r_s, r_n – radijus sabirne odn.
ionizacijske elektrode

Električna sila koja djeluje na nabijenu česticu u električnom polju je **Coulombova sila, K_c** dana izrazom:

$$K_c = QE$$

Q - električni naboj čestice

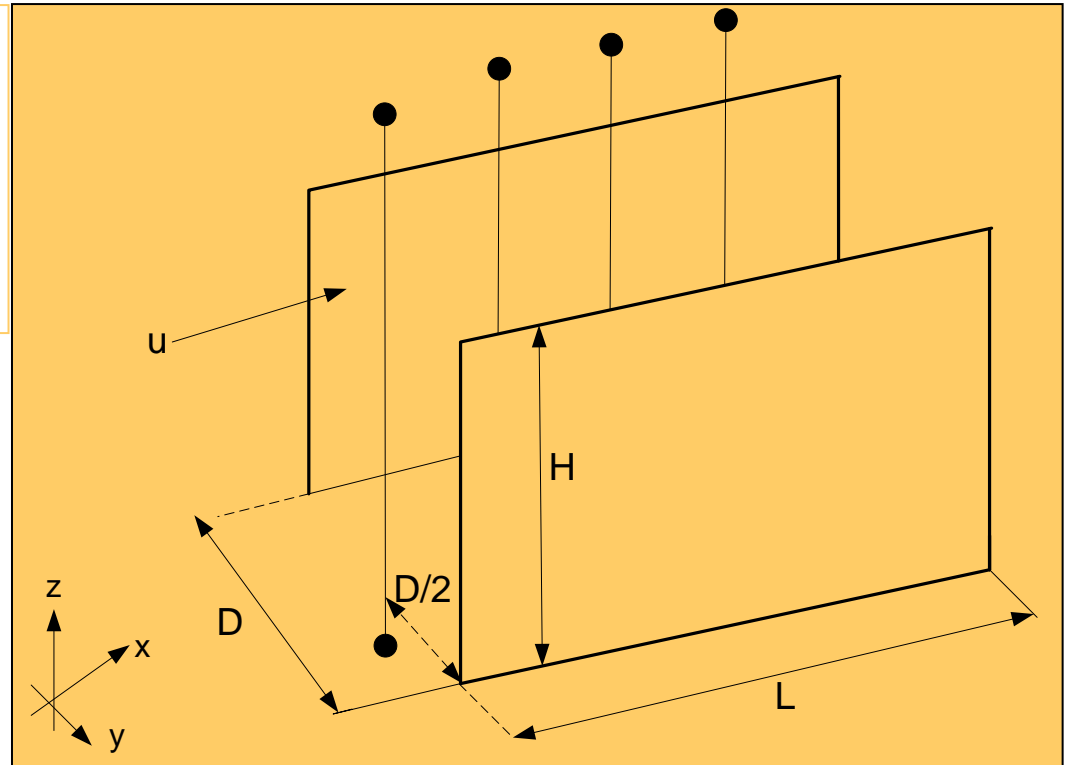
E - jačina električnog polja

K_c pokreće česticu u smjeru sabirne/
kolektorske elektrode

Elektrostatska sila u ravnoteži je sa silom otpora, F_d

$$F_d = \frac{3\pi d_c \eta_f v_t}{C}$$

Osnovna izvedba pločastog elektrofiltra - Deutschova jednadžba (1922.)



Pretpostavke:

1. plinovi (i čestice) se gibaju u smjeru x konstantnom brzinom u , bez longitudinalnog miješanja
2. čestice su homogeno raspodijeljene u y i z smjeru kod svakog položaja x
3. polja za nabijanje i sakupljanje su konstantna i homogena; čestice brzo postižu brzinu v u smjeru osi y
4. zanemariv je povratni tok sakupljenih čestica

Bilanca tvari:

$$uH\frac{D}{2}C_x - uH\frac{D}{2}C_{x+\Delta x} = \text{masa uklonjenih čestica}$$

u – linearna brzina plina, m/min

H – visina ploče, m

D – širina kanala (udaljenost ploča), m

C – koncentracija čestice, g/m³

$$uH\frac{D}{2}(C_x - C_{x+\Delta x}) = v_t C_{x+\Delta x/2} H \Delta x \quad / \quad : \Delta x$$

V_t - brzina strujanja čestica u smjeru y , m/min (brzina taloženja)

$$\frac{-uHD}{2} \frac{dC}{dx} = v_t HC \quad / \quad \text{separacija i integriranje od 0 do L (dužina kanala, m)}$$

$$\ln\left(\frac{C_L}{C_0}\right) = \frac{-2v_t HL}{uHD} \quad \text{ili}$$

$$\ln\left(\frac{C_L}{C_0}\right) = \frac{-v_t A_p}{Q_c}$$

A_p - površina jedne ploče
(dvije strane) (2 HL), m²

Q_c – volumni protok u jednom
kanalu, m³/min

Za cijeli ESP:

$$\frac{C_L}{C_0} = e^{(-v_t A_t / Q)}$$

Učinkovitost, η za cijeli ESP:

$$\eta = 1 - e^{(-v_t A_t / Q)^m} =$$

A_t - ukupna površina kolekt. ploča,
 Q – ukupan vol. protok plina
 A_t/Q – specif. površina
nakupljanja krutih čestica

Deutsch-Andersonova jedn. (bez
eksponenta m)

Matt-Öhnfeldtova modifikacija (sa
eksponentom m (obično 0,4-0,6); m~0,5
za lebdeći pepeo)

v_t ili v_e : 2 - 20 cm/s (pepeo ugljena);
6 - 7 cm/s (suha cementna prašina...)

$$v_t = \tau' F_E^*$$

$$\tau' = \frac{\rho_{\check{c}} d_{\check{c}}^2}{18\mu} C$$

C - Cunninghamov korekcijski faktor

F_E – elektrostatska sila po jedinici mase čestice, N/kg

τ' – korigirano karakteristično vrijeme taloženja, s

(F_E može biti 3000 puta veća od sile gravitacije za česticu veličine $1 \mu\text{m}$)

Ukupna elektrostatska sila na čestici je produkt naboja čestice i jačine električnog polja:

$$M_{\check{c}} F_E = q E_p^{**}$$

$M_{\check{c}}$ – masa čestice, kg

q – naboj na čestici, C

E_p – jačina električnog polja na sabirnoj elektrodi, V/m

U većini ESP primjenjuje se negativna korona. Velik negativan napon (ponekad do 100 000 V) ionizira molekule plina i stvara slobodne elektrone koji putuju prema uzemljenoj ploči.

Teorijski naboj zasićenja na čestici dan je izrazom:

$$q = \pi d_{\check{c}}^2 \varepsilon_0 K E_{ip} = \pi d_{\check{c}}^2 \varepsilon_0 \left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) E_{ip}$$

$d_{\check{c}}$ – promjer čestice, m

ε_0 – dielektrična konstanta vakuuma, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ C/V m

K – konstanta korekcije

E_{ip} – jačina ionizacijskog polja, V/m

gdje je:

$$K = \frac{3\varepsilon}{(\varepsilon + 2)}$$

ε - dielektrična konstanta za česticu u odnosu na slobodan prostor (2-8; $\cong 3,7$); uglavnom iznosi 1 za vakuum; 1,0006 za zrak, 4-6 za uobičajene krute čestice)

K uglavnom iznosi: 1,5 - 2,4 (uglavnom se primjenjuje na čestice $< 5 \mu\text{m}$)

Kombiniranjem izraza *, ** i *** dobiva se izraz za teorijsku brzinu gibanja/taloženja čestica oblika kugle u elektrofiltru (za sferne čestice):

$$v_t = \frac{Cd_{\check{c}}}{3\mu} \varepsilon_0 K E_{ip} E_p \quad K = \frac{3\varepsilon}{(\varepsilon + 2)}$$

ili

$$v_t = \frac{q \cdot E_p \cdot C}{3\pi \cdot \mu \cdot d_{\check{c}}}$$

- u praksi se koristi v_e – djelotvorna brzina gibanja za čestice razl. oblika i veličine (na temelju ranijeg iskustva); npr. $v_e = 2-20$ cm/s za pepeo ugljena, 6-8 cm/s za pare sumporne kiseline, 6-7 za prašinu cementa...

gdje je:

C- Cunninghamov korekcijski faktor

μ - viskoznost plina, kg/ms

Jakosti polja E_{ip} i E_p zavise od jačine narinutog napona i udaljenosti elektroda. E_{ip} je vrlo teško odrediti, pa se uzima da je $E_{ip} = E_p$ (ili E_c).

U praksi se ponekad koristi i sljedeći jednostavniji izraz za proračun brzine taloženja čestica u ESP :

$$v_t = 1,06 \cdot 10^{-14} \left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \frac{E_c^2 d_{\check{c}} K_c}{\mu}$$

$$K_c = 1 + 0,00973 \left(\frac{T^{1/2}}{d_{\check{c}}} \right)$$

v_t [m/s]

E_c [V/m]

η [kg/mh]

$d_{\check{c}}$ [μm]

T [K]

Izvedbene jednadžbe elektrofiltra

- **Dizajniranje ESP uključuje:**

određivanje veličine i konfiguracije ploča, izračunavanje potrebne elektr. energije i dr.

A- aktivna površina ploča (ne ukupna površina!)

- u seriji od n ploča onečišćeni plin prolazi između $n-1$ ploča

$$A = A_p (n - 1) N_s = A_p (N - N_s)$$

A_p – površina ploče (dvije strane)= $2HL_p$

n - broj paralelnih ploča

N – ukupni broj ploča u ESP

N_s – broj sekcija u smjeru strujanja

izraz omogućava izračunavanje broja potrebnih ploča ESP, N

- **Izračunavanje ukupne površine sabirnih ploča, A** za postizanje željenog stupnja učinkovitosti:

$$\eta = 1 - e^{(-v_t A/Q)}$$

$$\ln(1 - \eta) = -\frac{v_t A}{Q} \quad \Rightarrow \quad A = -\frac{Q \ln(1 - \eta)}{v_t}$$

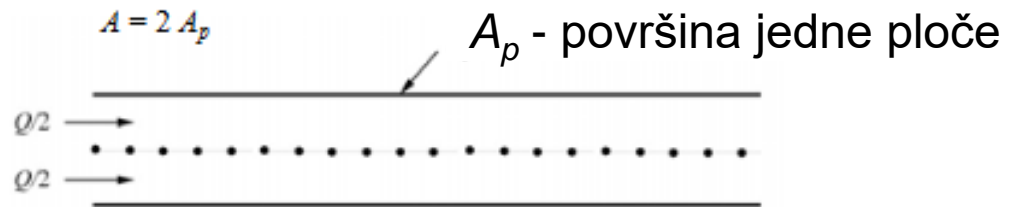
Ukoliko je poznat broj sekcija u smjeru toka, N_s i površina jedne ploče, A_p moguće je izračunati **ukupan broj potrebnih ploča ESP, N**:

$$A = A_p (N - N_s) \quad \Rightarrow \quad N = \frac{A}{A_p} + N_s$$

Ako se ukupna sabirna površina podijeli na niz ploča:

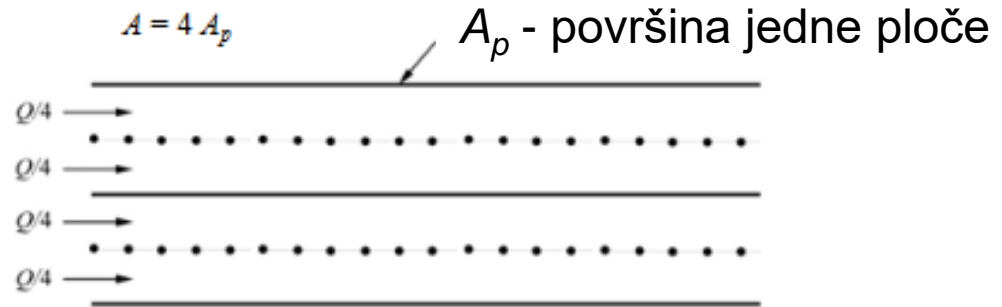
Jedan prolaz između
dvije ploče:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{v_t(2A_p)}{Q}\right)$$
$$= 1 - \exp\left(-\frac{v_t A}{Q}\right)$$



Dva prolaza između tri
ploče:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{v_t(4A_p)}{Q}\right)$$
$$= 1 - \exp\left(-\frac{v_t A}{Q}\right)$$



Unutarnja konfiguracija elektrofiltra

Broj kanala, N_d = broj ploča -1, tj. **$N_d = n - 1$**

$$N_d = \frac{Q}{uDH}$$

N_d - broj kanala

Q – ukupni volumni protok plina u elektrofiltru, m^3/min

u – linearna brzina plina u elektrofiltru, m/min

D – širina kanala, m (pločasti elektrofilter)

H – visina ploče, m

Ukupna dužina precipitatora, L_0

$$L_0 = N_s L_p + (N_s - 1) L_s + L_{ul} + L_{izl}$$

L_0 - ukupna dužina, m

N_s - broj električnih sekcija u smjeru strujanja; (2-8)

L_p - dužina ploče, m; (1- 4 m)

L_s - udaljenost između električnih sekcija, m; (0,5-1,5 m)

L_{ul} - dužina ulaznog dijela, m; (nekoliko metara)

L_{izl} - dužina izlaznog dijela, m; (nekoliko metara)

visina ploče, H za velike elektrofiltre: 6-12 m

ukupna visina elektrofiltra: 1,5 - 3 puta > H

(zbog visine taložnika, itd.)

Broj sekcija, N_s u smjeru strujanja može se procijeniti pomoću izraza:

$$N_s = \frac{RH}{L_p}$$

N_s – broj sekcija u smjeru strujanja (cjelobrojni!)

R – karakterističan omjer (=ukupna dužina ploče/visina ploče)

L_p – dužina ploče, m

Ukupna sabirna površina, A_a [m^2]:

$$A_a = 2HL_pN_sN_d$$

H – visina ploče, m

L_p – dužina ploče, m

N_s – broj sekcija

N_d – broj kanala

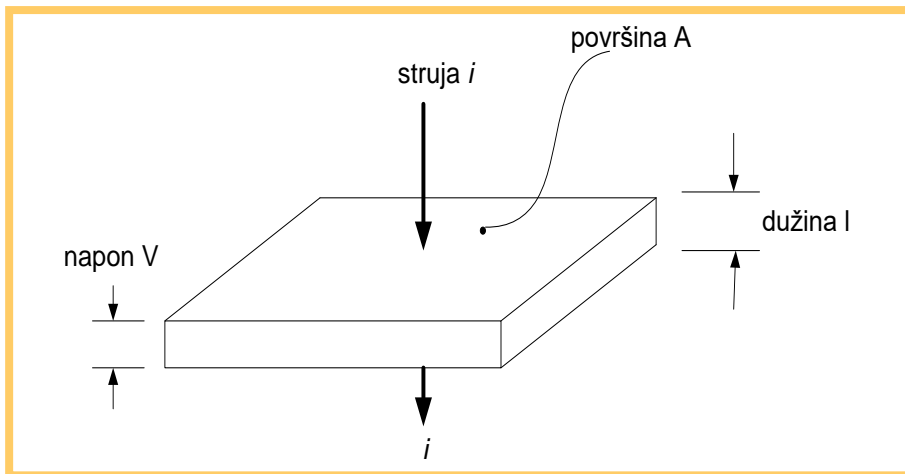
Učinkovitost ESP povećava se s porastom broja sekcija, međutim s porastom broja sekcija rastu i kapitalni troškovi!

Korona

- **korona** - ionizacija molekule plina s elektronima velikog sadržaja energije u području jakog električnog polja; suvišak elektrona generiranih u koroni lako se veže uz elektronegativne plinove, kao što su O_2 , CO_2 ili SO_2
- ubrzanje elektrona je funkcija jačine električnog polja; kako jačina polja opada s porastom udaljenosti od ionizacijske elektrode – **proces ionizacije je ograničen na usko područje blizu ionizacijske elektrode**
- negativni ioni adsorbiraju se na čestice koje zatim migriraju do uzemljene elektrode; uobičajeno su ionizacijske elektrode (žice) nabijene energijom dok su sabirne elektrode uzemljene; međutim žice mogu postići i pozitivnu koronu
- **negativna korona** (u kojoj žice imaju negativan naboj) ima bolje napon-struja značajke i češće se koristi u industriji (ali proizvodi više O_3 nego pozitivna korona); zbog toga se **pozitivna korona** koristi kod svih primjena vezanih uz pročišćavanje zraka unutrašnjih prostora
- u slučaju elektropozitivnih spojeva, kao što su N_2 , H_2 , He, Ne, i Ar – naboj se prenosi slobodnim elektronima

Otpornost čestica na električnu vodljivost, P

- otpornost lebdećeg pepela - **mjera njegove otpornosti na električnu vodljivost** (ako je premalena - čestica je dobar vodič, ako je prevelika- čestica je dobar izolator)
- **otpornost na el. vodljivost, P** određuje se eksperimentalno propuštanjem struje kroz ploču poznate geometrije



$$P = \frac{RA}{l} = \frac{VA}{i l}$$

P- otpornost čestica na el. vodlj., $\Omega \text{ cm}$

R- el. otpor, Ω

A – površina sab. elektrode okomita na tok struje, cm^2

l – duljina puta u smjeru struje (ili debljina sloja čestica), cm

V – napon, V

i - struja, A

P: 10^{-3} - $10^{14} \Omega \text{ cm}$

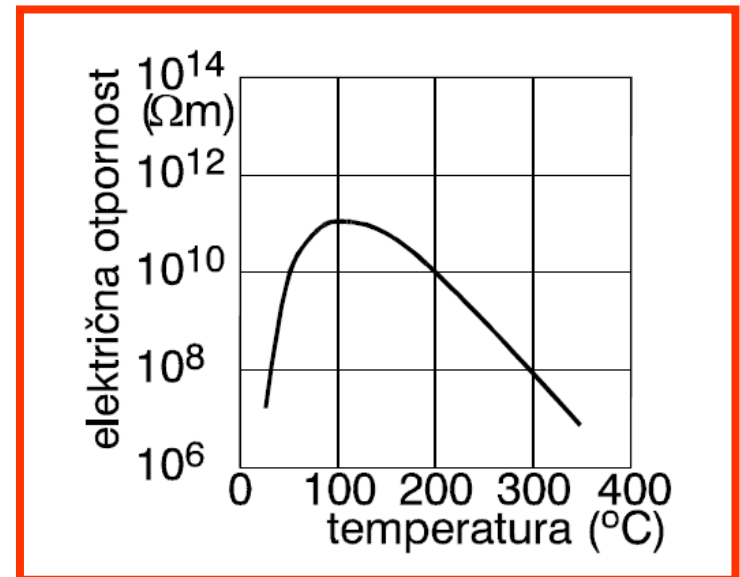
- lebdeći pepeo ugljena: 10^8 - $10^{13} \Omega \text{ cm}$

- suhi cement: $> 10^{13} \Omega \text{ cm}$

- iznad $10^{11} \Omega \text{ cm}$ - otežan rad ESP

S obzirom na otpornost čestica na električnu vodljivost, P razlikujemo sljedeća područja:

1. $P \leq 10^4$ [Ωcm] –
čestice imaju relativno veliku elektr. vodljivost
2. $10^4 \leq P \leq 10^{10}$ [Ωcm] –
gotovo idealni uvjeti za uklanjanje čestica u ESP
3. $10^{10} \geq P$ [Ωcm] –
učinkovitost je mala

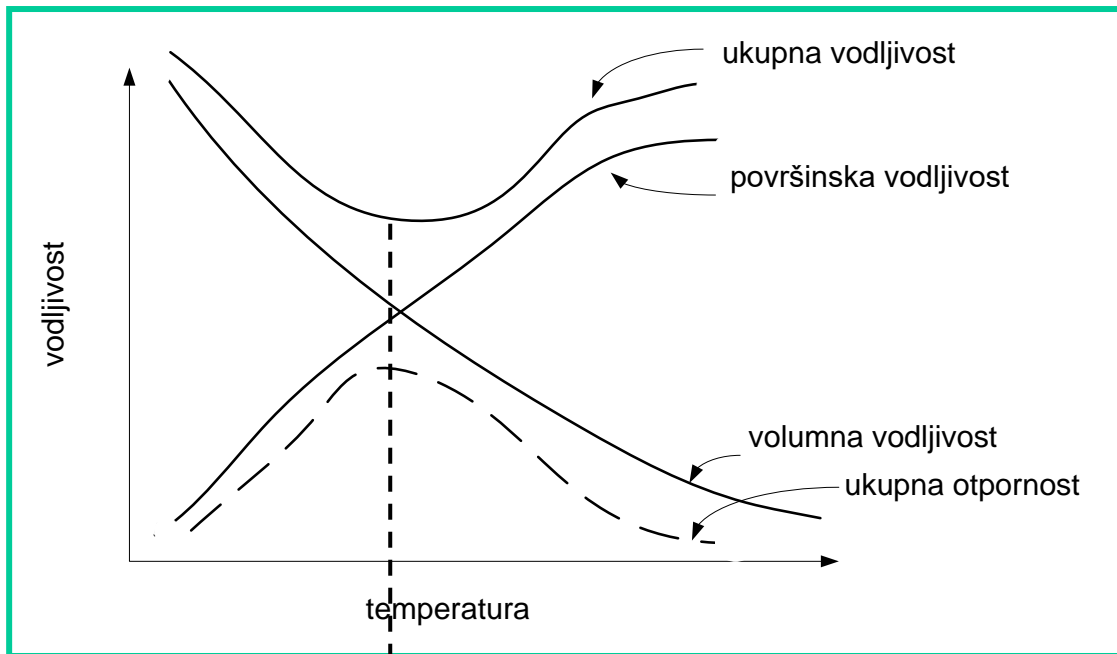


100-200 $^{\circ}\text{C}$

električna otpornost = 1/ električna vodljivost

Čimbenici koji utječu na otpornost lebdećeg pepela na električnu vodljivost:

- temperatura
- kemijski sastav (lebdećeg pepela i dimnih plinova)



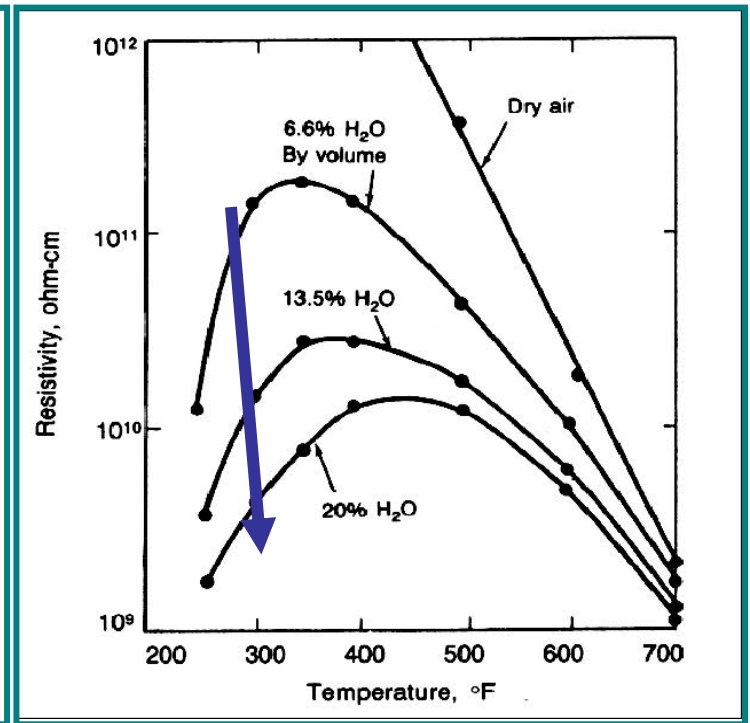
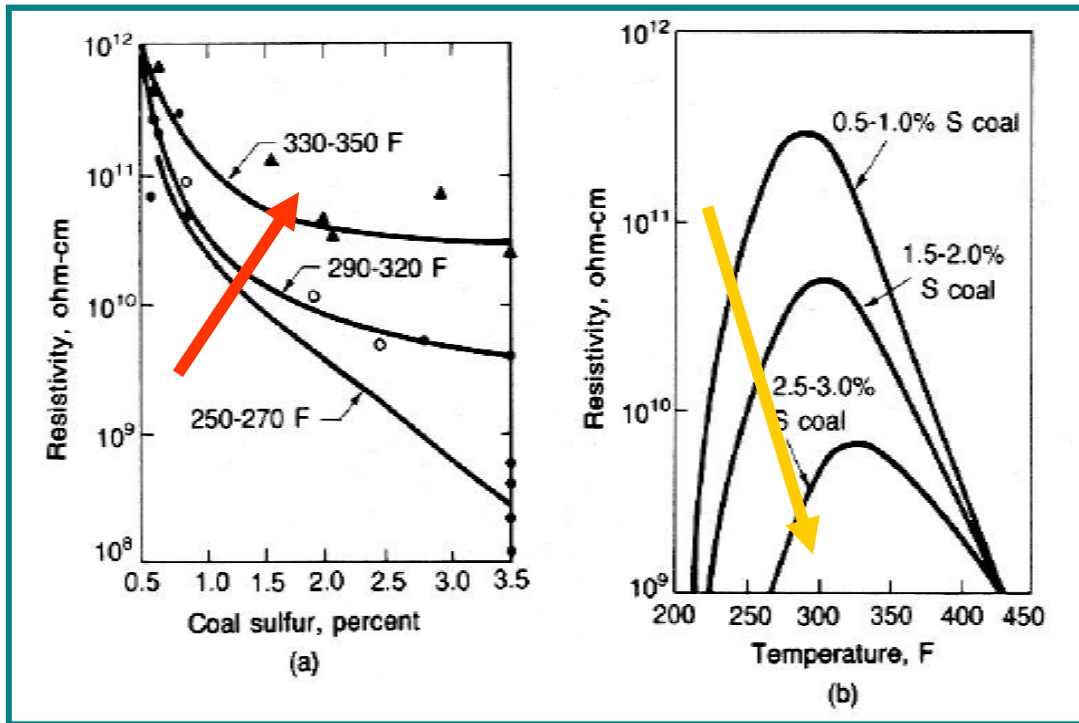
Vodljivost sloja čestica je rezultat utjecaja:

- **volumne vodljivosti** (sam materijal) i
- **površinske vodljivosti** (putem adsorbiranih plinova ili kapljevina)

Odnos temperatura/vodljivost

- kod parnih kotlova maksimalne vrijednosti otpornosti na el. vodljivost postižu se pri $T=120 - 177\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rizik od smanjenja T ispod $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ zbog kondenzacije H_2SO_4 ; dok pri $T > 177\text{ }^{\circ}\text{C}$ dolazi do nepotrebnog gubitka topline na dimnjaku)

Elektrofiltri i otpornost lebdećeg pepela na električnu vodljivost



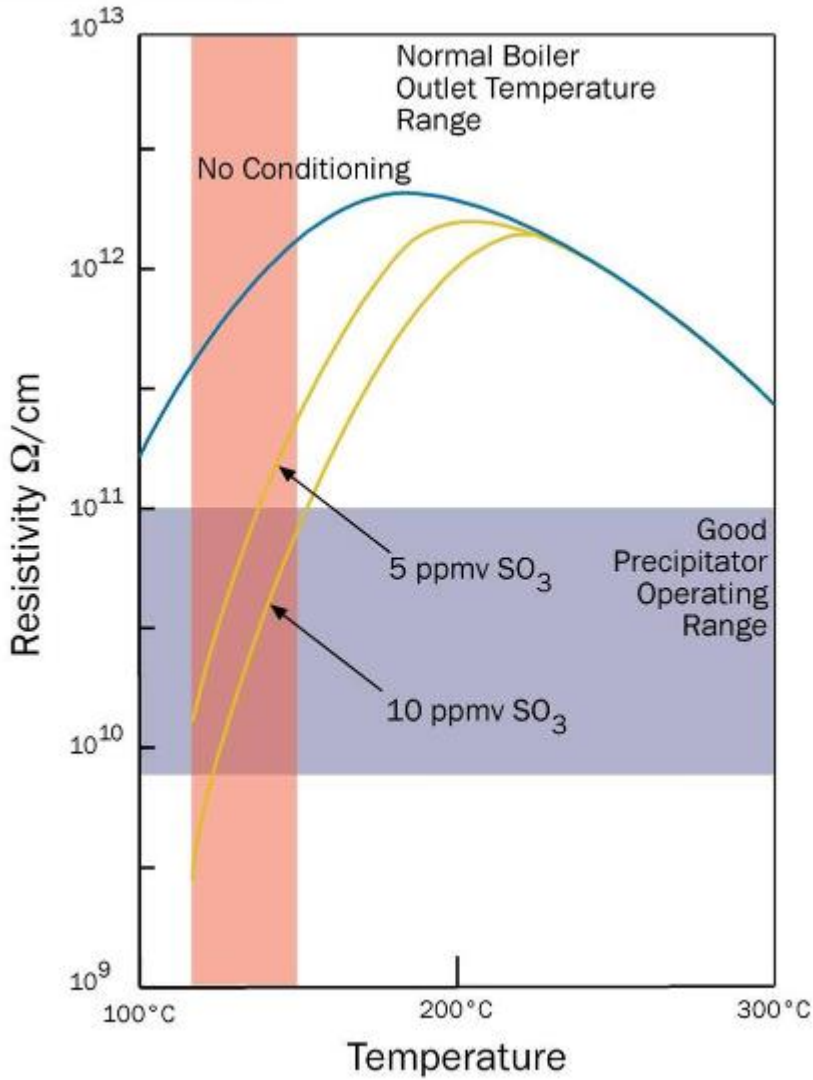
Utjecaj temperature i sadržaja sumpora

(300 °F ~ 150 °C, 200 °F ~ 95 °C,
450 °F ~ 220 °C);

Oprez: T↓ može dovesti do kondenzacije
H₂SO₄ i korozije

Utjecaj vlažnosti

- kondicioniranje
otpadnog plina s H₂O (ili
SO₃, Na- ili amonijeve soli)



kondicioniranje s SO_3

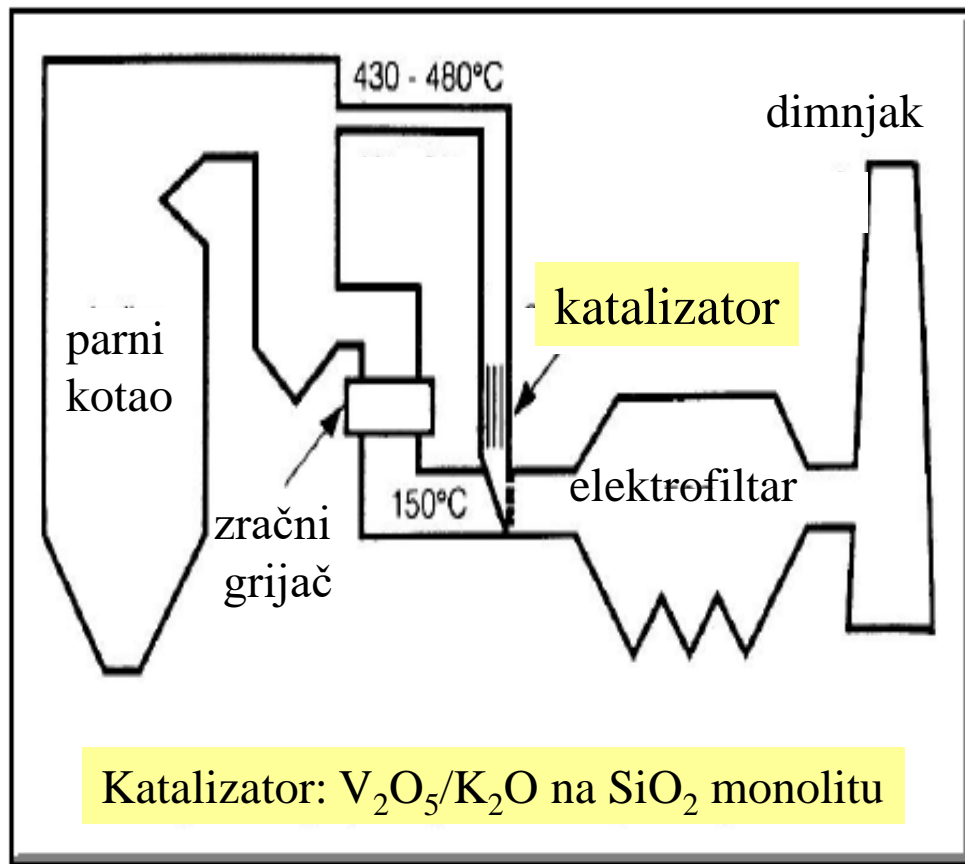
https://www.eecpowerindia.com/codelibrary/ckeditor/ckfinder/userfiles/files/ESP_Steag%20session%20part%201.pdf

Utjecaj promjene radnih uvjeta na učinkovitost ESP

- kod elektrana na ugljen zbog prelaska na ugljen s manjim sadržajem sumpora može doći do naglog pada učinkovitosti ESP i povećanih emisija; taj problem se može riješiti:
 - instaliranjem novih separacijskih jedinica (npr. vrećastih filtara), ili
 - primjenom većih ESP, ili
 - **kondicioniranjem** ...(jako praktično i ekonomski isplativo rješenje, naročito u cementnoj industriji – u tom slučaju dovoljno je kondicioniranjem s vodom (npr. injektiranjem pare ili raspršivanjem vode u plinsku struju – potreban oprez kod injektiranja prevelike količine vode)

Poboljšanje učinkovitosti elektrofiltra

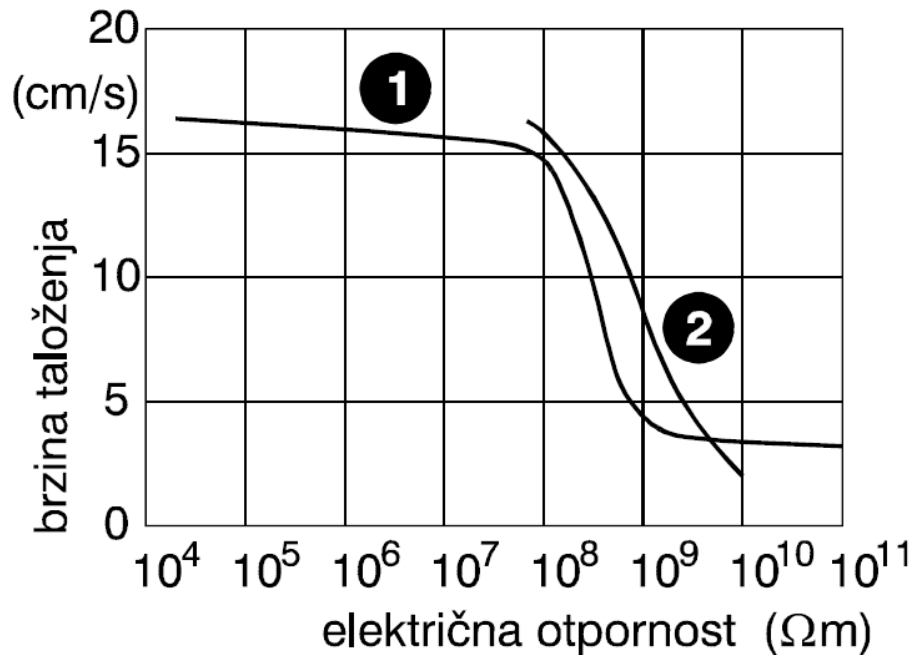
- *kondicioniranjem otpadnog plina prije ulaza u elektrofilter*



- dio otpadnog plina (1-3%) (koji obično sadrži nekoliko tisuća ppm SO₂) **provodi se kroz sloj katalizatora** gdje dolazi do oksidacije SO₂ u SO₃ (u cilju povećanja el. vodljivosti i učinkovitosti elektrofiltra)

- moguće je i **kombinirano injektiranje SO₃ i NH₃**

Ovisnost brzine taloženja čestica o električnoj otpornosti



Brzina taloženja odn. učinkovitost ESP opada s porastom električne otpornosti iznad 10⁸ Ωcm, a električna otpornost pepela ugljena raste sa smanjenjem sadržaja hlapljivih spojeva i S u gorivu

Povećanje učinkovitosti ESP (filtra):

- ugradnjom u području temperatura dimnih plinova između 350 i 400 °C (ispred predgrijača zraka ili vode)
- ovlaživanjem plinova prije ulaza u filter

Izvedbeni parametri (unutarnja konfiguracija) za elektrofilar lebdećeg pepela i njihove uobičajene vrijednosti

parametar	područje vrijednosti
brzina taloženja u smjeru osi y, v	1,0-10 m/min
širina kanala, D	15-40 cm
specifična površina (površina ploče/protok plina)	0,25-2,1 m ² /(m ³ /min)
brzina strujanja plina, u	1,2-2,5 m/s (70-150 m/min)
karakteristični omjer R (=dužina kanala/visina ploče)	0,5-1,5 (ne manje od 1,0 za $\eta > 99\%$)
omjer snage korone (P_c/Q) (snaga korone/protok plina)	1,75-17,5 W/(m ³ /min)
omjer struje korone, I_c/A (struja korone/površina ploče)	50-750 $\mu\text{A}/\text{m}^2$
gustoća snage vs otpornost na el. vodljivost: <div style="text-align: right; margin-right: 20px;"> <u>otpornost pepela, Ω cm</u> 10^4-10^7 10^7-10^8 10^9-10^{10} 10^{11} 10^{12} 10^{13} </div>	<u>gustoća snage, W/m²</u> 43 32 27 22 16 10,8
površina ploče po električnom setu A_s	460-7400 m ²
broj električnih sekcija a) u smjeru strujanja plina, N_s b) ukupni, N_t	2 - 8 1-10 sekcija/(1000 m ³ /min)

Snaga ESP

Postoje dva izvora potrošnje energije u elektrofiltru:

- snaga korone (glavni izvor potrošnje E)
- pad tlaka (relativno mali, ali velik je volumni protok plina, pa je potrebna snaga za rad ventilatora za propuštanje zraka kroz elektrofilter)

Snaga korone:

$$P_k = I_k V_{pr.}$$

P_k – snaga korone, W

I_k – struja korone, A

$V_{pr.}$ – prosječni napon, V

Napon kroz elektrofilter je relativno velik, međutim tok struje uslijed migracije iona je malen, pa potrebna snaga nije jako velika.

Prosječna brzina taloženja (White, 1977):

$$v_t = \frac{kP_k}{A}^*$$

v - procesni parametar,
pa se može odrediti samo
eksperimentalno

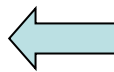
k - ugodiva konstanta (uglavnom iznosi 0,5-0,7)

- omjer P_k/A – **gustoća snage** (raste od ulaza do izlaza ponekad i za faktor 10, međutim ukupna gustoća snage, tj. omjer ukupne snage korone/ukupne površine ploča je stabilan i reprezentativan)

- uvrštavanjem izraza * u Deutschovu jednadžbu:

$$\eta = 1 - e^{(-kP_k/Q)}$$

$$\eta = f(P_k)$$



$$\eta = 1 - e^{(-v_t A/Q)}$$



- pad tlaka ESP je malen zbog male brzine strujanja plina
- ESP obično se projektiraju za određeni stupanj odvajanja čestica (između 90 i 99 %)
- predstavljaju jedan od najčešćih uređaja za otprašivanje plinova
- rade pri različitim uvjetima:
protoci: $1-10\ 000\ \text{m}^3\text{min}^{-1}$
koncentracije čestica: $0,0002-200\ \text{g m}^{-3}$
čestice veličine $0,1-200\ \mu\text{m}$ mogu se ukloniti s učinkovitošću od 99,9 % (povećanje kapaciteta postiže se paralelnim postavljanjem više cijevi ili pločastih elemenata)

Troškovi nabave ESP, P

~ukupnoj sabirnoj površini ploča ESP, A

- Vataavuk (1990): $P = aA^b$

P - troškovi nabave, u dolarima

(u odnosu na 1998. godinu, ali cijena elektrofiltara nije se bitno mijenjala)

A - ukupna sabirna površina ploča, m²

a, b – konstante zavisne o A

$$930 \text{ m}^2 < A < 4650 \text{ m}^2 \Rightarrow a = 962; \quad b = 0,628$$

$$4650 \text{ m}^2 < A < 92900 \text{ m}^2 \Rightarrow a = 90.6; \quad b = 0,843$$

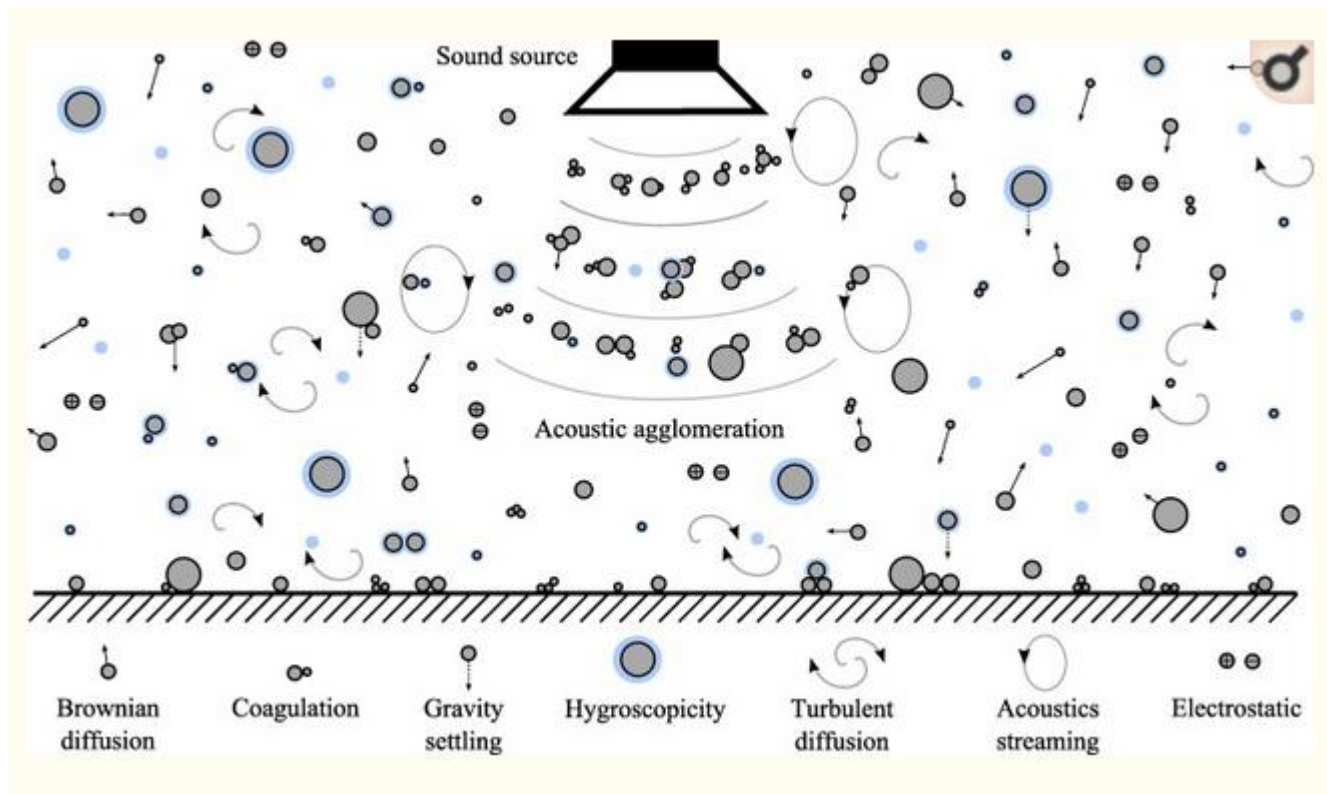
Radni troškovi ESP

- potrošnja električne struje (korona i ventilator)
- troškovi održavanja (elektrode, sustav za rukovanje pepelom i sl.) i troškovi rada

Akustična koagulacija

- U uobičajenom sustavu za klimatizaciju zraka i mehaničku ventilaciju (ACMV) 15% do 30% potrošnje energije odnosi se na distribuciju zraka, a veći dio na rad ventilatora kako bi se svladali gubici (pad tlaka) u distribucijskim kanalima i na filterima.
- Zračni filteri neophodni su da bi se smanjila izloženost ljudi suspendiranim PM i bioaerosolima.
- Da bi se smanjila potrošnja energije, a istovremeno održale mogućnosti filtriranja ACMV sustava, moguće rješenje je **predkondicioniranje PM-a da bi se postigle dimenzije PM-a koje će filteri moći učinkovitije ukloniti**. Mogući pristup uključuje **primjenu akustičke aglomeracije i koagulaciju čestica prije procesa filtriranja**.

- **Akustična aglomeracija** - postupak u kojem se akustički valovi koriste za manipuliranje kretanjem čestica u zraku i pritom se potiče nastajanje sudara koji dovode do stvaranja aglomerata (nakupina čestica).
- Novonastali aglomerati nastavljaju se aglomerirati s drugim česticama i rezultiraju kaskadnim rastom čestica.



Mehanizmi prijenosa čestica koji uključuju: Brownovu difuziju, koagulaciju, gravitacijsko taloženje, higroskopnost, turbulentnu difuziju, akustično strujanje i elektrostatiku. **Akustična aglomeracija prisilni je mehanizam induciran akustičnim valovima.**

Sile koje djeluju na čestice (PM_{2,5}) u akustičnom polju

Sile	Veličina (N)
Viskozne sile	10^{-3} to 10^{-5}
Sile gradijenta tlaka (akustične)	10^{-11} to 10^{-12}
Inercijske sile	10^{-15} to 10^{-18}

- **Sile gradijenta tlaka koje proizlaze iz akustike znatno su veće od inercijskih sila**, što omogućava finim česticama da osciliraju s akustičkim valovima i pospješuje aglomeraciju.
- **Akustička aglomeracija je prisilni mehanizam kod kojeg prosječni porast radijusa čestica nakon 1 do 5 sekundi izlaganja akustičnim valovima može biti za jedan ili dva reda veličine.**

Primjena

- Tehnologija akustičke aglomeracije koristi se **za uklanjanje visoke koncentracije čestica u tekućim i plinovitim medijima u industrijama kao što su kemijska prerada, nafta i plin, proizvodnja hrane i zaštita okoliša.**
- **Naglasak je na finim česticama koje čine značajan dio emisije čestica koje je teško ukloniti drugim separacijskim tehnologijama.** Npr. ciklonski separatori koji se koriste za smanjenje industrijskih emisija iz procesa izgaranja imaju relativno malu učinkovitost (<40%) ukoliko se radi o česticama manjim od 5 μm .
- **Primjenom akustičkog predkondicioniranja, fine čestice tvore nakupine koje su dovoljno velike i mogu se učinkovito ukloniti primjenom kaskadnih ciklonskih separatora.**

- Osim smanjenja emisija iz industrije postoji mogućnost primjene u ACMV sustavima za uklanjanje PM i bioaerosola, gdje je uobičajena učinkovitost filtra relativno niska za čestice u rasponu veličina od 0,01 μm do 2 μm .
- Pretpostavka je da fine PM čestice i bioaerosoli mogu kondicionirati pomoću akustičke aglomeracije da bi se stvorile veće nakupine čestica koje se filtriranjem lakše uklanjaju. **To je moguće postići bez potrebe za učinkovitijim filtrima koji uzrokuju i veći otpor protoku zraka.**
- U nedavnom istraživanju dokazano je da tehnika akustičke aglomeracije (1,4 kHz i 148 dB) **poboljšava učinkovitost vrećastih filtera do 99%.**

Akustična svojstva

- Osnovni pokretač akustičke aglomeracije je ***svojstvo zvučnog signala***.
- Akustična frekvencija, intenzitet i vrijeme zadržavanja dominantni su čimbenici koji utječu na zadržku čestica, brzinu aglomeracije i izloženost zvučnom po

Frekvencija

- Stupanj privlačenja čestica u zvučnom polju ovisi o akustičkoj frekvenciji. Niže frekvencije u zvučnom području učinkovite su za nakupljanje čestica mikronskih i submikronskih veličina, a više frekvencije u ultrazvučnom području bolje djeluju za čestice submikronskih veličina. Drugim riječima, za čestice većih promjera i veće gustoće bit će potrebne niže akustičke frekvencije.
- Nađeno je da za određene raspodjele veličina čestica postoji optimalna frekvencija za postupak koalescencije, a optimalna frekvencija smanjuje se s akustičkim intenzitetom.

Intenzitet

- Brzina aglomeriranja, strujanje i početak akustične turbulencije ovise o intenzitetu zvuka.
- Postoji gotovo linearna veza između početne brzine akustičke aglomeracije i primijenjene zvučne snage.

Vrijeme zadržavanja

- Vrijeme zadržavanja određuje stupanj izloženosti zvučnom polju i linearno je povezano s rastom veličine čestica.
- Za svaku specifičnu zvučnu frekvenciju postoji ograničeno vrijeme zadržavanja tijekom kojeg se može održavati učinkovita aglomeracija čestica.
- S povećanjem vremena zadržavanja, čestice se aglomeriraju u veće čestice i postižu novu spektralnu raspodjelu. Kao rezultat, privlačenje čestica se smanjuje i potrebni su novi akustični parametri ukoliko je potrebna daljnja aglomeracija.

Ostali parametri

- uvođenje dodatnih čestica koje potiču aglomeriranje finih PM u fluidu,
- kapljice vode koje pospješuju aglomeriranje zbog procesa kondenzacije,
- blago povišena temperatura, itd.