# Elektrostatski filter

**Jakovac, Martin**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:754706

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-29**

*Repository / Repozitorij:*

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKUFAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**STRUČNI STUDIJ**

# ELEKTROSTATSKI FILTER

**ZAVRŠNI RAD**

**MARTIN JAKOVAC**

**OSIJEK 2017**

Sadržaj:

1. UVOD ..... 1
2. OSNOVE ESP-a ..... 2
2.1 Princip rada ..... 2
2.2 Primjena ESP-a ..... 3
2.3 Prednosti i nedostatci ESP-a ..... 3
3. PODJELE ELEKTROSTATSKOG FILTERA (ESP-A) ..... 5
3.1 Pločasto - žičani ESP ..... 6
3.2 Pločasti ESP ..... 8
3.3 Cjevasti Esp ..... 9
3.4 ESP s vodenim ispiranjem ..... 10
3.5 Dvostupanjski ESP ..... 10
4. POMOĆNA OPREMA ..... 12
5. ELEKTROSTATIKA ESP-A ..... 14
5.1 Električna radna točka ..... 14
5.2 Nabijanje čestica ..... 17
5.3 Prikupljanje čestica ..... 19
5.4 Plin koji se provuče pokraj kolektorske zone (“Sneakage“) i gubitci pri treskanja ..... 22
5.5 Električni otpor čestica ..... 23
6. ZAKLJUČAK : ..... 25
LITERATURA: ..... 26
SAŽETAK ..... 27
ABSTRACT ..... 28
ŽIVOTOPIS ..... 29

# 1. UVOD

Elektrostatski filter (ESP) koristi električne sile za prikupljanje čestica iz strujanja otpadnog plina (aerosola). Prva upotreba ovakvog uređaja je zabilježena 1824. godine, ali se tek stoljeće kasnije počinje komercijalno upotrebljavati. Frederick Gardner Cottrell, profesor kemije na Kalifornijskom sveučilištu prvi je 1907. godine usavršio patent uređaja za elektrostatsko nabijanje čestica te njihovo prikupljanje na kolektorske ploče – prvi elektrostatski filter. ESP-ovi se svrstavaju u visoko-učinkovite kolektore u usporedbi s ostalima filterima jer su u mogućnost ostvariti učinkovitost od čak 99,5 %. Glavna karakteristika koja izdvaja ESP-ove od ostalih visoko-učinkovitih filtera je što svu svoju primarnu energiju usmjerava na čestice a ne na strujanje plina. Zbog sve strožih ekoloških zakona, ESP je postao bitan dio gotovo svih grana industrije i termoelektrana.

Rad je podijeljen u pet cjelina:

1. Uvod
2. Osnove ESP-a
3. Podjele ESP-a
4. Dodatna (pomoćna) oprema ESP-a
5. Elektrostatika ESP-a

Prva cjelina je uvod u rad. Druga cjelina se dijeli na tri dijela, princip rada ESP-a, primjenu ESP-a te prednosti i nedostatke istog. U prvom dijelu je opisan princip rada u tri osnovna koraka te pojava korone. U drugom dijelu su navedena tipična mjesta primjene ESP-a a u trećem dijelu su navedene prednosti i nedostatci sustava.

U trećoj cjelini su opisani načini podjela ESP-a, te su pojedinačno detaljno opisane vrste podjele ESP-a prema tipu izvedbe.

Dodatna ili pomoćna oprema u četvrtoj cjelini opisuje svu opremu koja je neophodna za rad ESP-a a nalazi se prije ili poslije samog filtera.

U petoj cjelini je opisana elektrostatika ESP-a, preko matematičkih izraza. Opisana je električna radna točka, nabijanje čestica, prikupljanje čestica, gubitci i učinkovitost ESP-a.

# 2. OSNOVE ESP-a

## 2.1 Princip rada

Rad ESP-a se bazira na tri osnovna koraka:

1. čestice se nabijaju elektrostatskim nabojem djelovanjem ionizacijske elektrode (pojava korone)
2. čestice se uklanjaju iz strujanja plina pod utjecajem jakog električnog polja i nakupljaju na površini kolektorske elektrode
3. čestice se uklanjaju s površine elektroda i skupljaju u spremnicima za odlaganje

Čestice se električni nabijaju prisilnim prolaskom kroz koronu. Korona nastaje kada električno polje oko elektroda postane dovoljno jako da izazove proboj zraka. Granična vrijednost za nastanak korone ovisi o obliku i razmaku elektroda, narinutom naponu te vlazi, gustoći, temperaturi i vodljivosti plina.

Pojava je jača što je radijus zakrivljenja površine izbijanja manji (zbog toga su ionizirajuće elektrode najčešće u obliku žice). Izazivanje korone je najjednostavniji i najjeftiniji način za ionizaciju plina. Korona može nastati na elektrodi bez obzira dali je priključena na pozitivni ili negativno napon ali je negativna korona puno stabilnija od pozitivne te narinuti napon može biti viši kada je elektroda negativna. Zbog toga je ionizirajuća elektroda najčešće negativnog napona. Kolektorske elektrode mogu biti u obliku cijevi ili ploča da bi se mogućnost pojave korone svela na minimum.

Kad se čestice prikupe na pločama, one se moraju ukloniti s ploča bez ponovnog vraćanja u strujanje plinova. To se obično postiže treskanjem ploča, čime sakupljeni sloj čestica otpada te klizi prema dolje u spremnik otpadnih čestica. Postoje i filteri s vodenim ispiranjem čestica koje može biti isprekidano ili kontinuirano.

## 2.2 Primjena ESP-a

Primjena ESP-ova je jako opširna, koriste se gotovo u svim granama industrije i termoenergetike:

- termoelektrane ( TE Plomin 1 i Plomin 2)
- spalionice i postrojenja za sinteriranje
- industrija cementa
- proizvodnja gipsa, $H_2SO_4$, fosfora, čađi
- katalitički kreking nafte
- metalurška industrija

Razvila se i primjena sustava za kondicioniranje zraka kućnih sustava, javnih građevina itd. (ionizatori zraka).

## 2.3 Prednosti i nedostatci ESP-a

Kao i svaki sustav tako i ESP ima svoje prednosti i nedostatke.

Prednosti su:

- veliki raspon veličine čestica koje može ukloniti (0,01 – 500 μm)
- velika učinkovitost > 99,5 %
- podržavaju veliki protok plina ($10^5$ - $10^6$ $m^3/h$)
- mogu raditi na velikim opsezima temperatura
- kratko vrijeme obrade plina (0,1 – 10 s)
- dugotrajan i kontinuiran rad
- mali troškovi rada
- mala potrošnja energije

Nedostatci su :

- veliki investicijski troškovi
- nemogućnost korištenja u promjenjivim uvjetima rada (promjena temperature, protoka ili količine čestica ).
- ne smanjuju emisiju plinova
- ne može se koristiti kod eksplozivnih i zapaljivih plinova
- zahtijevaju veliku površinu za instalaciju
- nisu pogodni za rad s česticama koje vode struju
- nastajanje ozona koji je opasan za ljude pri ionizaciji



**Sl. 2.1.** *Elektrostatski filter*

# 3. PODJELE ELEKTROSTATSKOG FILTERA (ESP-A)

Elektrostatski filteri se konfiguriraju na nekoliko načina. Neke od konfiguracija su se razvile radi posebnih svrha kontrole, a drugi su se razvili iz ekonomskih razloga. ESP možemo podijeliti prema tipu izvedbe, prema postupku odstranjivanja čestica, prema naponu i prema broju stupnjeva.

Tipovi elektrostatskog filtera su:

1. Pločasto - žičani ESP, najčešći tip
2. Pločasti ESP
3. Cjevasti ESP
4. ESP s vodenim ispiranjem (može ga imati bilo koja od prethodnih konfiguracija)
5. Dvostupanjski ESP

Postupak odstranjivanja čestica može biti :

1. Suhi postupak (uklanja vrijedne materijale)
2. Mokri postupak (učinkovitiji, ali je nužna daljnja obrada otpadne vode)

Podjela s obzirom na napon :

1. Visokonaponski ESP ( 30 – 100 kV)
2. Niskonaponski ESP (12 – 13 kV)

Podjela s obzirom na broj stupnjeva :

1. Jedno stupanjski ESP (ionizira plin i prikuplja čestice u jednom stupnju).
2. Dvostupanjski ESP (u prvom se dijelu čestice ioniziraju a u drugom skupljaju ).

## 3.1 Pločasto - žičani ESP

Pločasto-žičani ESP-ovi se koriste u širokom rasponu industrijskih primjena, uključujući i termoelektrane, spalionice i postrojenja za sinteriranje, industrija cementa, proizvodnja gipsa, $H_2SO_4$, fosfora, čađi, katalitički kreking nafte, metalurška industriji.

Sastoji se od:

- ionizacijske elektrode
- kolektorske elektrode
- visokonaponskih izolatora
- utega za učvršćivanje ionizacijske elektrode
- sabirnika čestica
- uređaja za treskanje
- brtvi koje zadržavaju tok plina unutar ESP-a

Plin struji između paralelnih ploča od lima i elektrode pod visokim naponom. Elektrode su duge žice učvršćene utezima i vješane između ploča. Prilikom protoka plin prolazi preko svake žice u segmentu.

Pločasto-žičani ESP omogućava mnogo linija toka da rade paralelno, a svaka linija može biti dosta visoka. Stoga je ovakav tip prikladan kod velikih protoka plina. Potreba za treskanjem ploča radi odstranjivanja prikupljenog materijala uzrokuje podjelu ploča u segmente, često tri ili četiri u nizu koje se mogu samostalno treskati. Napajanje se često razdjeljuje na isti način kako bi se dobili viši radni naponi. Prašina se također nakuplja na ionizirajućim elektrodama kao i na pločama kolektora pa ih je potrebno periodički očistiti.

Napajanje za ESP pretvara izmjenični napon (230/400 V) na pulsirajući istosmjerni napon u rasponu od 20 000 do 100 000 V ovisno po potrebi. Napajanje se sastoji od visokonaponskog transformatora, visokonaponskih ispravljača, a ponekad i kondenzatorskih filtera. Jedinica može isporučiti poluvalno ili punovalno ispravljeni istosmjerni napon. Za podešavanje napona se brinu pomoćne komponente i kontrole koje omogućuju podešavanje napona na najveću moguću razinu bez izazivanja prekomjernog iskrenja i radi zaštite napajanje i elektroda u slučaju pojave luka ili kratkog spoja.

Napon koji se narine na elektrode uzrokuje proboj zraka između elektroda te pojavu poznatu kao "korona". Elektrode obično imaju negativni polaritet jer negativna korona podržava viši napon prije iskrenja nego pozitivna korona. Ioni nastali pri koroni prate linije električnog polja od žica do kolektorskih ploča. Dakle, svaka žica uspostavlja zonu nabijanja preko koje čestice moraju proći.

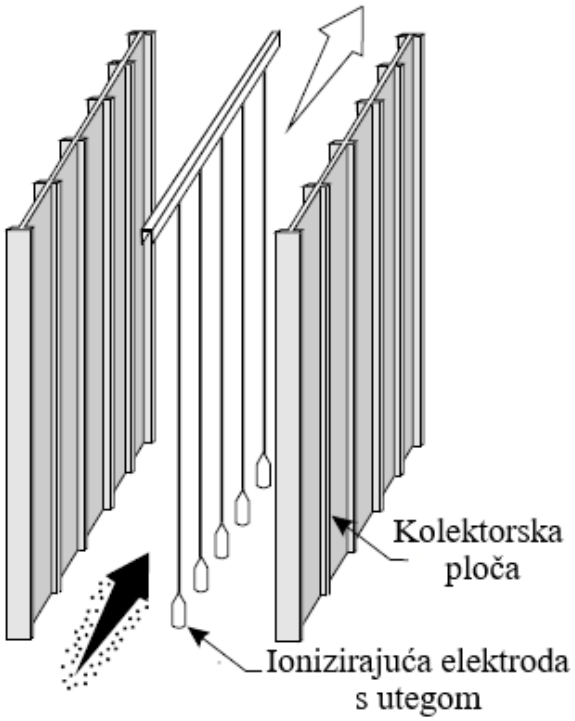
Čestice koje prolaze kroz zonu nabijanja presreću ione te ih skupljaju na sebe. Male čestice u plinu promjera do 1 μm mogu apsorbirati desetke iona prije nego njihov ukupni naboj postane dovoljno velik da odbije nove ione, a velike čestice promjera većeg od 10 μm mogu apsorbiraju desetke tisuća iona prije zasićenja što znači da su električne sile mnogo veće na velikim česticama.

Kako čestice prolaze kroz uzastopne žice, one su sve bliže i bliže kolektorskim pločama. Međutim turbulencije u plinovima otežavaju proces jer ih stalno miješaju s plinom. Postupak prikupljanja je stoga natjecanje između električnih i disperzivnih sila. S vremenom čestice se približe dovoljno blizu ploča da turbulencije padnu na niske razine te se tada događa sakupljene.

Ako se prikupljene čestice mogu stresti u spremnik bez gubitaka, ESP bi bio vrlo učinkovit. Treskanjem se određeni dio čestica (obično oko 12 %) vraća natrag u struju plina te izlaze u okoliš. Dio plina se uspije provući i pokraj zone nabijanja (“Sneakage“) , 5-10 % plina od ukupnog protoka te na taj način smanjuje efikasnog filtera.

Tako nastali gubitci imaju veliku ulogu u ukupnoj učinkovitosti ESP-a. Veliku ulogu igra i otpornost materijala (čestica). Budući da se skupljanjem čestica stvara sloj na ESP-ovim pločama, sve ionske struje moraju proći kroz sloj kako bi došle do jezgre ploča. Te struje stvaraju električno polje u sloju koje može postati dovoljno veliko da uzrokuje kvar na lokalnoj mreži. Kada dođe do ove pojave, moraju se ioni suprotnog polariteta ubrizgavati u prazninu između žica i ploča kako bi se smanjio naboj na česticama. Pri tome dolazi do velikog iskrenja. Ovo stanje kvara se naziva “povratna korona".

Povratna korona nastaje kada je otpornost sloja visoka, obično iznad $2 \times 10^{11}$ Ω/cm. Za niže otpornosti, rad ESP-a nije ugrožen povratnom koronom, ali otpornosti puno veće od $2 \times 10^{11}$ Ω/cm značajno smanjuju sposobnost skupljanja čestica jer povratna korona uzrokuje poteškoće u nabijanju čestica. Kod otpornosti ispod $10^8$ Ω/cm, čestice se drže na pločama tako slabo da često dolazi do odvajanja a ponovno spajanje na ploče postaje teško. Treba voditi računa o mjerenju i procjeni otpornosti jer je snažno vezana za varijable kao što su temperatura, vlažnost, sastav plina i čestica te površinske karakteristike.




**Sl. 3.1.** *Pločasto-žičani ESP*

## 3.2 Pločasti ESP

Većina manjih filtera koristi ploče umjesto žica za visokonaponske elektrode. Ploče (United McGill Corporation patents) povećavaju prosječno električno polje koje se koristi za sakupljanje čestica, te one pružaju povećanu površinu za prikupljanje čestica. Korona se ne može stvoriti na ravnim pločama, tako da su potrebne elektrode koje će ju proizvoditi te su one smještene ispred a ponekad i iza ploča u zoni prikupljanja čestica. Elektrode su izvedene kao oštre šiljaste igle pričvršćene za rubove ploča ili kao nezavisne žice za proizvodnju koronu. Za razliku od pločasto-žičanih ili cjevastih ESP-ova, ovaj dizajn radi jednako dobro bilo s negativnim ili pozitivnim polaritetom. Proizvođači su odlučili koristiti pozitivni polaritet kako bi se smanjila proizvodnja ozona koji je štetan za osoblje koje radi uz ESP.

ESP-ovi s ravnim pločama rade s malom ili bez struje korone koja teče kroz sakupljenu prašinu, osim izravno ispod igala ili žica za koronu gdje je to neizbježno. Ovo ima dvije posljedice. Prva je da je jedinica nešto manje osjetljiva na povratnu koronu od konvencionalnih jedinica jer povratna korona ne nastaje u sakupljenoj prašini i čestice nabijene s oba polariteta iona imaju velike površine za prikupljanje. Druga posljedica je da u sakupljenom sloju nastaje sila koja ima

tendenciju uklanjanja prikupljenih čestica s kolektorskih ploča a do toga dolazi zbog nedostatka struje u sakupljenom sloju, to dovodi do visokih gubitaka u radu jedinice.

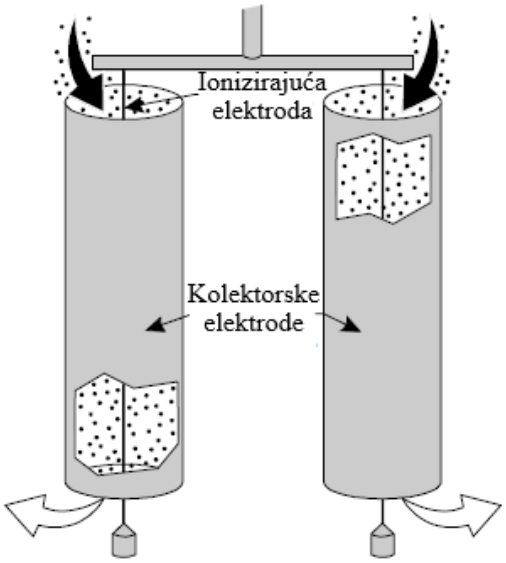
ESP-ovi s pločama imaju široku primjenu kod čestica visoke otpornosti s malim (1 do 2 μm) medijalnim promjerom mase (MMD-Mass median diameter). Ovdje vidimo veliku važnost dizajna ESP-a jer su sile unutar njega velike .Leteći pepeo se uspješno prikuplja s ovom vrstom ESP-a, ali tok niske brzine je kritičan za izbjegavanje visokih gubitaka treskanja.

## 3.3 Cjevasti Esp

Prvi ESP-ovi su bili cjevasti s visoko naponskim elektrodama postavljenima duž osi cijevi. Cjevasti filteri imaju tipične primjene u postrojenjima za dodavanje sumpora, čišćenju plinova (uklanjanje katrana), te odnedavno u obradi željeza i čelika. Takve cjevaste jedinice se još uvijek koriste za neke od tih primjena ali s više cijevi koje rade paralelno da bi zadovoljile povećanje protoka plina. Cijevi mogu biti oblikovane kao kružne, kvadratne ili šesterokutne saće gdje plin teče prema gore ili prema dolje. Duljina cijevi se odabire da odgovara zadanim uvjetima. Cijevi ESP-a su čvrsto ulivene kako bi se spriječilo curenje materijala, osobito vrijednih ili opasnih materijala.

Cjevasti filter je u biti jedno stupanjska jedinica i poseban je po tome što sav plin prolazi kroz područje elektrode. Visokonaponska elektroda djeluje istim naponom kroz cijelu dužinu cijevi, a struja varira duž cijevi kako se čestice uklanjaju iz sustava. Nema mogućnosti da se plinovi provuku oko područja sakupljanja, ali nejednakosti korone kroz duljinu cijevi mogu dopustiti nekima česticama da izbjegnu nabijanje te na taj način izbjegnu sakupljanje.

Cjevasti ESP-ovi čine samo mali dio od ukupnog broja ESP-ova u svijetu i najčešće se primjenjuje gdje su čestice vlažne ili ljepljive. Ova vrsta filtera se obično čisti vodom, te imaju manje gubitke od filtera sa suhim procesom.




**Sl. 3.2.** *Cjevasti ESP*

## 3.4 ESP s vodenim ispiranjem

Bilo koja od prethodno opisanih konfiguracija može raditi s vodenim ispiranjem umjesto sa suhim. Protok vode može se primjenjivati povremeno ili neprekidno da bi se isprale sakupljene čestice u spremnik za odlaganje. Prednost filtera sa vodenim ispiranjem je da nema problema s treskanjem nakupina ili s povratnom koronom. Nedostatak je povećanje složenosti zbog pranja i činjenica da se sa sakupljenim vlažnim otpadom mora postupiti bitno drugačije nego sa suhim što povisuje troškove zbrinjavanja.

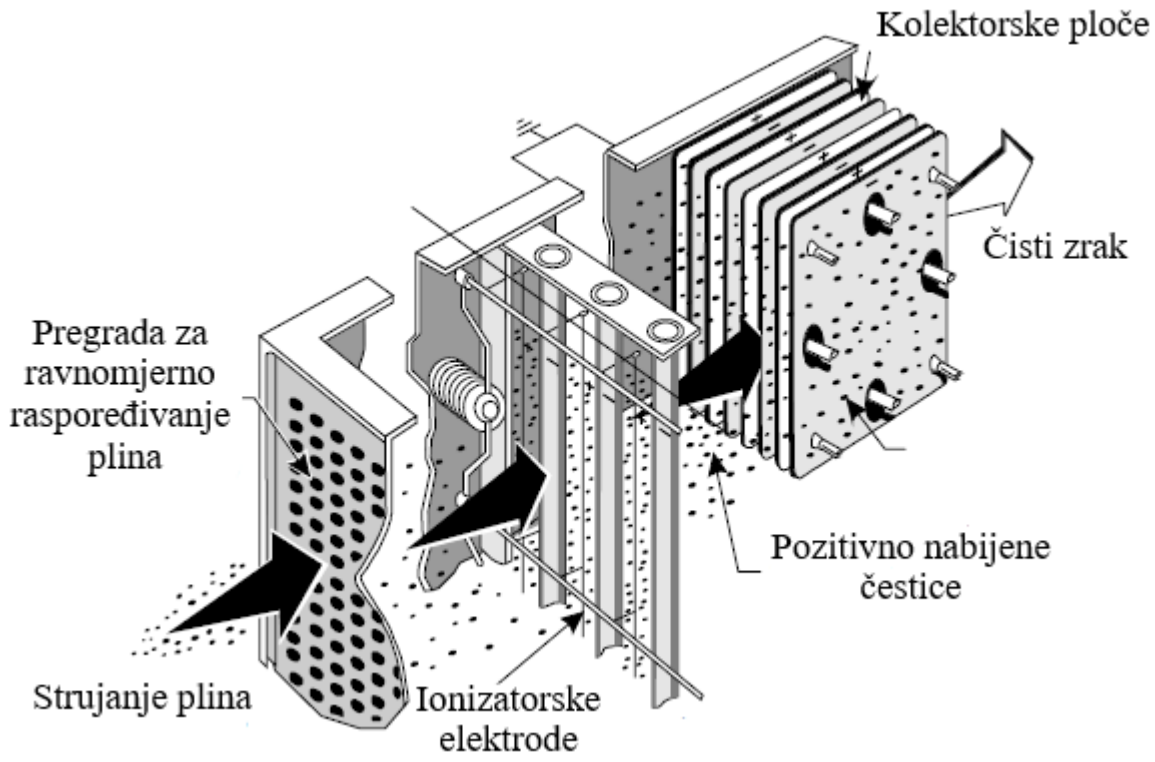
## 3.5 Dvostupanjski ESP

Prethodno opisani filteri su u načelu paralelno posložene jedinice tj. elektroda za nabijanje i kolektorska elektroda su jedna pored druge u paraleli. Dvostupanjski filter koji je izumio Penney je uređaj posložen u seriju tj. elektroda za nabijanje, ili ionizator prethodi kolektorskoj elektrodi. Za unutarnju upotrebu jedinica radi s pozitivnom polaritetom kako bi se ograničila proizvodnja ozona.

Prednosti ove konfiguracije uključuju više vremena za nabijanje čestica, manja sklonost povratnoj koroni i ekonomičnu konstrukciju za male veličine. Ova vrsta filtera se općenito koristi za količine

protoka plina do 50.000 $m^3$/min a primjenjuje se kod ljepljivih čestica jer tamo djeluje mala električna sila te je teško održati čestice na kolektorskim pločama. Moduli koji se sastoje od mehaničkog predfiltera, ionizatora, kolektorskih ćelija, naknadnog filtera i napajanja mogu se postaviti paralelno ili serijski-paralelno. Čišćenje modula može biti vodom ili deterdžentom nakon čega slijedi sušenje zrakom.

Dvostupanjski filteri smatraju se zasebnom i različitom vrstom uređaja u usporedbi s velikim jedno stupanjskim ESP-ovima s visokim protokom plina te se obično prodaju kao naprijed projektirani paketni sustavi.




**Sl 3.3.** *Dvostupanjski ESP*

# 4. POMOĆNA OPREMA

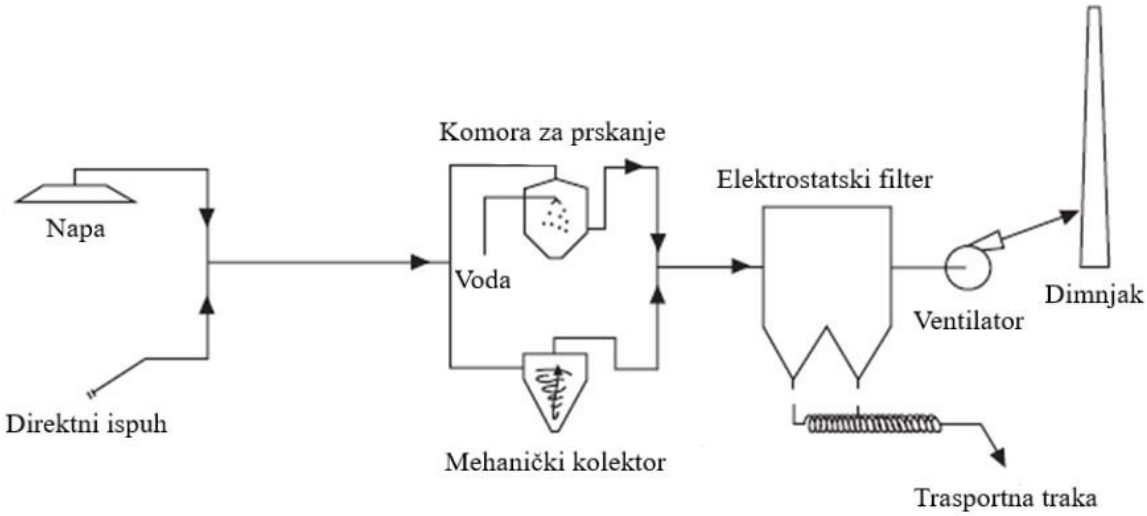
Uz sam ESP, kontrolni sustav obično uključuje sljedeću pomoćnu opremu:

- uređaj za prikupljanje plina;
- cjevovode;
- oprema za uklanjanje prašine;
- ventilatore;
- motore.

Osim toga, hladnjaci i mehanički kolektori mogu biti potrebni da se ispune preduvjeti plina prije nego što dosegne ESP. Uređaji za prikupljanje su obično nape koje usmjeruju onečišćujuće tvari u kanal ili su izravna ispušna spojka pričvršćena za spaljivač ili procesnu opremu. Ti su uređaji obično vatrostalni, vodeno hlađeni ili proizvedeni od ugljičnog čelika, ovisno o temperaturi plina. Vatrostalni i vodeno hlađeni se koriste tamo gdje temperatura premašuje 430 ° C ,ugljični čelik se koristi za niže temperature. Kanal bi isto trebao biti poput uređaja za prikupljanje vodeno hlađen, vatrostalan ili od ugljičnog čelika. Kanali trebaju biti dimenzionirani za brzine plina od približno 20 m/s kako bi se spriječilo taloženje čestica u kanalu. Velike i guste čestice mogu zahtijevati još veće brzine. Komore za prskanje se postavljaju kada je potrebo dodati vlažnost plinu, smanjiti temperaturu plina ili volumen plina. Tim postupkom se smanjuje taloženje čestica i štiti ESP od deformacija koje mogu nastati zbog visokih temperatura. Za postupke sagorijevanja s temperaturama ispušnih plinova ispod 400 °C, hlađenje nije potrebno, a ispušni plinovi mogu se isporučiti izravno u filter.

U slučajevima kada se u plinu nalazi veći postotak velikih čestica mehanički kolektori kao što su cikloni mogu smanjiti opterećenja na ESP-u. Snagu za strujanje plin dobiva od ventilatora koji se montiraju prije ili nakon ESP-a. Obično se koristi ventilator koji isisava čisti zrak u atmosferu. Za uklanjanje prikupljenih čestica s dna lijevka se koriste transportne trake ili pneumatski sustavi.

ESP-ovi s mokrim ispiranjem zahtijevaju da se izvor vode za pranje ubrizgava ili prska pri vrhu kolektorske ploče neprekidno ili u vremenskim intervalima. Voda teče zajedno s skupljenim česticama u spremnik otpadne vode. Dio tekućine se može reciklirati te ponovno upotrijebiti kako bi se smanjila potrebna količina ukupne vode. Ostatak se pumpa izravno u slano jezero ili prolazi kroz fazu za odvodnju vode, s daljnjim odlaganjem mulja.




**Sl. 4.1.** *Pomoćna oprema koja se koristi s ESP sustavom*

Oprema za kondicioniranje plina zbog poboljšavanja performansi ESP-a mijenjanjem otpornosti prašine može biti dio originalnog dizajna, ali češće se koristi kao nadogradnja postojećih ESP-ova. Oprema ubrizgava sredstvo u struju plina ispred ESP-a. Obično se sredstvo miješa s česticama te mijenja njihov otpor da bi se dobile veće brzine migracija i tako veća učinkovitost skupljanja. Međutim prije će se promijeniti električna svojstva plina nego otpor prašine. Na primjer, hlađenje plina omogućiti će višu razinu napona prije nego što dođe do iskrenja. Značajni kondicioneri koji se koriste uključuju SO3 (sumporov trioksid), H2S04 (sumporna kiselina), natrijske spojeve, amonijak i vodu, ali glavno sredstvo za hlađenje je SO3 (sumporov trioksid).

Oprema koja se upotrebljava za kondicioniranje ovisi o sredstvu koje se koristi. Klasičan SO3 uređaj zahtijeva opskrbu rastopljenim sumporom. Pohranjuje se u zagrijanu posudu i isporučuje se u plamenik, gdje oksidira u SO2 (sumporov oksid). Plin SO2 se prenosi preko katalizatora na daljnju oksidaciju do SO3 (sumporov trioksid). SO3 plin se zatim ubrizgava u struju dimnih plinova kroz set sondi koje se nalaze u kanalu. Umjesto sumpornog plamenika za dobivanje SO2, tekući SO2 može se dobiti isparavanjem iz spremnika. Iako su ukupni godišnji troškovi veći, tekući sustavi SO2 imaju nižu kapitalnu cijenu i jednostavniju za rukovanje od sustava s rastaljenim sumporom.

Ubacivanje vode ili amonijaka zahtijeva skup mlaznica za raspršivanje u kanalu, zajedno s pumpama i kontrolnom opremom. Kondicioniranje natrijem često se obavlja prevlačenjem ugljena na transporter s praškastim spojem ili vodenom otopinom željenog spoja. Spremnik ili spremište često je smješteno iznad transportera u tu svrhu.

# 5. ELEKTROSTATIKA ESP-A

Teorija ESP-ovog funkcioniranja zahtijeva mnogo znanstvenih disciplina da ga se temeljito opiše ali ESP je u osnovi električni stroj. Glavna zadaća uređaja je elektrostatičko nabijanje čestica te prikupljanje istih na kolektorske ploče. Količina nabijenih čestica utječe na električnu radnu točku ESP-a. Na kretanje čestica utječe razina turbulencija u plinu. Gubici spomenuti ranije "sneakage" i gubitci pri treskanja, glavni su utjecaji na ukupnu učinkovitost sustava. Osobine čestica također imaju značajan učinak na rad jedinice.

Sljedeća poglavlja će objasniti teoriju iza električnih radnih točaka ESP-a, nabijanja čestica, sakupljanja čestica , "Sneakage" i gubitaka pri treskanju.

## 5.1 Električna radna točka

Električna radna točka ESP-a je vrijednost napona i struje pri kojoj ESP radi. Kao što ćemo vidjeti kasnije, najbolja radna točka je pri najvišem električnom polju, koje otprilike odgovara najvišem naponu na elektrodama. Dalje u radu izraz "segment" predstavlja jedan set ploča i elektroda u smjeru toka. Najniži prihvatljivi napon je napon potreban za formiranje korone, električnog pražnjenja koje proizvodi ione za nabijanje čestica. Negativna korona nastaje kada slobodni elektroni u blizini visokonaponske elektrode koji su nastali kozmičkim zrakama, dobivaju dovoljno energije iz električnog polja da ioniziraju plin i proizvode više slobodnih elektrona. Električno polje za koje je taj proces samoodrživ određeno je eksperimentalno. Električno polje na površini žice :

$$E_c = 3{,}126 \times 10^6 d_r \left[1 + 0{,}0301 \left(\frac{d_r}{r}\right)^{0{,}5}\right] \qquad (5\text{-}1)$$

gdje je:

$E_c$ = električno polje pri nastanku korone na površini žice (V/m)

$d_r$ = relativna gustoća plina

r = radijus žice (m)

To je polje potrebno za proizvodnju "savršene" korone, oblik koji se obično vidi u laboratoriju na glatkim, čistim žicama. Svjetlost se pojavljuje kao uniformna, brzo se kreće difuzno oko elektroda. Nakon perioda rada, kretanje se koncentrira na male točke na površini žice a korona predstavlja

pojavu nalik na plamen. Polje potrebno za proizvodnju "plamene" korone, oblik koji se nalazi u ESP-ovima u punoj veličini je 0,6 puta veći od vrijednosti Ek.

Vrijednost napona Vc koji se mora narinuti na žicu kako bi se dobila zadana vrijednost polja, dobivamo po izrazu:

$$V_c = E_c\, r_w\, ln\left(\frac{d}{r_w}\right) \tag{5-2}$$

gdje je:

$V_c$ = napon nastanka korone (V)

$d$ = vanjski radijus cilindra za cjevasti ESP (m)

Struja neće teći dok god napon ne dosegne tu vrijednost, ali nakon što dosegne struja će naglo porasti. Maksimalna gustoća struje (A/m$^2$ ) na ploči ili cilindru izravno ispod žice iznosi:

$$j = \mu\, \epsilon\, \frac{V^2}{L^3} \tag{5-3}$$

gdje je:

$j$ = maksimalna gustoća struje (A/m$^2$)

$\mu$ = pokretljivost iona (m$^2$/Vs)

$\epsilon$ = slobodna prostorna permitivnost (8.845 x10$^{-12}$ F / m)

$V$ = narinuti napon (V)

$L$ = najkraća udaljenost od žice do kolektorske površine (m)

Gustoća struje je nula sve dok se ne dosegne napon nastanka korone, kada skače gotovo trenutno na maksimalnu gustoću struje j.

Područje u blizini žice je pod snažnim utjecajem iona koji se nalaze tamo, zbog čega visina napona na početku pojave korone pokazuje jake prostorne varijacije. Izvan područja korone, napon je vrlo ujednačen.

Električno polje je najsnažnije duž linije od žice do ploče:

$$E_{max} = \frac{V}{L} \tag{5-4}$$

gdje je:

$E_{max}$ = maksimalna snaga polja (V/m)

Kada električno polje na razmaku između žice i ploče postane dovoljno jako, pojavit će se iskrenje, a napon se ne može povećati bez jakog iskrenja. Vrijednost električnog polja na kojem se pojavljuje iskrenje :

$$E_s = 6{,}3 \times 10^5 \left(\frac{273}{T}\, P\right)^{1{,}65} \tag{5-5}$$

gdje je:

$E_s$ = jakost električnog polja pri iskrenju (V/m)

$T$ = temperatura (K)

$P$ = tlak plina (atm)

Jakost ovakvog polja bi se postiglo pri naponu od npr. 35.000 V za razmak ploča od žica za 11,4 cm. Na temperaturi od 149 ° C. ESP će općenito raditi blizu ovog napona, u odsutnosti povratne korone. $E_{max}$ će biti jednak ili manji od $E_s$.

Umjesto iskrenja, može doći do povratne korone ako vrijednost električnog polja u sloju prikupljene prašine (električno polje u sloju prikupljene prašine nastaje zbog protoka struja) dosegne kritičnu vrijednost od $1 \times 10^6\ V/m$. Ovisno o uvjetima povratna korona može povećati iskrenje ili može generirati toliko struje da se napon više ne može povećati. Električno polje u sloju prikupljene prašine se računa po izrazu :

$$E_l = j\rho \tag{5-6}$$

gdje je:

$E_l$ = jakost električnog polja u sloju prikupljene prašine (V/m)

$\rho$ = otpor prikupljenog materijala (Ω/m)

## 5.2 Nabijanje čestica

Nabijanje čestica se odvija kada ioni bombardiraju površinu čestice. Jednom kada je ion u blizini čestice, čvrsto je vezan zbog naboja unutar čestice.

Postoje dva principa nabijanja čestica: difuzno nabijanje i nabijanje poljem. Difuzno nabijanje je kada termokinetička energija iona bude veća od energije odbijanja iona koji se već nalaze na česticama. Nabijanje poljem se javlja kada ioni prate linije električnog polja sve dok ne završe na česticama. Oba principa rada su pogodna za sve veličine čestica, međutim punjenje poljem dodaje veći postotak naboja na čestice promjera većeg od 2 μm dok difuzno punjenje dodaje veći postotak na čestice manjeg promjera od 0,5 μm.

Difuzno nabijanje, logoritamsko povećanje stupnja naboja na čestici:

$$q(t) = \left(\frac{rkT}{e}\right) l\,n(1+\tau) \tag{5-7}$$

gdje je:

$q(t) =$ naboj čestice (C) u funkciji vremena (s)

$r =$ radijus čestice (m)

k = Boltzmannova konstanta (j/K)

T = temperatura (K)

e = naboj elektrona ($1{,}67 \times 10^{-19} C$)

$\tau$ = bezdimenzionalno vrijeme po izrazu:

$$\tau = \frac{\pi r v\, N\, e^2\, \theta}{kT} \tag{5-8}$$

gdje je:

$v =$ prosječna toplinska brzina iona (m/s)

N = koncentracija iona u blizini čestice po $m^3$

$\theta$ = vrijeme izloženosti u zoni nabijanja (s)

Difuzno nabijanje nikad ne doseže granicu, ali postaje jako sporo nakon otprilike tri bezdimenzionalne jedinice vremena. Za fiksno vrijeme izloženosti, naboj na čestici je proporcionalan njezinom radijusu.

Nabijanje poljem također ima karakterističnu ovisnost o vremenu:

$$q(t) = \frac{q_s \theta}{\theta + \tau'} \tag{5-9}$$

gdje je:

$q_s =$ zasićenje naboja (C)

$\theta =$ vrijeme izloženosti u zoni nabijanja (s)

$\tau' =$ bezdimenzionalno vrijeme

Zasićenje naboja dobivamo po izrazu:

$$q_s = 12\ \pi\ \epsilon\ r^2\ E \tag{5-10}$$

gdje je:

$\epsilon =$ dielektrična permitivnost vakuuma (F/m)

$E =$ utjecaj vanjskog električnog polja na čestice (V/m)

Promjena zasićenja je proporcionalna kvadratu radijusa, što objašnjava zašto je nabijanje poljem efikasnije za veće čestice. Vremenska konstanta nabijanja polja:

$$r' = \frac{4\epsilon}{Ne\mu} \tag{5-11}$$

gdje je:

$\mu =$ pokretljivost iona (m2/Vs)

Oba principa nabijanja rade istovremeno na svim česticama ali niti jedan nije dovoljno precizan da bi objasnio mjereni naboj na česticama. Najbolju aproksimaciju mjerenog naboja daje suma difuznog nabijanja i nabijanja poljem:

$$q_{uk}(t) = q_d(t) + q_f(t) \tag{5-12}$$

gdje je:

$q_{uk}t =$ ukupni naboj

$q_d(t) =$ naboj na česticama uzrokovan difuznim nabijanjem

$q_f(t) =$ naboj na česticama uzrokovan nabijanjem poljem

## 5.3 Prikupljanje čestica

Električno polje u zoni prikupljanja, stvara silu na česticama koja je proporcionalna električnom polju i naboju:

$$F_e = qE \tag{5-13}$$

gdje je:

$F_e =$ sila koju stvara električno polje (N)

$q =$ naboj čestice (C)

$E =$ električno polje (V/m)

Budući da princip nabijanja poljem daje najveći naboj proporcionalan električnom polju, sila na velikim česticama je proporcionalna kvadratu polja iz čega vidimo prednost u održavanju polja što je većim moguće.

Smjer kretanja čestica pod utjecajem električnog polja je suprotan od smjera strujanja plina. Izjednačavanjem električne sile i komponente povlačenja uzrokovanog električnim poljem (prema Stokesovom zakonu) dobivamo brzinu čestica :

$$v(q,E,r) = \frac{q(E,r)E\ C(r)}{6\pi\eta r} \tag{5-14}$$

gdje je:

$v(q,E,r) =$ brzina čestica (m/s)

$q(E,r) =$ naboj čestice (C)

$C(r) =$ Cunninghamova korekcija Stokesovom zakonu (bezdimenzionalna veličina)

$\eta =$ viskoznost plina (kg/ms)

Brzina čestica je brzina kojom se čestice kreću po linijama električnog polja prema pločama.

Brzina je obično najmanja kod čestica promjera oko 0,5μm. Manje čestice od toga se kreću brže jer se naboj ne smanji mnogo.

Prethodna jednadžba prikazuje brzinu čestica pri mirnom plinu, ali u Esp-ovima tok plina i čestica je obično jako turbulentan sa stalnim promjenama brzine i smjera. Stoga je kretanje čestica prema kolektorskim pločama statistički proces koji se ne može u potpunosti predvidjeti.

To sve nas vodi do eksponencijalne jednadžbe:

$$N(r) = N_0(r)\ exp\left(\frac{-vr}{v_0}\right) \tag{5-15}$$

gdje je:

$N(r) =$ koncentracija čestica na izlazu kolektorske zone ($m^3$)

$N_0(r) =$ koncentracija čestica na ulazu kolektorske zone ($m^3$)

$v(r) =$ brzina čestica ovisna o veličini (m/s)

$v_0 =$ karakteristična brzina ESP-a (m/s) po izrazu:

$$v_0 = \frac{Q}{A} = \frac{1}{S\ C\ A} \tag{5-16}$$

gdje je:

$Q =$ protok plina

$A =$ površina kolektorske ploče ($m^2$)

$S\ C\ A =$ specifično područje skupljanja (s/m)

Na osnovu svih predhodno navedenih jednadžbi, možemo izraziti frakciju čestica koje uspiju "pobjeći" sa kolektorskih ploča:

$$p = exp(-w_e SCA) \tag{5-17}$$

gdje je:

$p =$ čestice koje "pobjegnu" (frakcija)

$w_e =$ efektivna brzina kretnje čestica (m/s)

Učinkovitost prikupljanja:

$$Eff(\%) = 100(1 - p) \tag{5-18}$$

Učinkovitost prikupljana čestica je glavni podatak koji opisuje performanse ESP-a.

## 5.4 Plin koji se provuče pokraj kolektorske zone (“Sneakage“) i gubitci pri treskanja

“Sneakage“ se pojavljuje kada dio otpadnog plina zaobilazi kolektorsku zonu ESP-a. Dio plina koji je izbjegao kolektorsku zonu se na izlasku miješa s plinom koji je prošao kroz istu te na taj način smanjuje efikasnost cijelog sustava. Ta pojava se ne pojavljuje uvijek ali može se pojaviti i na nekoliko sekcija ESP-a u isto vrijeme što predstavlja ozbiljno narušavanje performansi sustava. Kako bi smo opisali efekte “Snakage-a“ i zaostatke pri treskanju matematički, prvo će mo se posvetiti “Snakage-u“ zasebno, a tek onda dodati gubitke pri treskanju kao prosječnu vrijednost u mnogo ponovljenih ciklusa treskanja.

Uz pretpostavku da se plin jednoliko izmiješa između segmenata, dio čestica koji “pobjegne“ po svakom segmentu može se izraziti kao:

$$p_s = S_n + [(1 - S_n) \times p_c\,(Q')] \tag{5-19}$$

gdje je:

$p_s$ = dio čestica koje su “pobjegle“

$S_N$ =dio plina koji zaobilazi kolektorsku zonu (“Sneakage“)

$p_c$(Q) = dio čestica koje “pobjegnu“ ovisan o protoku plina Qt kroz kolektorsku zonu umanjen za “Sneakage“ ($m^3/s$)

Da bi se izračunali efekti treskanja prvo računamo količinu prikupljenog materijal na pločama po segmentima:

$$\frac{m}{m_0} = 1 - p_s = 1 - S_n - [(1 - S_n \times p_c(Q')] \tag{5-20}$$

gdje je:

$\frac{m}{m_0}$ = dio mase prikupljen iz strujanja plina

Ovaj materijal se nakuplja na pločama sve dok se ploče ne počnu treskati, nakon čega većina materijala pada u ljevak za odlaganje a ostatak koji se vrati u strujanje plina čini gubitke pri treskanju. Eksperimentalna mjerenja su pokazala da gubitci pri treskanju iznose prosječno 12%.

Prosječni broj čestica koje "pobjegnu" po segmentu uključujući "Sneakage" i gubitke pri treskanju iznosi:

$$p_s = S_N + [(1 - S_N) \times p_c(Q')] + RR(1 - S_N)[1 - p_c(Q')] \quad (5\text{-}21)$$

gdje je:

RR = gubici pri treskanju

Analize ESP-ova su pokazale prosječnu vrijednost gubitaka Sn ("Sneakage-a") od 7 % a RR (gubitci treskanja) od 12 %. ESP-ovi s vodenim ispiranjem nemaju gubitke treskanja a gubici Sn ("Sneakage-a") su oko 5 % ili manji. Ti podatci se ipak uzimaju s određenim oprezom jer su veoma ovisni o veličini čestica i njihovim svojstvima (dali su ljepljive ili nisu itd.). Za čestice manjeg promjera se očekuje da će imati manje gubitke pri treskanju jer im je veza sa kolektorskim pločama čvršća. "Sneakage" faktor ovisi jedino o dizajnu samog ESP-a .Bolja izvedba (dizajn) će smanjiti gubitke ali uvelike povećati cijenu sustava.

## 5.5 Električni otpor čestica

Performanse ESP-a su jako osjetljive na dva svojstva čestica:

1. električni otpor čestica
2. veličinu čestica

Ova se svojstva mogu izmjeriti jako precizno u laboratoriju. Otpornost se može odrediti kao funkcija temperature u skladu sa standardom IEEE 548. Test se provodi u okolini ispunjenom zrakom koja sadrži određenu koncentraciju vlage. Test se izvodi kao funkcija rastuće i padajuće temperature. Podatci se dobivaju koristeći prosječne jačine električnog polja u sloju čestica od 4 kV/cm.

Otpor je važno svojstvo pri nabijanju čestica i skupljanju istih na kolektorske ploče. Čestice koje imaju veliki otpor je teško nabiti ,ali jednom kada su nabijene teško gube svoj naboj dok čestice s niskim otporom lako se nabiju ali lako i gube svoj naboj kada dođu na kolektorske ploče. Uvijek se teži sredini između ova dva ekstrema.

Ukupna otpornost je definirana Ohmovim zakonom:

$$E = \rho \times j \tag{5-22}$$

gdje je:

$E =$ jakost el. polja (V/cm)

$j =$ gustoća struje (A/cm$^2$)

$\rho =$ otpor (Ω/cm)

Bolja izvedba izraza bi bila rješavanje otpora kao funkcije napona i struje:

$$\rho = \frac{AV}{Il} \tag{5-23}$$

gdje je:

$\rho =$ otpor (Ω/cm)

$V =$ narinuti DC napon (V)

$I =$ izmjerena struja (A)

$l =$ debljina nakupljenog sloja (cm)

$A =$ površina mjerne elektrode

# 6. ZAKLJUČAK

Zbog sve strožih ekoloških zakona u cilju smanjenja onečišćenja zraka i buđenja svijesti ljudi za očuvanjem planeta zemlje, elektrostatski filter otpadnog plina je postao neizostavan dio gotovo svakog industrijskog pogona. ESP se prvenstveno zbog velike učinkovitosti rada i pristupačne cijene pokazao idealnim rješenjem za uklanjanje čestica iz plina. Od prve upotrebe početkom 20. stoljeća tehnologija je doživjela veliki napredak, razvilo se nekoliko različitih konstrukcijskih izvedbi i različitih načina rada. Najčešći u svijetu je pločasti ESP sa suhim ispiranjem. Filter je postao skoro savršeni stroj s učinkovitosti od 99,5%. Zbog ranije spomenutih zakona, predviđa se svijetla budućnost ovakvog načina uklanjanja čestica. Kako u svijetu tako i u Hrvatskoj, što vidimo po nedavnom ugrađivanju elektrostatskih filtera na termoelektrani Plomin 1 i Plomin 2.

## LITERATURA:


[1]White, H. J., Industrial Electrostatic Precipitation, Addison-Wesley, Reading, MA, 1963.

[2]https://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatic_precipitator

[3]Point Sources of Pollution: Local Effects and their Control, Qian Yi https://books.google.hr/books?id=dq2kCwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=hr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

[3]James H. Turner, Phil A. Lawless, John D. McKenna, John C. Mycock., Electrostatic Precipitators, Research Triangle Institute, 1999.

[4]Bump, R. L. (Research Cottrell, Inc.), "Evolution and Design of Electrostatic Precipitator Discharge Electrodes," paper presented at the APCA Annual Meeting, New Orleans, LA, June 1982.

[5]Lawless, P. A., and L. E. Sparks, "A Review of Mathematical Models for ESPs and Comparison of Their Successes," Proceedings of Second International Conference on Electrostatic Precipitation, S. Masuda, ed., Kyoto, 1984, pp. 513-522.

[6]https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/predavanje_4-2.pdf

[7]http://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/air_quality/electrostatic_precipitators

# SAŽETAK

Elektrostatski filter je uređaj za uklanjanje čestica iz otpadnog plina. Radi na principu nastanka električne korone koja elektrostatski nabija čestice koje prolaze kroz filter te se kasnije prikupljaju na kolektorskim pločama koje su suprotnog polariteta. Nakon što se čestice prikupe na pločama, pomoću električnih motora se otresu ili pomoću vode isperu u otpadni spremnik. Koriste se u svim granama industrije. ESP-ovi se svrstavaju u visoko-učinkovite kolektore u usporedbi s ostalima filterima jer su u mogućnost razviti učinkovitost od čak 99,5%. U radu su matematički opisane i sve elektrostatske pojave unutar samog filtera.

**Ključne riječi:** Elektrostatski filter, ESP, Pločasto - žičani ESP, Pločasti ESP, Cjevasti ESP , ESP s vodenim ispiranjem, Dvostupanjski ESP, Elektrostatsko nabijanje čestica, Prikupljanje čestica

## ABSTRACT

The electrostatic filter is a particle removal device from waste gas. It works on the principle of the emergence of an electric corona that electrostatically impregnates the particles passing through the filter and are subsequently collected on the collector boards that are opposite polarity. After the particles are collected on the plates, the electric motors are rinsed or washed with water into the waste container. They are used in all branches of industry. ESPs are classified in high efficiency collectors compared to other filters because they can develop efficiency of as much as 99.5%. All electrostatic phenomena within the filter itself are also mathematically described.

**Keywords:** Electrostatic Filter, ESP, Plate-Wire ESP, Flat Plate ESP, Tubular ESP, Wet Precipitators, Two-Step ESP, Particle Charging, Particle Collecting

# ŽIVOTOPIS

Martin Jakovac rođen je 6. 11.1995. godine u Požegi. Osnovnu školu „Fra Kaje Adžića“ pohađao je u Pleternici, a nakon osnovne upisuje Tehničku školu u Požegi smjer elektrotehničar. Nakon završetka srednje škole nastavlja obrazovanje u istom smjeru te 2014. godine upisuje Elektrotehnički fakultet u Osijeku na smjeru elektrotehnika. Trenutno je student 3. godine stručnog studija na smjeru elektroenergetika. Poznaje rad u Office paketima, Matlab-u, EasyPower-u, AutoCad-u i Reluxu . Ima položen vozački B kategorije.