

Izrada i ispitivanje rada elektro-filtera

Trstenjak, Sandra

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:980697>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Sandra Trstenjak

IZRADA I ISPITIVANJE RADA ELEKTRO-FILTERA

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada: Juraj Šipušić, prof.dr.sc.

Članovi ispitnog povjerenstva:

Juraj Šipušić, prof.dr.sc.

Jasna Prlić Kardum, prof. dr. sc

Krunoslav Žižek, izv. prof. dr. sc.

Zagreb, srpanj 2020.

Zahvaljujem svom mentoru prof dr. sc. Juraju Šipušiću na uloženom trudu, ukazanom povjerenju i svim ugodnim razgovorima uz čašicu kole koji su doveli do izrade ovog rada.

Zahvaljujem svim prijateljima, prijateljicama, kolegama i kolegicama na pomoći i veselim trenucima koji su mi olakšali ovo putovanje studiranja.

Posebno hvala Šejli koja je na svakom koraku bila tu za mene i Anamariji koja je mislila čak i kad ja nisam. Hvala Ivi za sve kasnovečernje mudrosti.

Najveće hvala mojoj obitelji. Mami, tati i sestri bez čije bezuvjetne ljubavi, podrške i strpljenja tijekom cijelog studiranja danas ne bih bila tu gdje jesam.

Mama, tata sretan rođendan!

Sažetak

U ovom radu prikazana je izrada laboratorijskog cijevnog elektrostatskog filtera jednostavne izvedbe. Uključen je literaturni pregled osnova elektrostatske precipitacije i mjerenja masenog protoka plina te opis ispitivanja elektrofiltera definiranih dimenzija. Uspješnost rada uređaja ocjenjuje se masom prikupljenih čestica i sigurnim načinom rada. Provedena ispitivanja uključuju karakterizaciju praškastog sustava čestica, određivanje kritičnog napona, mjerenja masenog protoka struje zraka te vaganje mase pojedinih dijelova aparature. Tijekom cijele izrade naglasak je stavljen na lako sastavljanje i rastavljanje cijelog uređaja i ponovljivost mjerenja. Prijedlozi za daljnja istraživanja odnose se na dizajn uređaja, protok ulazne struje plina i uvjete rada u budućim primjenama ovakve vrste pročišćivača.

Ključne riječi: elektrofilter, korona, maseni protok, praškasti sustavi

Abstract

Simple tubular electrofilter setup is presented in this paper. A literature review of general knowledge of an electrostatic precipitation process and measurements of a gas mass flow are included, as well as characterization of an electrofilter with defined dimensions. The performance of the device is evaluated by the mass of collected particles and the safe mode of operation. Conducted measurements include the characterization of the particular powder system, the determination of the critical voltage, mass flow measurement of the inlet air and verification of mass balance by weighing parts of the apparatus. Emphasis is placed on a flexibility of the whole system and the possibility of repeating the results in future designs of the device. Suggestions for further research relate to design changes, inlet flow of the gas and operating conditions in future applications of this type of purifier.

Key words: electrofilter, corona, mass flow, fine powder systems

Sadržaj

1. UVOD	1
2. OPĆI DIO.....	3
2.1. Korona	3
2.2. Napon.....	4
2.3. Električno polje.....	5
2.4. Električna vodljivost čestica	6
2.4.1. Dielektrik u električnom polju	6
2.5. Nabijanje čestica.....	8
2.6. Prikupljanje čestica.....	9
2.7. Raspodjela veličina čestica	10
2.8. Maseni protok fluida.....	11
2.9. Mjerilo masenog protoka fluida	12
2.9.1. Termalni anemometri	13
2.9.2. Anemometri s rotirajućim lopaticama.....	13
2.10. Dizajn elektrostatskog precipitatora	14
2.11. Učinkovitost.....	15
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	16
3.1. Odabir čestica	16
3.1.1. Talk.....	16
3.1.2. Silicijev dioksid (<i>Aerosil</i> [®])	17
3.2. Karakterizacija čestica	17
3.2.1. Određivanje raspodjele veličina čestica	17
3.2.2. Određivanje kuta mirovanja	18
3.3. Formiranje ulazne struje zraka i fluidizacija	19
3.4. Izvedba elektrofiltera cijev u cijevi	19
3.5. Određivanje probojnog napona	21

3.6. Osjetilo masenog protoka	22
4. REZULTATI I RASPRAVA	24
4.1. Raspodjela veličina čestica	24
4.2. Određivanje nasipnog kuta	25
4.3. Mjerenja protoka zraka	27
4.4. Određivanje učinkovitosti uređaja	32
4.4.1. Mjerenja mase	32
4.4.2. Teoretska učinkovitost elektrofiltera	36
5. ZAKLJUČAK	38
6. POPIS SIMBOLA	40
7. LITERATURA	42
8. ŽIVOTOPIS	44

1. UVOD

Elektrofilteri su sustavi za odvajanje krutih i tekućih sitnih čestica iz struje plina. Kako se u klasičnom smislu ne govori o filtraciji, točniji naziv ovakve vrste uređaja je elektrostatski precipitator. Elektrostatska precipitacija temelji se na djelovanju sila na električki nabijene čestice u prisutnosti električnog polja kako bi došlo do procesa odvajanja. Prvi zabilježeni zapis električnog odvajanja dima datira oko 1600. godine, a povezuje se s radom engleskog fizičara Williama Gilberta. [1]

Osnovno načelo rada elektrofiltera generiranje je korone, odnosno električnog pražnjenja povezanog s ionizacijom molekula plina. Ta se pojava spominje već sredinom 18. stoljeća, a prva eksperimentalna odvajanja radio je 1824. godine Hohfeld čišćenjem magle u staklenoj posudi. Krajem 19. stoljeća javljaju se prvi komercijalni pokušaji razdvajanja olovne prašine. Tek oko 1907. godine američki kemičar Frederick G. Cottrell predlaže patent za nabijanje i prikupljanje čestica - prvi elektrofilter. Cottrell je uređaj primijenio za prikupljanje čestica sumporne kiseline i olovnih oksida koji su u to doba pokazivali sve značajni negativni utjecaj na zdravlje. W. A. Schmidt, Cottrellov student, nastavio je s radom u području čišćenja plinova električnim nabijanjem i 1910. dizajnirao prvi elektrostatički precipitator primjenjiv u industriji cementa. [1, 2]

Mogućnost obrade velikih količina plinova i velike učinkovitosti čine primjenu elektrofiltera danas sve zastupljenijom u obradi dimnih plinova u prerađivačkoj, metalnoj i rudarskoj industriji te proizvodnji cementa. Tamo se postižu ukupne stope odvajanja do 99,9 %, što sprječava emisiju i do 10 t prašine dnevno. Komercijalna postrojenja za elektrostatsku precipitaciju mogu biti visoka nekoliko desetaka metara, s razmakom ploča u rasponu od nekoliko desetaka centimetara, a paralelno se može spojiti i do nekoliko stotina filtarskih traka. Razmatrana je upotreba elektrostatičkih filtera u automobilima, ali do danas nije predloženo adekvatno rješenje. [2]

U ovom radu prikazana je izrada jednostavnog cijevnog elektrostatskog precipitatora pomoću kojeg je pročišćavana struja onečišćenog zraka. Uz pretpostavku da djelovanjem viskog napona prikuplja čestice, u sigurnim uvjetima rada, osnovni uvjet koji uređaj mora zadovoljiti je laka rastavljaljivost, odnosno jednostavno spajanje i brtvljenje svih dijelova.

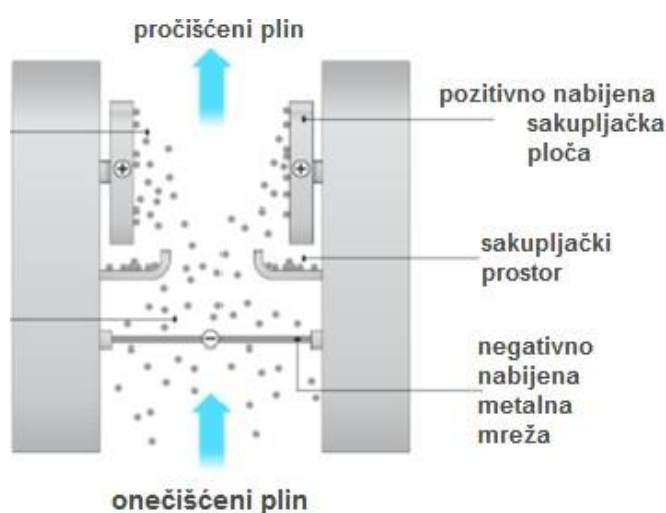
Ispitivanja koja moraju potvrditi ponovljivost rezultata prvenstveno uključuju mjerenja masenog protoka i zadovoljavanje bilance masa. Kao i u industriji, tako se i u ovoj

laboratorijskoj izvedbi elektrofiltera kapitalni troškovi pokušavaju svesti na minimum. Stoga je za mjerenja masenog protoka izrađeno osjetilo koje se lako sastavlja i rastavlja, ne prepoznaje smjer strujanja zraka te ima zadovoljavajući odziv na promjene protoka.

S obzirom na princip rada i geometriju uređaja koja uvelike utječe na učinkovitost, laboratorijska izvedba zahtijeva adekvatnu teorijsku podlogu koja se zasniva na eksponencijalnom zakonu razdvajanja koji je 1922. godine predložio W. Deutsch. [3]

2. OPĆI DIO

Elektrostatski precipitator (ESP) ili elektrofilter koristi električni naboj i električno polje za uklanjanje određenih nečistoća, sitnih čvrstih čestica, iz zraka ili drugih dimnih plinova. [4] Čestice suspendirane u struji plina ulaskom u elektrofilter bivaju električki nabijene i uklanjaju se djelovanjem električnog polja. Shema jednostavnog elektrofiltera prikazana je na slici 1. Osnovni dijelovi su izvor istosmjerne struje visokog napona, ionizirajuća elektroda, sakupljačka (kolektorska) elektroda te sakupljački prostor. [5] Izvorno je dizajniran za uporabu vrijednih industrijsko-procesnih materijala, no danas veću ulogu ima kao instrument za kontrolu onečišćenja zraka, odnosno za uklanjanje čestica iz otpadnih plinova u industrijskim postrojenjima i elektranama. [4]



Slika 1. Shema jednostavnog elektrofiltera [6]

Konfiguracija precipitatora ovisi o geometriji ionizacijske elektrode i njenom razmaku od kolektorske elektrode. Moguće su različite izvedbe ionizacijske i sakupljačke elektrode.

2.1. Korona

U procesu elektrostatske precipitacije osnovna sila koja uzrokuje separaciju čestica iz otpadnog plina je elektrostatsko privlačenje. Nabijanje čestica provodi se ioniziranjem plina koji prolazi između elektroda generiranjem korone. Korona je električna pojava kada gradijent jačine električnog polja oko elektrode prekorači određenu graničnu vrijednost, pri čemu njezino

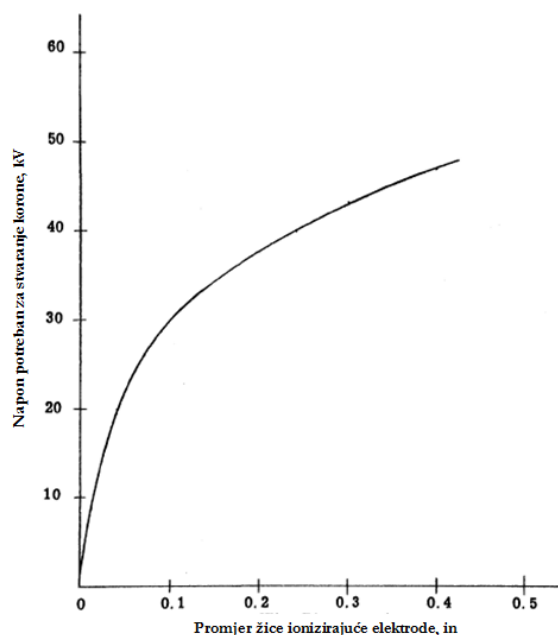
nastajanje ovisi o jačini napona, obliku i razmaku elektroda, gustoći, vlazi, temperaturi i vodljivosti plina, no ne ovisi o načinu spajanja elektrode na izvor napona. [5] Proces stvaranja korone zahtijeva nejednoliko električno polje koje se može postići korištenjem žice malog promjera kao jedne elektrode i ploče ili cijevi kao druge elektrode. Spajanje elektroda na visoki napon stvara jako električno polje u blizini površine žice. Jačina električnog polja obrnuto je proporcionalna promjeru žice. [3]

Stvaranje korone pokreću elektroni prisutni u jakom polju gdje ubrzavaju i osiguravaju dovoljno energije da mogu utjecati na čestice onečišćenog plina - ionizirati ih. Posljedica korone, odnosno ionizacije je stvaranje pozitivno i negativno nabijenih čestica. Ponašanje tako nabijenih čestica ovisi o načinu spajanja elektroda, pa tako razlikujemo negativnu koronu, ako je ionizacijska elektroda spojena na negativni kraj izvora napona, i pozitivnu koronu, ako je ionizacijska elektroda spojena na pozitivan kraj. Obje varijante koriste se u industrijskoj primjeni elektrostatskih precipitatora, no prevladava primjena negativne korone koja je stabilnija zbog mogućnosti primjene većeg napona te je samim time i učinkovitija. [8] Prednosti spajanja ionizacijske elektrode kao pozitivne, generiranje pozitivne korone, su mogućnost postizanja većeg kritičnog napona prije pojave iskrenja i stvaranje manje količine ozona u odnosu na negativnu koronu. Zbog toga se ona koristi kada je potrebna primjena precipitatora u zatvorenim prostorima.

Ionizacijske elektrode najčešće se rade u obliku žice jer je pojava korone to jača što je radijus zakrivljenja površine izbijanja manji, odnosno što su električne silnice zbijenije. [5] U sakupljačkoj elektrodi, koja je obično pozitivna, korona je nepoželjna te se ona izrađuje u obliku cijevi ili ploče.

2.2. Napon

Najniži prihvatljivi napon je napon potreban za stvaranje korone, električnog pražnjenja koji stvara ione koji zatim nabijaju čestice onečišćenja. [8] Jednom kada je dosegnut taj kritični napon, slobodni elektroni u blizini žice ubrzavaju do energije ionizacije i u području gdje je premašena kritična vrijednost električnog polja dolazi do reakcije. Na zahtjeve potrebnog napona utječe veličina, odnosno promjer žice ionizirajuće elektrode, a teoretski odnos prikazan je na slici 2.



Slika 2. Teoretski odnos kritičnog napona korone i veličine žice [3]

Različiti promjer elektrode izaziva različite vrijednosti maksimalne jačine električnog polja i jačine polja kod koje dolazi do iskrenja. Općenito, za određeni razmak između elektroda, potreban je manji napon što je promjer žice manji. Uobičajena podjela s obzirom na primijenjeni napon je na visokonaponske elektrostatske precipitatore (30 kV-100 kV) i niskonaponske elektrostatske precipitatore (12 kV-13 kV), koji se koriste za izdvajanje fino dispergiranih kapljica.

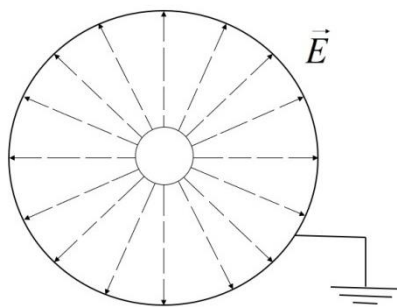
2.3. Električno polje

Jačina električnog polja određena je elektrostatskom komponentom, koja povezuje geometriju precipitatora i narinuti napon, te nabojnom komponentom koja se odnosi na nabijene čestice (ioni i nabijene čestice prašine) u prostoru između elektroda. [3]

Ioni koje generira korona prate silnice električnog polja od ionizacijske do sakupljačke elektrode, kako je prikazano slikom 3. Kako veće čestice (promjera $> 10 \mu\text{m}$) apsorbiraju puno više generiranih elektrona nego manje čestice (promjera $> 1 \mu\text{m}$), električne sile koje djeluju na njih mnogo su jače. Jačina električnog polja potrebnog za nastanak korone varira ovisno o obliku i promjeru žice te relativnoj gustoći plina.

Promjer žice ionizacijske elektrode i razmak između ionizacijske i kolektorske elektrode određuju gradijent napona, pa stoga i promjene u jačini stvorenog električnog polja. Jačina polja mijenja se recipročno s promjerom žice ionizacijske elektrode. [3]

Ono što se svakako želi izbjeći je pojava iskre, što se događa kada se premaši određeni kritični napon. Spomenuti kritični napon koji izaziva iskrenje ovisi o promjenama sastava i temperature onečišćenog plina.



Slika 3. Silnice električnog polja u cijevi gdje unutarnja cijev generira električno polje dok je vanjska uzemljena

2.4. Električna vodljivost čestica

Električna otpornost fizikalna je veličina koja opisuje svojstvo opiranja tvari protjecanju električne struje i određuje se eksperimentalno propuštanjem struje kroz ploču poznate geometrije. Električna otpornost čestica mjera je njegove otpornosti na električnu vodljivost. Važno je svojstvo za nabijanje čestica i njihovo prikupljanje. Ako je premalena, čestica je dobar vodič i suprotno, čestica je dobar izolator ako je otpornost prevelika. Čestice koje imaju veliki otpor teško je nabiti, ali jednom nabijene teško gube svoj naboj. Čestice s niskim otporom lako se nabiju, ali lako i gube taj naboj kada dođu na kolektorske ploče. [9] Uvijek se teži sredini između ova dva ekstrema.

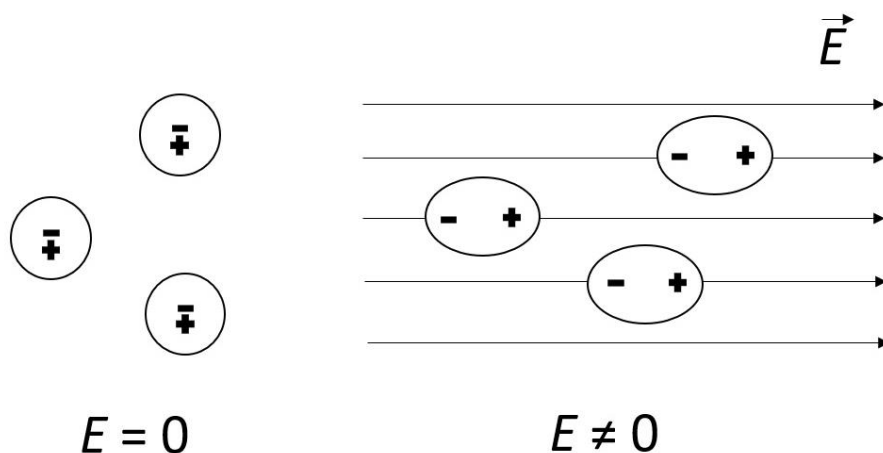
2.4.1. Dielektrik u električnom polju

Dielektrici su tvari bez slobodnih naboja, odnosno materijali kroz (grč. *dia*) koje prolazi električno polje, ali sami ne vode elektricitet. Svaki atom se sastoji od pozitivno nabijene jezgre oko koje se gibaju negativni elektroni. Ukupni naboj atoma je jednak nuli, a centar sila koje

djeluju na pozitivne i negativne naboje nalazi se u istoj točki. Stavimo li atom u električno polje, doći će do pomaka jezgre u jednom, a elektrona u drugom smjeru. Rezultat je pomicanje centara naboja i stvaranje dipola. Što je polje jače, razmicanje naboja je veće. Ti su pomaci lokalni, a mikroskopska područja dielektrika dobiju električni naboj. Taj je naboj definiran kao inducirani dipolni naboj. Ukupni (makroskopski) naboj dielektrika ostaje jednak nuli, tj. dielektrički materijal je i dalje električki neutralan. Ako se u svakom atomu nalazi naboj Q i ako se on pod djelovanjem polja pomakne za δ onda dipolni moment po jedinici volumena možemo pisati kao jednadžbu (1), gdje je N broj atoma po jedinici volumena, a P dielektrična polarizacija.

$$\vec{P} = NQ\vec{\delta} \quad (1)$$

S obzirom na svojstva dielektrika postoje dvije vrste molekula - polarne, permanentnog električnog dipolnog momenta, i nepolarne čija težišta pozitivnog i negativnog naboja padaju u istu točku. Težišta naboja nepolarnih molekula u električnom se polju pomiču i od neutralne molekule nastaju inducirani dipoli, kako je vidljivo na slici 4. Naboj na površini dielektrika nije slobodan, već je vezan za molekule na površini dielektrika.



Slika 4. Stvaranje induciranih dipola od nepolarnih molekula u električnom polju

Svojstvo dielektrika opisuje se jednadžbom 2.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (2)$$

gdje je ε_0 dielektričnost vakuumu, a ε_r broj koji pokazuje koliko je puta slabije polje u dielektriku nego u vakuumu. Jakost električnog polja u dielektriku manja je nego u vakuumu zbog polariziranog naboja.

Polarizacijski naboj stvara unutar dielektrika svoje električno polje E_{pol} suprotno usmjereno od vanjskog električnog polja. Ukupno električno polje unutar dielektričnog materijala je zbog djelovanja polarizacijskog polja smanjeno: $E = E_0 + E_{pol} < E_0$.

Jakost električnog polja kojeg stvara polarizacijski naboj E_{pol} proporcionalna je jakosti ukupnog električnog polja u dielektričnom materijalu E i ovisna je o vrsti dielektričnog materijala (3). χ_e predstavlja električnu susceptibilnost.

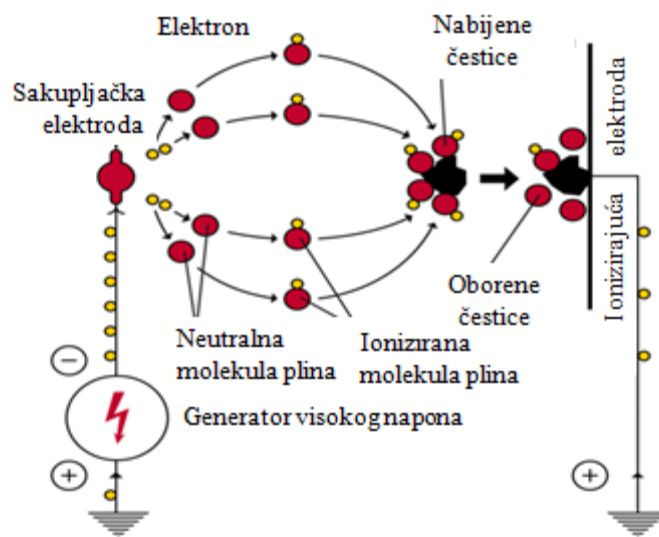
$$E_{pol} = -\chi_e \cdot E \quad (3)$$

Električna susceptibilnost, bezdimenzijska konstanta, značajka je dielektričnog materijala kojom se kvantificira utjecaj vanjskog električnog polja na polarizaciju. Predznak „-“ u jednadžbi (3) označava da je polje polarizacijskog naboja suprotno usmjereno od vanjskog električnog polja, odnosno ukupnog električnog polja u dielektričnom materijalu. Ukupno električno polje u dielektričnom materijalu dano je jednadžbom (4). [10]

$$E = E_0 + E_{pol} = E_0 - \chi_e \cdot E \quad (4)$$

2.5. Nabijanje čestica

Nabijanje čestica odvija se kada se stvoreni ioni sudaraju s česticama plina. Model nabijanja čestica prikazan je na slici 5. Jednom kada se ioni nađu u blizini čestice koja također nosi naboj, čvrsto se vežu za nju. Dva su principa nabijanja čestica - difuzno nabijanje i nabijanje poljem. Difuzno nabijanje odvija se kada termokinetička energija iona premašuje energiju odbijanja iona koji su već vezani za čestice plina. Kada ioni prate linije električnog polja kako bi se vezali za čestice govorimo o nabijanju poljem. Oba principa primjenjiva su za prikupljanje neovisno o veličinama čestica, no nabijanje poljem pokazuje veću učinkovitost za prikupljanje čestica promjera većeg od 2 μm , dok za difuzno nabijanje to vrijedi za čestice promjera manjeg od 0,5 μm . [9]



Slika 5. Model nabijanja čestica [11]

2.6. Prikupljanje čestica

U prostoru prikupljanja električno polje stvara silu na česticama koja je proporcionalna naboju i električnom polju:

$$F_e = qE \quad (5)$$

gdje je:

$$\begin{aligned} F_e &= \text{silu električnog polja (N)} \\ q &= \text{naboj čestice (C)} \\ E &= \text{jakost električnog polja (V/m)} \end{aligned}$$

Smjer kretanja čestica pod utjecajem električnog polja suprotan je od smjera strujanja plina (slika 6.). Izjednačavanjem električne sile i komponente povlačenja uzrokovano električnim poljem (prema Stokesovom zakonu) dobivamo izraz za brzinu čestica. [9]

$$v(q, E, r) = \frac{q(E, r) E C(r)}{6\pi\eta r} \quad (6)$$

gdje je:

$$\begin{aligned} v(q, E, r) &= \text{brzina čestica (m/s)} \\ q(E, r) &= \text{naboj čestice (C)} \end{aligned}$$

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

η = viskoznost plina (Pa s)

Gornja jednačba prikazuje brzinu čestica kojom se kreću po linijama električnog polja prema sakupljačkoj elektrodi (ploči) u idealiziranim uvjetima (mirovanje plina). Pri radu elektrostatskog precipitatora uobičajene su promjene brzina i smjera kretanja struje plina. Stoga, može se reći da je kretanje čestica prema sakupljačkim pločama statistički proces koji se ne može u potpunosti predvidjeti. [9]

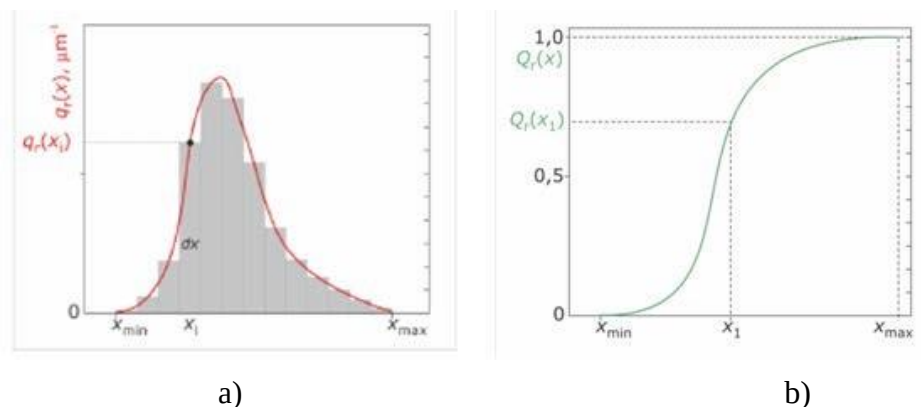


Slika 6. Kretanje čestica prema sakupljačkoj elektrodi djelovanjem električnog polja

2.7. Raspodjela veličina čestica

Jedno od važnijih fizikalnih svojstava čestica njihova je veličina. Određivanje veličine i raspodjele veličine čestica ključno je pri utvrđivanju ishoda procesa. Raspodjela veličina predstavlja odgovarajuće udjele čestica (Q_r , gdje r označava vrstu raspodjele, npr. $r = 0$ označava brojčanu, dok recimo $r = 3$ označava masenu odnosno volumnu raspodjelu) neke veličine, a može se prikazati histogramom (slika 7.a) ili kontinuiranom krivuljom (slika 7.b).

Karakteristične veličine kod analize krivulje raspodjele su: širina raspodjele i najučestalija veličina. [12]



Slika 7. Prikaz raspodjele veličina a) funkcijom gustoće raspodjele i b) kumulativnom funkcijom raspodjele

2.8. Maseni protok fluida

Glavna karakteristika plina je da su njegove molekule slobodne, da se kreću prostorom ispunjenim plinom. Volumen tog prostora mnogo je veći od volumena svih prisutnih molekula. Molekule unutar plina koji je slabo stlačen ponašaju se slično idealnom plinu. Plinovi se vladaju prema tri zakona Gay-Lussacovom zakonu, Boyle-Mariotteovom zakonu i Avogadrovom. Sažmu li ta tri zakona, ponašanje plina koji oni opisuju definira se jednačbom stanja idealnog plina (7):

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (7)$$

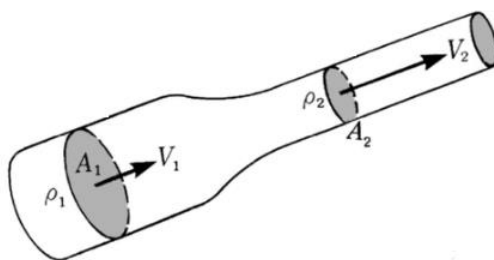
p je tlak plina [Pa], V je volumen plina [m^3], n je množina tvari [mol], R je opća plinska konstanta [$\text{J}/(\text{mol K})$] i T je temperatura tog plina [K]. [13]

Protoci su većinom trodimenzionalni, ali većina ih se proučava kao jednodimenzionalne (kretanje samo u jednom smjeru). Primjerice, protjecanje fluida u cijevi mjereno je u obliku brzine njenog kretanja.

Pri protoku fluida kroz cijev masa koja prolazi kroz pojedini dio cijevi u određenom vremenu ne mijenja se čak ni kada se širina cijevi promijeni. Spomenuto opisuje zakon očuvanja mase. Cijev prikazana na slici 8. čija se širina smanjuje možemo pisati:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (8)$$

ρAv je masa fluida koja prolazi kroz određeni dio cijevi u određenom vremenu. Navedenu vrijednost nazivamo masenim protokom. Av je volumen koji prođe u određenom vremenu i označava volumni protok, on ostaje konstantan za nekompresibilne fluide. [14]



Slika 8. Protok mase kroz različite širine cijevi ostaje isti [14]

2.9. Mjerilo masenog protoka fluida

Mjeračima protoka mogu se izravno mjeriti maseni protoci plinova i tekućina. Dok na volumetrijska mjerenja utječu svi okolišni i procesni uvjeti koji utječu na volumen jedinice ili posredno utječu na pad tlaka, na mjerenje protoka mase ne utječu promjene viskoznosti, gustoće, temperature ili tlaka. Mjerači masenog protoka čiji rad se bazira na promjenama u temperaturi često se koriste za nadgledanje ili kontrolu procesa povezanih s masom, poput kemijskih reakcija koje ovise o relativnoj masi nereagiranih sastojaka. Pri određivanju masenih protoka stlačivih plinova, na mjerenja ne utječu promjene tlaka i/ili temperature. Jedna od prednosti takvih toplinskih mjerača protoka je točno mjerenje malih protoka, odnosno malih brzina plinova (ispod 8 m/min), što ih čini mnogo osjetljivijima u odnosu na slične uređaje. [15]

Toplinske mjerače protoka možemo prema načinu rada podijeliti u dvije skupine, a osnovne izvedbe prikazane su na slici 9.



Slika 9. Mjerač brzine i temperature zraka s termalnim anemometrom (lijevo) i instrument za mjerenje brzine, protoka, temperature i vlage zraka s ugrađenom vjetrenjačom (desno)

2.9.1. Termalni anemometri

Termalni anemometri (engl. "hot wires") djeluju na principu prijenosa topline. Senzor se zagrijava iznad sobne temperature propuštanjem struje kroz električni otpor, a energija se pretvara u toplinu. Konvektivnim prijenosom topline, toplina se prenosi u zrak koji prolazi preko grijanog elementa. Elektronika daje veću snagu zagrijanoj žici za održavanje početne temperature na nultom protoku, a povećani signal krivulje snage pretvara se u očitavanje brzine na zaslonu. Termalni anemometri precizno mjere široki raspon brzina, od 0,05 m/s do 51 m/s. Imaju male promjere sonde koji im omogućuju postavljanje u tijesna područja, poput mjerenja brzine zraka između ploča na računalu ili u malim cijevima. Termo-anemometri imaju ograničenja temperature zraka, a većina uređaja radi u području maksimalne temperaturu od 82 °C do 93 °C, što općenito ograničava njihovu upotrebu na okolne uvjete. [15]

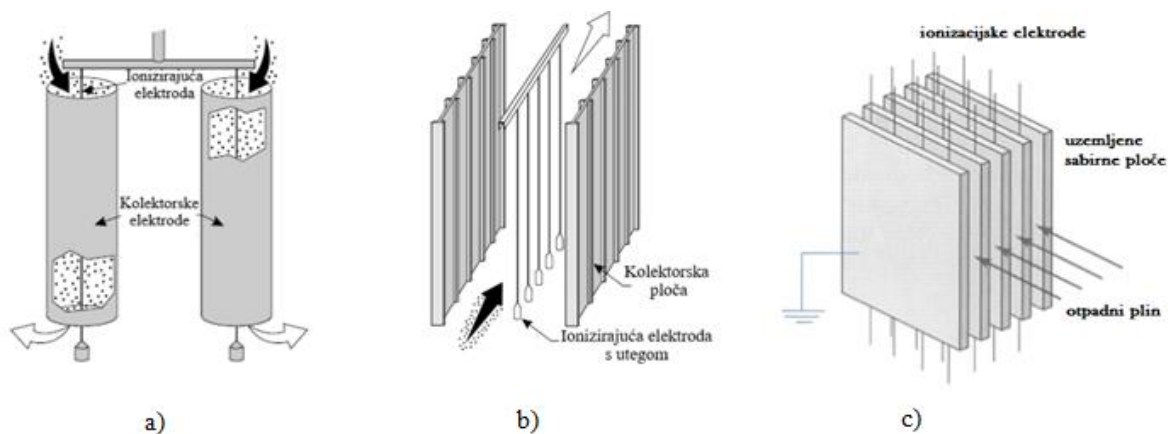
2.9.2. Anemometri s rotirajućim lopaticama

Druga vrsta instrumenta za mjerenje protoka su anemometri s okretnim krilima slični maloj vjetrenjači gdje zrak nasmukava na lopatice stvarajući rotaciju. Uglavnom se koriste za mjerenje brzine zraka na otvorima za dovod. Karakteristika anemometra s rotirajućim lopaticama je njegova sposobnost ujednačavanja brzina zraka na određenom području, odnosno prikaz prosječne vrijednosti brzine strujanja plina. Najčešće se proizvodi u izvedbama promjera oko 10 cm, što općenito ograničava njihovu upotrebu za mjerenje brzina u malim cijevima.

Danas prevladavaju elektronske verzije rotirajućeg anemometra. Rotacija lopatice ventilatora osjeti se magnetskim ili optičkim prijemnikom, a signal se pretvara u izravno očitavanje brzine okretaja u vremenu. Digitalnim modelima moguća su precizna mjerenje od 50 okretaja u minuti do 6000 okretaja u minuti (0,2 m/s- 30,5 m/s). [15]

2.10. Dizajn elektrostatskog precipitatora

Dizajn elektrostatskih precipitatora ovisi o izvedbi ionizirajuće i sakupljačke elektrode. Jednostavan pregled osnovnih izvedbi: cijevne (a), pločasto-žičane (b) i pločaste (c) dan je na slici 10.



Slika 10. Shematski prikaz izvedbi elektrofiltera

Prema rastućem kapacitetu tri osnovne izvedbe su: žica u cijevi, žica između dviju ploča i više žica između dviju ploča. Za izradu i ispitivanja u ovom radu izabrana je varijanta cijevnog precipitatora - žice u cijevi. Ono što ovaj tip filtera čini posebnim jest činjenica da sav plin prolazi kroz područje između elektroda. 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 električna vodljivost čestica i jačina stvorenog električnog polja mogu dopustiti nekim česticama da izbjegnu nabijanje te tako izbjegnu sakupljanje. [3]

Manji razmak između kolektorskih elektroda snižava potreban napon na ionizacijskoj elektrodi i smanjuje dimenzije cijelog postrojenja, ali otežava rad zbog začepjenja.

Napajanje elektrostatskog precipitatora pretvara izmjenični napon (230 V/400 V) na pulsirajući istosmjerni napon u rasponu od 20 000 V do 100 000 V ovisno o potrebi. [16]

2.11. Učinkovitost

Tipična učinkovitost elektrofiltera kreće se oko 99 %. Nekoliko kriterija utječe na tu vrijednost, a najvažniji je veličina samog uređaja koja određuje vrijeme obrade. Posljedica je to proporcionalnog odnosa učinkovitosti i jačine stvorenog električnog polja. Odnosno, što se čestica duže zadrži u elektrofilteru i na nju djeluje jače električno polje, veća je vjerojatnost da će biti odvojena. Tako elektrofilter dizajniran za 99 %-tnu učinkovitost odvajanja može biti dva do tri puta veći od onog koji zahtijeva 90 %-tnu učinkovitost. [3]

Stoga na učinkovitost prikupljanja utječu i električna vodljivost čestica, temperatura i kemijski sastav plina te raspodjela veličina čestica. [5]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Odabir čestica

Čestice koje se uvode u sustav za fluidizaciju, a zatim i u elektrofilter, birane su na temelju njihovih fizikalnih i kemijskih svojstava. Razmatrani su tako anorganski fini prašci talka i silicijevog dioksida. Brojna istraživanja provedena su kako bi se provjerila opasnost po zdravlje finih prašaka jer zbog svoje veličine predstavljaju rizik od javljanja bolesti dišnih puteva. Rizik se povećava proporcionalno s vremenom izlaganja (udisanja). [17]

Uzorci korišteni za ispitivanje prikazani su na slikama 11. i 12.



Slika 11. Baby puder

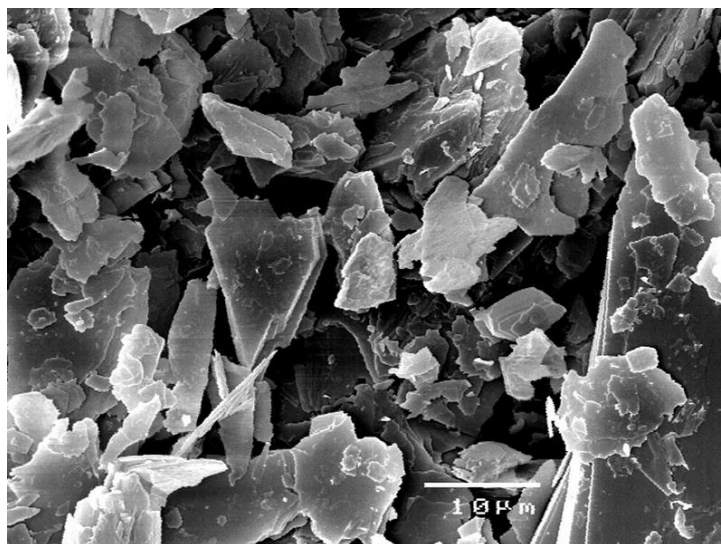


Slika 12. Aerosil

3.1.1. Talk

Talk je hidratizirani silikatni materijal slojevite strukture (slika 13.) sastavljen od magnezija, silicija, kisika i vodika; kemijske formule $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. Nastaje u raznim geološkim uvjetima, a u ovisnosti o mjestu ležišta čistoća, morfologija i sadržaj minerala mogu se bitno razlikovati. Talk u prahu koristi se kao antiflogističko sredstvo i kao adsorbens. Široku primjenu našao je u farmaceutskoj industriji, industriji gume i papira kao materijal za punjenje

(punilo), u keramičkoj industriji za proizvodnju vatrootpornih materijala, te u proizvodnji vatrootpornih boja, visokonaponskih izolatora i drugih proizvoda. Razlikuju se kozmetički i industrijski talk. Kozmetički talk uglavnom se koristi kao *baby* puder, a korišten je i za postavljanje sustava. [18]



Slika 13. SEM snimka čestica talka [19]

3.1.2. Silicijev dioksid (*Aerosil®*)

Drugi sustav postavljen je od čestica silicijevog dioksida (SiO_2) i aluminijevog oksida (Al_2O_3) u omjeru 5:1 (*AerosilCOK84*). Sastav ovakvog praška definiran je visoko dispergiranim silikatnim oksidom. Takve sitne čestice specifične površine $155 \text{ m}^2/\text{g}$ - $215 \text{ m}^2/\text{g}$ pokazuju reološka i tiksotropna svojstva visoko polarnih tekućina. Koristi se pripremu pasti za premazivanje, premaze na bazi vode i premaze na bazi otapala. [20]

3.2. Karakterizacija čestica

3.2.1. Određivanje raspodjele veličina čestica

Raspodjela veličina čestica određena je Shimadzu SALD-3101 uređajem za analizu veličine čestica laserskom difrakcijom od $0,5 \text{ μm}$ do 3000 μm (slika 14.). Rađena su četiri mjerenja, a u konačnim rezultatima korištene su srednje vrijednosti.



Slika 14. Uređaj za lasersko određivanje raspodjele veličina čestica SALD-3101, Shimadzu, Zavod za mehaničko i toplinsko procesno inženjerstvo, FKIT

3.2.2. Određivanje kuta mirovanja

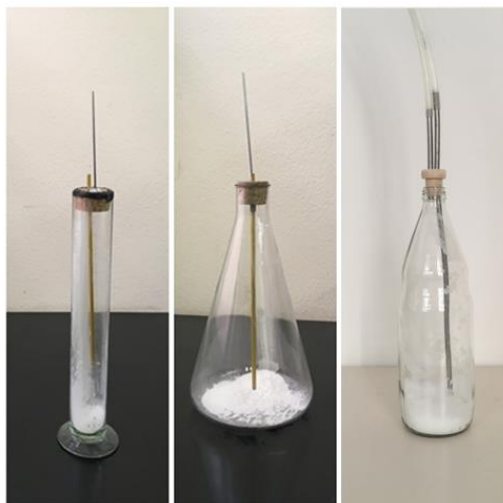
Karakterizacija struje čestica između ostalog podrazumijeva određivanje tecivosti čvrste tvari metodom mjerenja kuta mirovanja, odnosno nasipnog kuta. Praškasta tvar nasipava se u lijevak (slika 15.) do otprilike 60 % njegova volumena i pušta kroz otvor na dnu. Nastali stožac praška se fotografira, a kut mirovanja određuje se obradom fotografije softverskim paketom *KLONK Image Measurement*. Slika se obrađuje postavljanjem omjera visine stošca i polumjera osnovice stošca, što rezultira nasipnim kutom. [12]



Slika 15. Lijevak za određivanje kuta mirovanja, Zavod za mehaničko i toplinsko procesno inženjerstvo, FKIT

3.3. Formiranje ulazne struje zraka i fluidizacija

Za simulaciju struje onečišćenog zraka potrebno je konstruirati sustav uzmješavanja čestica praška. Pritom se mora paziti na oblik reaktora kako bi se stvorila homogena smjesa, dovod procesne struje do elektrofiltera i brtvljenje cijelog sustava. Na slici 16. prikazane su razmatrane varijante, a najboljom se za fluidizaciju pokazala boca. Naime, zbog najužeg grla, struja zraka dovoljna je da podigne čestice praška i uzmiješa ih. One zatim izlaze iz najšireg dijela boce. Dovod zraka osiguran je kompresorom koji upuhuje struju zraka u kraću metalnu cijev postavljenu u razini čepa, dok duža, također metalna ($\phi = 6 \text{ mm}$) hvata uzmiješanu struju i uvodi je u elektrofilter. Zbog postizanja veće brine ulaznog zraka, u kraću je cijev za opstrukciju postavljena plastična manjeg unutrašnjeg promjera ($\phi = 4 \text{ mm}$). Boca se postavlja okomito, a za brtvljenje su korištene ravne spojnice te plastične cijevi različitih promjera.



Slika 16. Različite izvedbe fluidizatora s cjevčicama za dovod zraka i odvod najsitnijih čestica

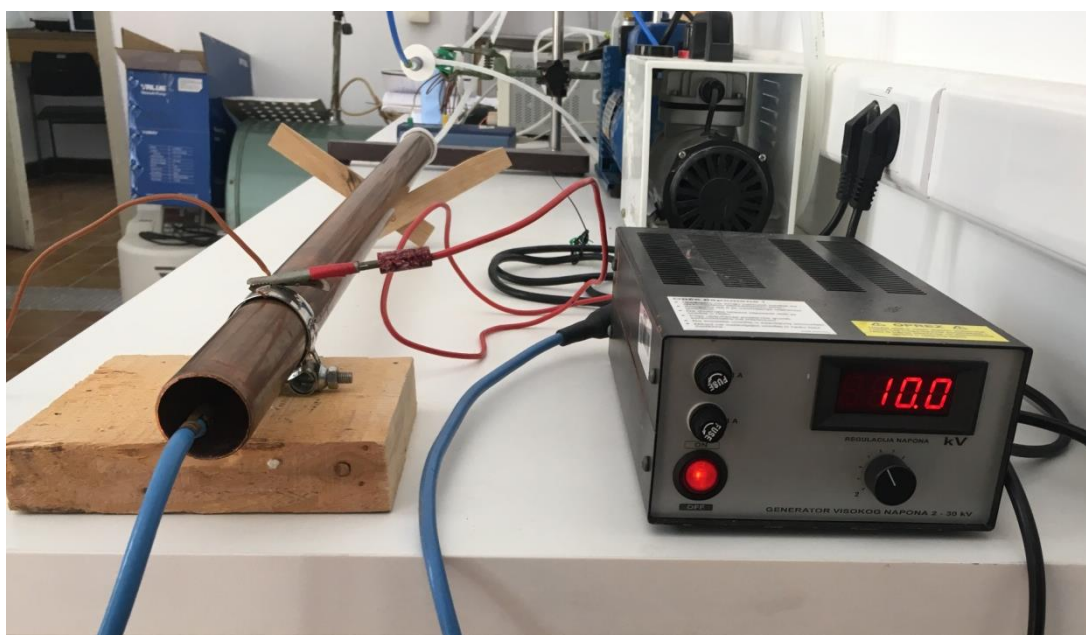
3.4. Izvedba elektrofiltera cijev u cijevi

Iako postoje i druge već spomenute izvedbe, za ovaj rad odabrana je žica u cijevi. Odabrana je bakrena cijev dostupna u laboratoriju, duljine 91 cm i unutrašnjeg promjera 33 mm. Elektroda koja prolazi kroz nju, također je bakrena, duljine 89 cm i promjera 6 mm, a učvršćena je s dva plastična tronošca (slika 17.).



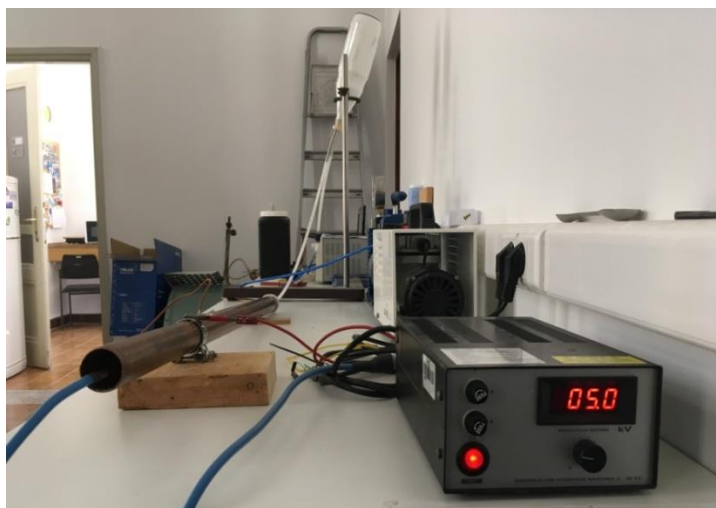
Slika 17. Izvedba elektrofiltera cijev u cijevi

Cijeli uređaj postavljen je vodoravno. Žica se spaja na izvor visokog napona, a vanjska cijev se uzemljuje. Plastičnom cjevčicom osiguran je dotok struje čestica. Za brtvljenje su korištene ravne spojnice te plastične cijevi različitih promjera. Sustav na kojem su provedena mjerenja prikazan je slikom 18.



Slika 18. Elektrostatski filter spojen na izvor visokog napona

Kad se cijela aparatura spoji (slika 19.), uključuje se izvor visokog napona postavljen na 3,9 kV, uključuje se kompresor te se sustav za uzmješavanje postavlja okomito. Isti postupak primijenjen je za mjerenja s narinutim naponom od 5 kV i 10 kV.



Slika 19. Dovod čestica u elektrofilter na odvajanje pri definiranom naponu

3.5. Određivanje probojnog napona

Zbog male geometrije cijelog uređaja, napon potreban za nabijanje čestica očekivano je manji od napona potrebnog za pojavu korone koji se inače koristi u elektrostatskoj precipitaciji. Za postizanje struje dovoljne jakosti korišten je generator visokog napona prikazan na slici 20. Izmjereni minimalni napon kod kojeg je uočeno prikupljanje čestica iznosi 3,9 kV. Može se stoga zaključiti da se čestice nabijaju isključivo djelovanjem električnog polja.

Probojni napon, napon kod kojeg se javlja iskrenje, a zapažen je i karakterističan zvuk, izmjeren je na 12,3 kV. Probojni napon označava graničnu vrijednost iznad koje više ne dolazi do prikupljanja čestica, a sigurni način rada je ugrožen. Daljnja ispitivanja rađena su pri naponu od 5 kV i 10 kV.



Slika 20. Generator visokog napona, 2 kV-30 kV

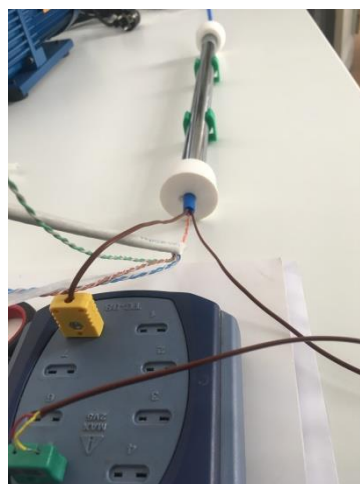
3.6. Osjetilo masenog protoka

Osjetila masenog protoka koja se najčešće koriste za određivanje i regulaciju malih protoka termalni su anemometri. Dva su principa rada takvih uređaja. Jedan uključuje dovođenje poznate količine topline struji plina i mjerenje pridružene promjene temperature, dok se drugi pak temelji na održavanju konstantne temperature plina i mjerenju energije (toplinske) potrebne za to.

Osnovni dijelovi termalnog osjetila masenog protoka uključuju dva senzora temperature i električni grijač (slika 21.). Grijač je napravljen od kantal žice promjera 0,3 mm, poznatog otpora $11,57 \Omega$ te je namotan u obliku zavojnice. Dva senzora temperature dva su termopara K-tipa postavljena na jednakoj udaljenosti ispred i iza grijača (4 cm). Oba termopara priključena su na uređaj PicoLog TC 08 (slika 22.) koji sa svojim programskim paketom na računalu omogućuje praćenje promjena temperature.



Slika 21. Grijač s dva termopara



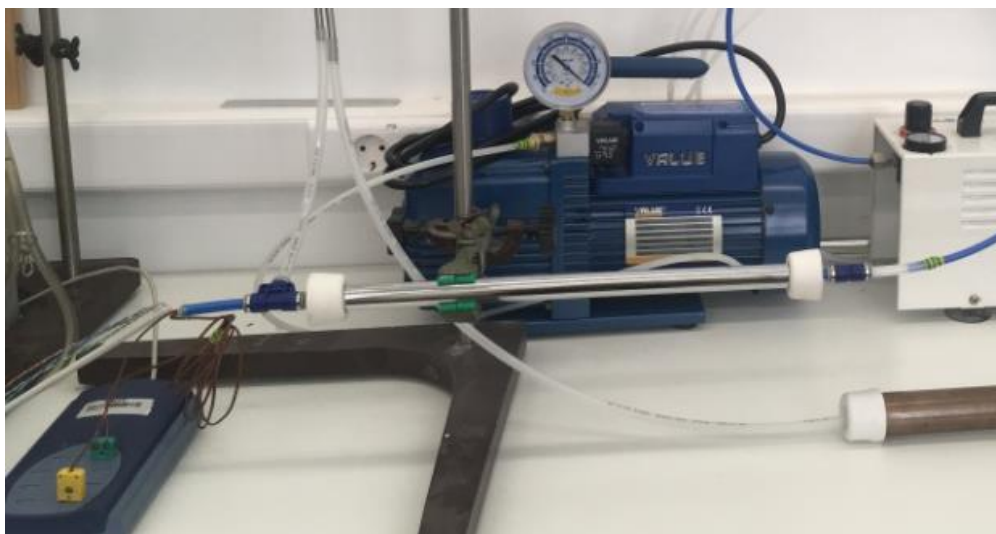
Slika 22. Mjerna ćelija spojena na uređaj za praćenje promjene temperature

Dovod topline može se osigurati postavljanjem grijača izvan cijevi ili direktnim postavljanjem u tok zraka. Za mjerenje malih protoka zraka (konstantan toplinski kapacitet) praktičnije su varijante s direktnim kontaktom grijača i plina, te je takva korištena za ispitivanja u ovom radu.

Plastična cijev u koju nastrujava zrak nepoznatog protoka provučena je kroz širu metalnu, na krajevima zabrtvljena gumenim čepovima. Šira metalna cijev spojena je na vakuum pumpu. Izoliranjem plastične cijevi smanjeni su gubici, a prijenos topline može se svesti na kondukciju. Prijenos topline zračenjem ne može se isključiti.

Grijač je spojen na laboratorijski uređaj za istosmjerno napajanje (Siglent SPD3303S) kojim se regulira jakost napona. Ispitivanja su rađena pri naponima od 3,535 V, 5 V i 7,071 V, koji ogovaraju snagama od 1,078 W, 2,159 W i 4,326 W. Aparatura za određivanje masenog protoka prikazana je slikom 23.

Baždarna mjerenja protoka ulazne struje zraka rađena su uz pomoć kompresora sa spremnikom definiranog volumena ($V = 50 \text{ dm}^3$), mjerenjem brzine istjecanja, odnosno promjene tlaka u spremniku.



Slika 23. Osjetilo masenog protoka

4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. Raspodjela veličina čestica

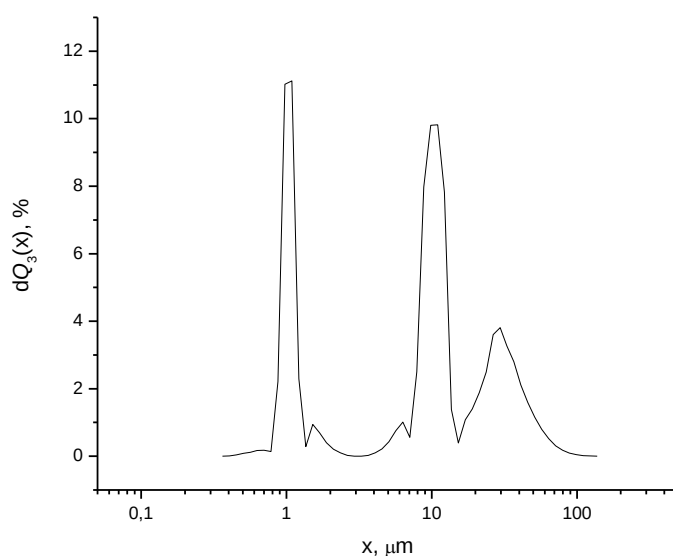
Pri kvantitativnom iskazivanju raspodjela veličina čestica koristimo se funkcijama raspodjele te karakterističnim promjerima populacije jedinki. Postoje, dakle, kumulativna funkcija raspodjele, diferencijalna funkcija raspodjele i funkcija raspodjele gustoće. Kumulativna funkcija raspodjele $Q_r(x)$ ukazuje na ukupni udio čestica manjih od veličine x . Diferencijalna funkcija raspodjele $dQ_r(x)$ ukazuje na udio čestica veličine koja odgovara srednjoj veličini promatranog veličinskog razreda. Indeks r ukazuje na tip raspodjele i u bliskoj je vezi s momentima raspodjele (0, 1, 2, 3). Za $r = 3$ raspodjela je masena ili volumna i iskazana je masenim ili volumnim udjelom. Funkcija gustoće raspodjele definira se omjerom diferencijalne funkcije raspodjele te širine veličinskog intervala.

$$q_r(x) = \frac{dQ_r(x)}{dx} \quad (9)$$

Korišteni uređaj mjeri veličinu čestica u rasponu od 0,5 μm do 3000 μm . Sva četiri mjerenja prvu veličinu bilježe na 0,4044 μm , a tablicom 1. prikazani su dobiveni rezultati u rasponu očitanih veličina. Nijedna čestica veća od 123,44 μm nije detektirana.

Ukupni doprinos svih veličina u ukupnoj raspodjeli može se kvantitativno iskazati samo jednom veličinom, a za potrebe ovog rada korišten je modus raspodjele. Modus raspodjele (x_{mode}) odgovara najučestalijoj veličini u promatranoj populaciji i iznosi 1,089 μm .

Od velikog značaja i primjene jest širina raspodjele koja ukazuje na monodisperznost odnosno polidisperznost uzorka. Prema NIST agenciji monodisperzan sustav je ona populacija čestica za koju se 90 % njih nalazi u rasponu $\pm 5\%$ od medijana raspodjele, dok je polidisperzan sustav ona populacija gdje se najmanje 10 % čestica razlikuje barem 5 % od medijana raspodjele. Grafički prikaz sa slike 24. jasno govori da se u ispitivanom slučaju radi o polidisperznom sustavu, za koji se pak može reći da je posljedica aglomeriranja manjih čestica u veće - aglomerate.



Slika 24. Raspodjele veličina čestica ispitivanog uzorka talka

4.2. Određivanje nasipnog kuta

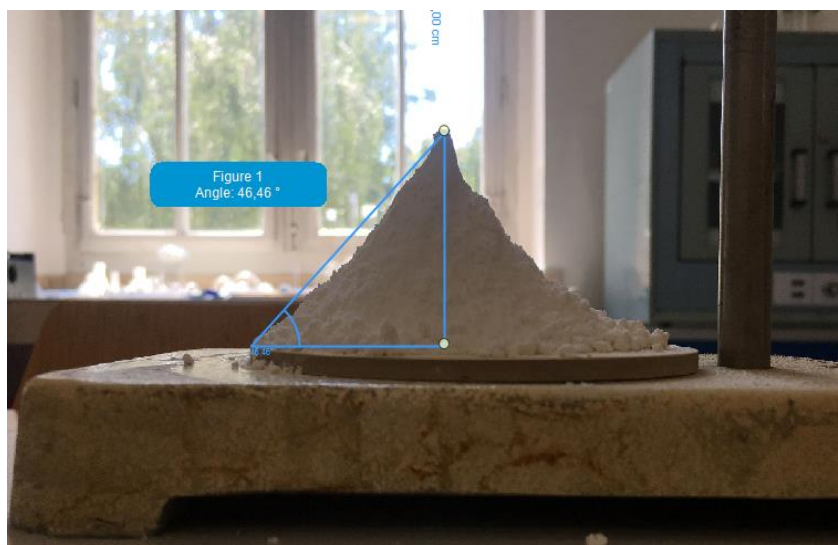
Pripadajuća tecivost čvrste tvari prema detektiranom kutu mirovanja određena je temeljem američke Pharmacopeje i prikazana tablicom 1.

Tablica 1. Kutovi mirovanja i pripadajuće tecivosti čvrste tvari

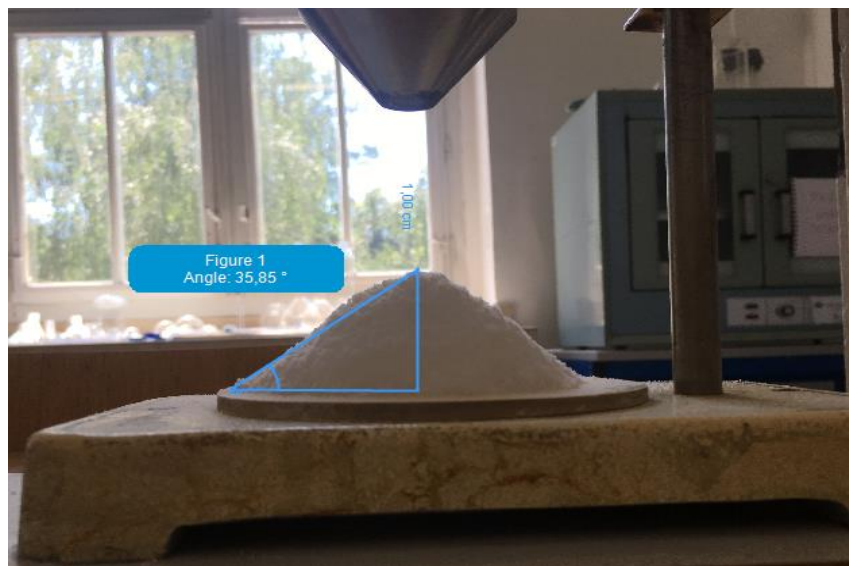
TECIVOST ČVRSTE TVARI	KUT MIROVANJA [°]
Izvrсна	25-30
Dobra	31-35
Prosječna	36-40
Osrednja	41-45
Loša	46-55
Vrlo loša	59-65
Izrazito loša	> 66

Rezultati mjerenja kuta mirovanja prikazani su na slikama 25. i 26. Tecivost talka definirana je kao loša s kutem mirovanja od 46,46 °. Mjereni kut mirovanja *Aerosila* iznosi 35.85° i kao takav svrstava se u prosječne do osrednje tecive čvrste tvari.

S obzirom na procijenjenu lošu tecivost oba praška, može se zaključiti da će fluidizacija najvećim dijelom ovisiti o protoku ulaznog zraka, dok se djelovanje sile gravitacije zbog kohezivnih sila može zanemariti.



Slika 25. Kut mirovanja čestica talka



Slika 26. Kut mirovanja čestica *Aerosila*

4.3. Mjerenja protoka zraka

Kako bi se pravilno kvantificirali rezultati obaranja čestica i ustanovila reproducibilnost ovakvog elektrofiltera, potrebno je poznavati maseni protok struje ulaznog zraka. Direktnim kontaktom grijača i zraka točno određena količina topline (Q) dovođena je u sustav, pa se masa uvedenog zraka može računati po jednadžbi (10). Promjenom napona mijenjana je snaga kojom se grijač zagrijava što je prikazano jednadžbom (11).

Razlika temperature koju detektiraju termoparovi postavljeni ispred i iza grijača omogućuje izračun masenog protoka iz navedenih jednadžbi (uz pretpostavku da su gubici topline zanemarivi):

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (10)$$

$$Q = P \cdot t \quad (11)$$

gdje je:

m	=	masa zraka [kg]
c_p	=	specifični toplinski kapacitet zraka [J/kg K]
ΔT	=	razlika temperature na termoparovima
P	=	snaga grijača [W]
t	=	vrijeme [s].

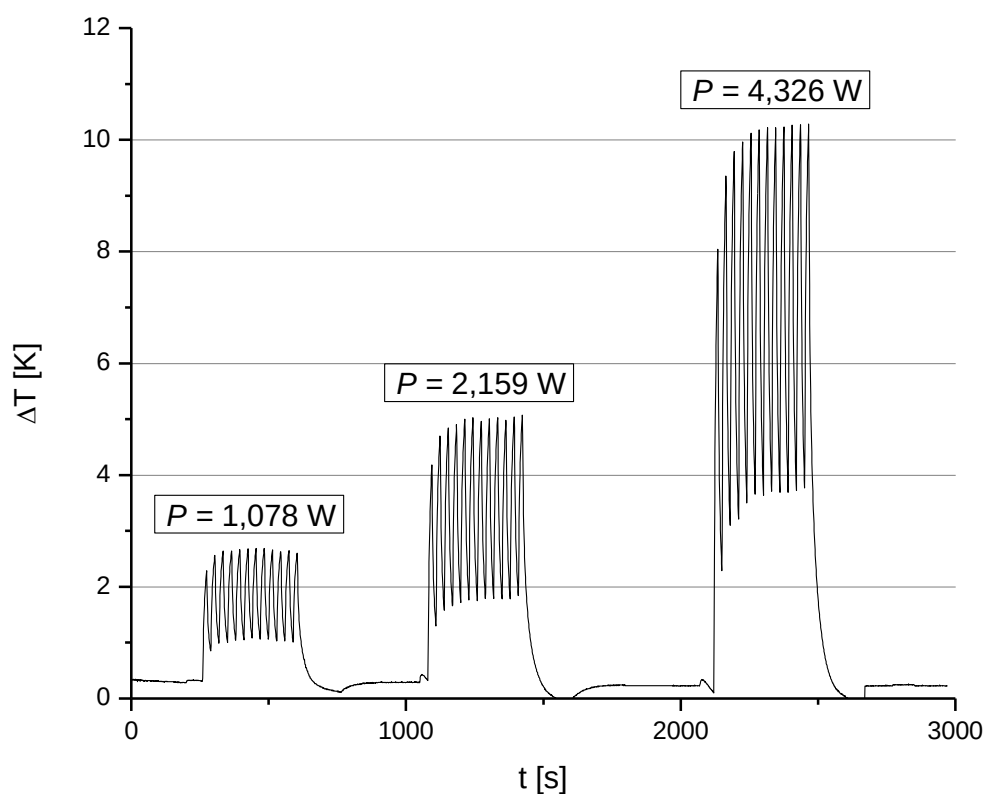
Mjerna je ćelija spojena na vakuum pumpu te se može pretpostaviti da nema gubitaka topline u okolinu. Stoga se jednadžbe (10) i (11) mogu izjednačiti, a ako je maseni protok definiran promjenom mase u vremenu, dobiveni oblik (12) može se koristiti za njegovo izračunavanje. Specifični toplinski kapacitet zraka preuzet je iz termodinamičkih tablica [21] i iznosi $c_p = 1,004 \text{ J/g K}$.

$$\dot{m} = \frac{P}{c_p \cdot \Delta T} \quad (12)$$

U tablici 2. dane su promjene temperature očitane pri konstantnim snagama. Dovod topline, odnosno paljenje grijača odvija se periodički s korakom od 15 sekundi. Prikaz periodičkog zagrijavanja i hlađenja struje zraka prikazan je slikom 27.

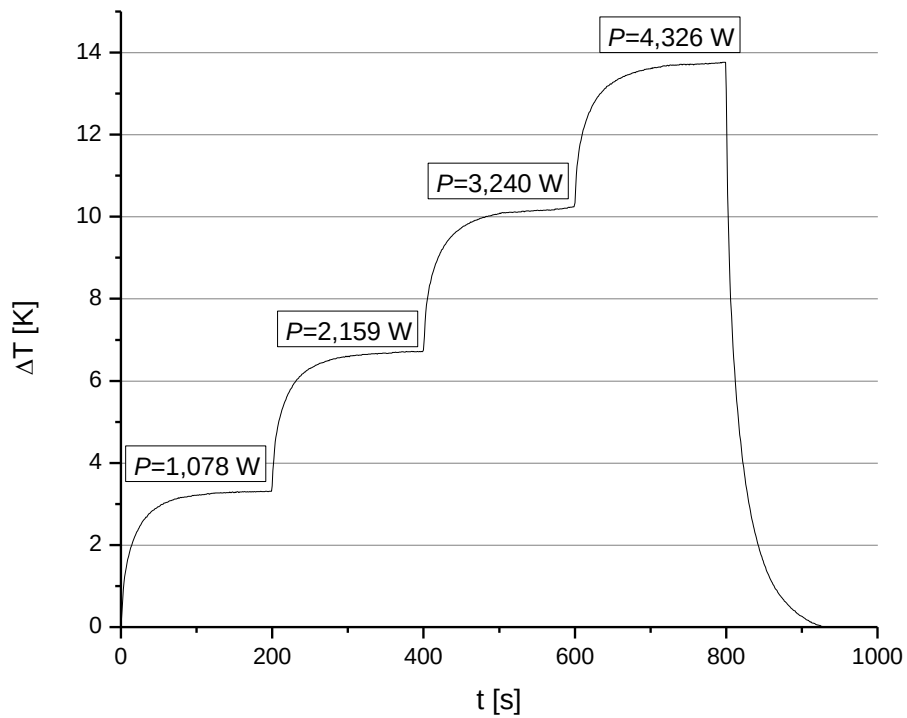
Tablica 2. Mjerene promjene temperature za određenu snagu grijača

P [W]	1,078	2,159	4,326
ΔT [K]	1,813	3,410	4,310
	1,644	3,823	4,113
	2,043	3,944	4,163
	2,125	3,818	4,325

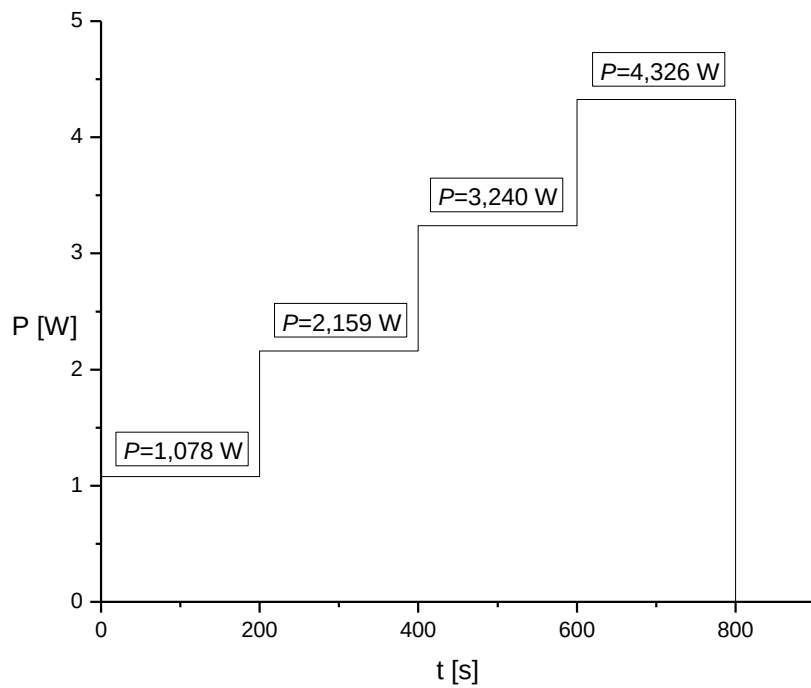
**Slika 27.** Periodičke promjene grijanja i hlađenja ulaznog zraka pri zadanim snagama grijača

Grafički prikazi ukazuju da je prva tri mjerenja potrebno odbaciti, ali i da je protok doista konstantan. Za računanje masenog protoka ulazne struje zraka rađena su mjerenja uspostave konstante temperature za pojedinu snagu grijača (slika 28.). Vrijeme potrebno za uspostavu stabilne vrijednosti temperature iznosi 200 sekundi (slika 29.). Uočen je linearni rast promjene temperature s porastom snage grijača (slika 30.). Krivulje grijanja opisane su jednadžbom procesa drugog reda (13).

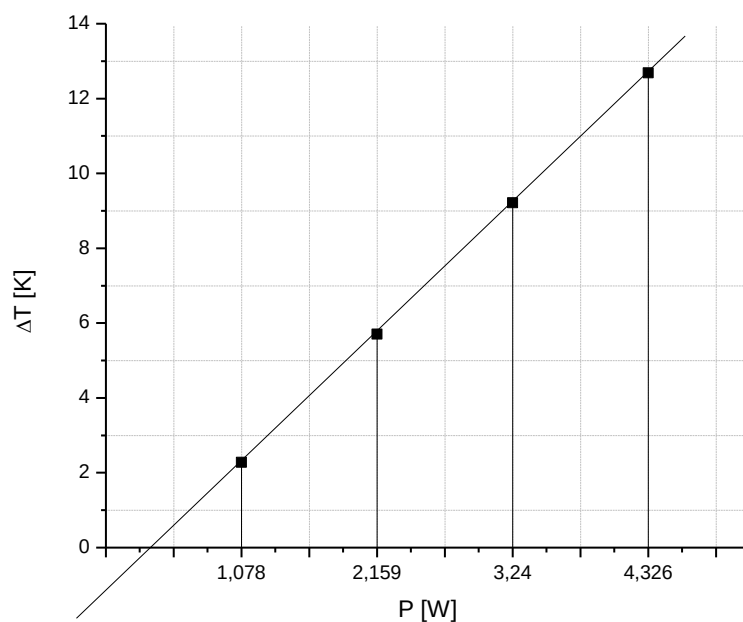
$$\Delta T = A_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) + A_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \quad (13)$$



Slika 28. Grafički prikaz uspostave kontantne promjene temperature za definirane snage grijača



Slika 29. Grafički prikaz grijanja ulazne struje zraka definiranom snagom u trajanju od 200 s



Slika 30. Grafički prikaz odnosa promjene temperature s promjenom snage grijača

Iz rezultata prikazanih u tablici 3. može se prema jednadžbi (10) izračunati maseni protok ulaznog zraka iz kompresora te njegova prosječna vrijednost iznosi 0,385 g/s. Najbliže toj vrijednosti pokazuju mjerenja pri radu grijača od $P = 2,159$ W, pa se ti uvjeti koriste u daljnjim ispitivanjima rada elektrofiltera.

Tablica 3. Mjerni podaci za izračun protoka zraka

P [W]	1,078	2,159	3,240	4,326
ΔT [K]	2,275	5,703	9,216	12,685

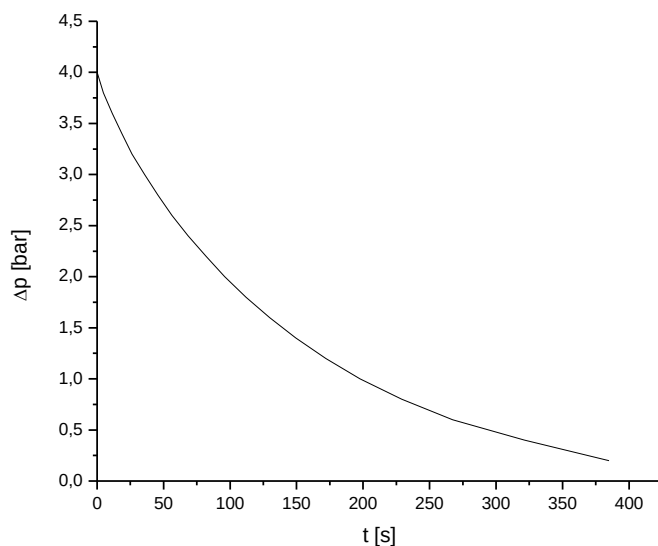
Isti princip primijenjen je i za računanje manjeg protoka zraka postignutog ispuštanjem dijela komprimiranog zraka u okolinu (preko sustava za uklanjanje ulja). Pri snazi grijača od $P = 2,159$ W određena je promjena temperature $\Delta T = 6,73$ K pa proizlazi da smanjeni protok zraka iznosi 0,319 g/s.

Baždarenje masenog protoka zraka ostvareno je mjerenjem promjene tlaka u spremniku kompresora tijekom vremena. Zasniva se na jednadžbi idealnog plina gdje je R opća plinska

konstanta ($R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), a T temperatura. Prosječna izmjerena temperatura u laboratoriju iznosi 298,62 K. Mjerenjem promjene tlaka poznatog volumena zraka ($V=50 \text{ dm}^3$, $M = 28,96 \text{ g/mol}$) jednačba stanja idealnog plina (7) može se pisati kao (14).

$$\frac{dm}{dt} = \frac{VM}{RT} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (14)$$

Iz toga slijedi da pri definiranim uvjetima teorijska vrijednost promjene mase zraka u vremenu pri promjeni tlaka od 1 bara u 100 sekundi (1000 Pa/s) iznosi 0,5823 g/s. Grafički prikaz izmjerene promjene tlaka u spremniku kompresora ($V = 50 \text{ dm}^3$) prikazan je na slici 31. Rađena su tri mjerenja, a za račun se koristi srednja vrijednost.



Slika 31. Promjena tlaka u ovisnosti o vremenu (pražnjenje spremnika kompresora)

Tlak u kompresoru korištenom za uvođenje čestica u elektrofilter konstantan je, očitao s manometra (klasa točnosti 2,5%) i iznosi $\Delta p = 0,6 \text{ bar}$. Baždarenjem u odnosu na mjerenu promjenu tlaka u spremniku, uz pretpostavku izotermnih uvjeta, može se prema (14) izračunati protok zraka pri $\Delta p = 0,6 \text{ bar}$. Vrijednost tako dobivenog protoka jednaka je 0,386 g/s. Ovo se izuzetno dobro slaže s vrijednošću određenom prema jednačbi (10), gdje maseni protok ulaznog zraka iz kompresora prosječno iznosi 0,385 g/s.

4.4. Određivanje učinkovitosti uređaja

4.4.1. Mjerenja mase

Preciznom vagom (4 značajne znamenke) mjerene su mase prije i nakon uključivanja uređaja. Mjerenja su rađena pri konstantnom protoku ($\dot{m} = 0,385 \text{ g/s}$ i $\dot{m} = 0,319 \text{ g/s}$), naponu od 10 kV i 5 kV u vremenu od 3 minute i 6 minuta. Iz usporednog prikaza prikupljanja čestica pri različitim naponima sa slike 32. vidljivo je da je za pri dvostruko većem naponu manja površina nakupljanja. Isto vrijedi za čestice talka kao i za čestice *Aerosila*. Tablično su prikazani dobiveni rezultati, a iz razlika masa u boci za uzmješavanje i masa prikupljenih čestica na elektrodama može se izračunati eksperimentalno određena učinkovitost prema jednadžbi:

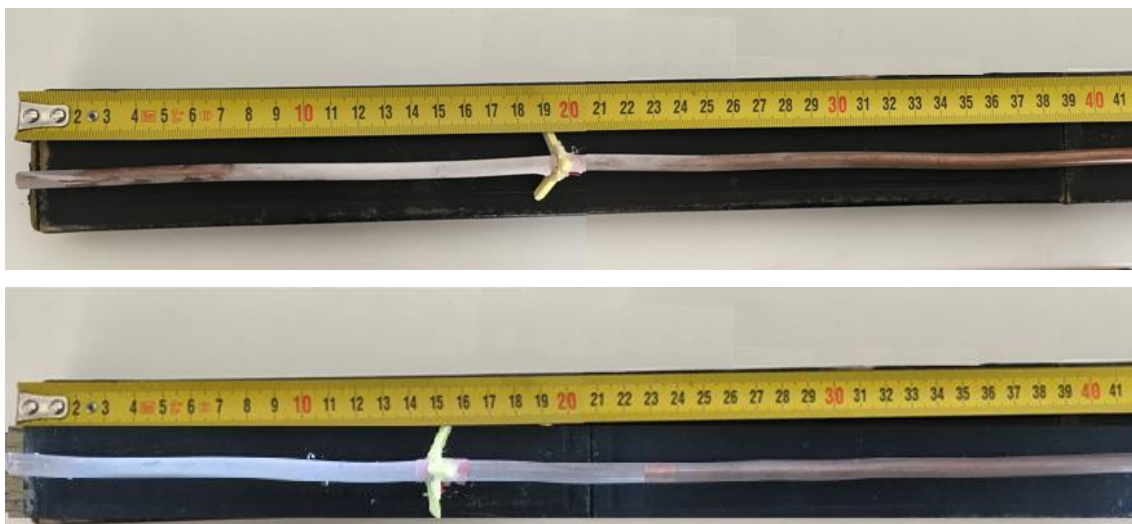
$$\eta = \frac{\Delta m_{cijev} + \Delta m_{žica}}{\Delta m_{boca}} \quad (15)$$

gdje je:

$$\Delta m_{cijev} = m_{cijev, nakon reakcije} - m_{cijev, prije reakcije}$$

$$\Delta m_{žica} = m_{žica, nakon reakcije} - m_{žica, prije reakcije}$$

$$\Delta m_{fluidizator} = m_{fluidizator, nakon reakcije} - m_{fluidizator, prije reakcije}$$



Slika 32. Usporedba površina prikupljanja čestica talka pri naponu od 5 kV (gore) i 10 kV (dolje), $t = 360 \text{ s}$

Tablica 4. Rezultati mjerenja mase prikupljenih čestica talka u pojedinim dijelovima uređaja pri naponu od 5 kV

U [kV]	5							
t [s]	180				360			
$\dot{m}$ [g/s]	0,385		0,319		0,385		0,319	
Δm_{cijev} [g]	0,24	0,22	0,08	0,08	0,50	0,55	0,08	0,09
Δm_{zica} [g]	0,06	0,07	0,01	0,02	0,12	0,08	0,02	0,02
Δm_{uk} [g]	+0,30	+0,29	+0,09	+0,10	+0,62	+0,63	+0,10	+0,11
$\Delta m_{fluidizator}$ [g]	-0,39	-0,40	-0,13	-0,15	-0,68	-0,70	-0,13	-0,17
η	0,769	0,725	0,692	0,667	0,912	0,900	0,769	0,647

Tablica 5. Rezultati mjerenja mase prikupljenih čestica talka u pojedinim dijelovima uređaja pri naponu od 10 kV

U [kV]	10							
t [s]	180				360			
$\dot{m}$ [g/s]	0,385		0,319		0,385		0,319	
Δm_{cijev} [g]	0,68	0,71	0,14	0,16	2,59	2,42	0,17	0,24
Δm_{zica} [g]	0,08	0,09	0,04	0,04	0,09	0,10	0,06	0,07
Δm_{uk} [g]	+0,76	+0,80	+0,18	+0,20	+2,68	+2,52	+0,23	+0,31
$\Delta m_{fluidizator}$ [g]	-1,35	-1,41	-0,21	-0,28	-2,83	-2,69	-0,33	-0,42
η	0,563	0,567	0,857	0,714	0,947	0,937	0,697	0,738

Vrijednosti prikazane tablicama 4. i 5. ukazuju da se pri manjim protocima značajno manja količina čestica talka uvodi u elektrofilter na obaranje. Ako prikupljanje promatramo u ovisnosti o naponu primijenjenom za nabijanje čestica, vidljivo je da se veća masa odvaja pri naponu od 10 kV. Također, bolja učinkovitost uređaja postiže se duljim trajanjem eksperimenta. Usporedni prikaz prikupljanja čestica pri navedenim uvjetima prikazane je slikama 33. i 34.

Iako se svi dijelovi aparature kroz koju prolazi struja čestica važu, zbog vrijednosti masa o kojima se radi (miligrami) određeni gubici postoje.



Slika 33. Prikupljanje čestica talka pri $U = 10 \text{ kV}$, $\dot{m} = 0,319 \text{ g/s}$



Slika 34. Prikupljanje čestica talka pri $U = 10 \text{ kV}$, $\dot{m} = 0,385 \text{ g/s}$

Za potrebe ispitivanja rada ovakvog elektrostatskog precipitatora uspostavljen je sustav uzgmješavanja još jedne vrste sitnih čestica. Tablicama 6. i 7. prikazane su vrijednosti promjene masa u pojedinim dijelovima elektrofiltera pri odvajanju čestica *Aerosila*.

Kao i kod prikupljanja čestica talka, pri nižem protoku uočene su manje promjene u masi, što je vidljivo i na slikama 35. i 36. Dok su se čestice talka uklanjale većim dijelom na početku kolektorske žice, kod obaranja ovih čestica najviše ih je uočeno na srednjem dijelu. Također, udaljenost do koje je uočen sloj prikupljenih čestica veća je kod *Aerosila*. Većim naponom obara se veća masa čestica, a najbolja učinkovitost postiže se duljim trajanjem eksperimenta.



Slika 35. Prikupljanje čestica *Aerosila* pri $U = 10 \text{ kV}$, $\dot{m} = 0,319 \text{ g/s}$



Slika 36. Prikupljanje čestica *Aerosila* pri $U = 10$ kV, $\dot{m} = 0,385$ g/s

Tablica 6. Rezultati mjerenja mase prikupljenih čestica *Aerosila* u pojedinim dijelovima uređaja pri naponu od 5 kV

U [kV]	5							
t [s]	180				360			
$\dot{m}$ [g/s]	0,385		0,319		0,385		0,319	
Δm_{cijev} [g]	1,24	1,14	0,09	0,09	2,81	2,77	0,16	0,19
$\Delta m_{žica}$ [g]	0,05	0,08	0,07	0,08	0,20	0,24	0,07	0,08
Δm_{uk} [g]	+1,29	+1,22	+0,16	+0,17	+3,01	+3,01	+0,23	+0,27
$\Delta m_{fluidizator}$ [g]	-1,34	-1,29	-0,20	-0,21	-3,05	-3,09	-0,30	-0,33
η	0,963	0,946	0,800	0,809	0,987	0,974	0,767	0,818

Tablica 7. Rezultati mjerenja mase prikupljenih čestica *Aerosila* u pojedinim dijelovima uređaja pri naponu od 10 kV

U [kV]	10							
t [s]	180				360			
$\dot{m}$ [g/s]	0,385		0,319		0,385		0,319	
Δm_{cijev} [g]	1,95	1,89	0,18	0,17	3,59	3,46	0,26	0,26
$\Delta m_{žica}$ [g]	0,40	0,39	0,04	0,05	0,61	0,62	0,04	0,05
Δm_{uk} [g]	+2,35	+2,28	+0,22	+0,22	+4,20	+4,08	+0,30	+0,31
$\Delta m_{fluidizator}$ [g]	-2,37	-2,33	-0,28	-0,27	-4,25	-4,11	-0,36	-0,34
η	0,992	0,978	0,786	0,815	0,988	0,993	0,833	0,912

Najbolji rezultati odvajanja čestica u oba definirana sustava postižu se pri protoku zraka od 0,385 g/s , naponu od 10 kV i trajanju eksperimenta od 360 sekundi, a prikazani su tablicom 8.

Tablica 8. Usporedni prikaz učinkovitosti odvajanja čestica talka i čestica *Aerosila*

U [kV]	10			
t [s]	360			
$\dot{m}$ [g/s]	0,385			
	Talk		<i>Aerosil</i>	
η [%]	99,2	97,8	98,8	99,3

Iako se svi dijelovi aparature kroz koju prolazi struja čestica važu, zbog vrijednosti masa o kojima se radi (miligrami) određeni gubici postoje. Geometrija uređaja definira uvjete u kojima se obavljaju odvage, pa se dio gubitaka može pripisati neadekvatnim instrumentima za točno određivanje mase. Moguće je, osim promjene geometrije uređaja, produljiti trajanje eksperimenta ili koristiti veće količine uzorka.

Povišeni napon govori o jačini stvorenog električnog polja. Tako se iz slike 30., na kojoj je vidljivo da je u istom vremenskom intervalu (360 s) oboreno više čestica na manjoj površini, može zaključiti da veći napon stvara jače električno polje.

4.4.2. Teoretska učinkovitost elektrofiltera

Teoretska učinkovitost može se procijeniti Deutsch-Andersonovom jednadžbom (16)^[3]:

$$\eta_T = 1 - e^{-v_t \left(\frac{A}{Q} \right)} \quad (16)$$

gdje je:

η_T	=	učinkovitost [%]
A	=	površina sakupljačke površine [m ²]
v_t	=	brzina taloženja [m/s]
Q	=	protok plina [m ³ /s]

Iz jednadžbe (7) izračunava se da je gustoća zraka u ispitivanim uvjetima $\rho_{zrak} = 1,184 \text{ kg/m}^3$, pa volumni protok kao omjer masenog protoka i gustoće zraka iznosi $Q = 3,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Prosječna brzina strujanja zraka kroz elektrofilter iznosi 0,39 m/s. Površina sakupljačke elektrode računa se prema izrazu (17). Za talk iznosi 81 cm², a za *Aerosil* 126 cm².

$$A = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot l \quad (17)$$

A	=	površina sakupljačkog prostora [m ²]
r	=	polumjer žice [m]
l	=	duljina žice [m].

Zbog nedostatka podataka i nemogućnosti izračuna brzine taloženja korištenih čestica teoretska učinkovitost ovakve izvedbe laboratorijskog elektrofiltera ne može se točno izračunati. No, uzme li se procijenjena vrijednost veličine čestica i iz literaturnih podataka za nju pripadajuća brzina taloženja, prema jednadžbi (16) može se izračunati učinkovitost rada kada na čestice *ne djeluju* sile električnog polja. Na taj je način opisana vjerojatnost zaostajanja dijela čestica pri ugašenom uređaju (bez narinutog napona), što za primijenjenu geometriju uređaja iznosi 12 %. Uključenjem, odnosno djelovanjem električne sile na čestice, masa na sakupljačkoj elektrodi se povećava, a učinkovitost uređaja raste i do iznad 99 %.

5. ZAKLJUČAK

Analizu ponašanja elektrofiltera karakterizira jaka međuovisnost pojedinih dijelova procesa elektrostatske precipitacije, no svi su definirani geometrijom cjelokupnog uređaja. Izrada elektrofiltera izvedbe cijev u cijevi za potrebe ovog rada uključuje odabir elektroda (ionizacijske i sakupljačke), izvor visokog napona i dovod struje čestica. Korištenjem lako dostupnih dijelova za spajanje i učvršćivanje, osigurani su relativno niski troškovi izrade, a sam je uređaj lako sastaviti i rastaviti.

Glavni ulazni parametri ovakve laboratorijske izvedbe su dovod čestica, njihova veličina i električna otpornost, maseni protok i napon potreban za stvaranje dovoljno jakog električnog polja. Ti su parametri za potrebe ispitivanja rada uređaja mijenjani, pa su tako odvajane dvije vrste čestica (dva praškasta sustava), pri dva različita napona i dva različita protoka, tijekom dva vremenska razdoblja. Dulje vrijeme trajanja eksperimenta pokazuje bolje rezultate što se može pripisati manjoj pogrešci zbog uvođenja veće količine čestica. Daljnji zaključci temeljeni su na radu elektrofiltera od 6 minuta.

I čestice talka i čestice *Aerosila* svrstavaju se u kategoriju finih prašaka [19, 22], no mjerenja pokazuju jača kohezivna međudjelovanja kod čestica talka. Njihova veća sklonost aglomeriranju i teža fluidizacija vidljiva je u manjim masama prikupljenim tijekom elektrofiltracije.

Minimalni napon potreban za nabijanje i odvajanje uvođenih dielektričnih čestica iznosi 3,9 kV. Povećanjem napona uočena je proporcionalnost s prikupljenom masom. Također, niži potreban napon za obaranje ukazuje da se čestice nabijaju isključivo djelovanjem polja. Za cijevne precipitatore poput ovoga područje nabijanja čestica otprilike je jednako području prikupljanja.

Za promjene parametra masenog protoka konstruirano je termalno osjetilo protoka s principom rada na temelju dovođenja konstantne količine topline. Održavanjem vakuumu u mjernoj ćeliji pretpostavlja se da nema gubitaka topline u okolinu, te je promjena temperature zraka posljedica topline dovedene u grijaču. Eksperimenti su provedeni uz dva masena protoka zraka, a rezultati pokazuju više prikupljenih čestica pri većem protoku zraka. Točan utjecaj protoka na rad ovakve izvedbe elektrofiltera nije određen i može se odrediti daljnjim istraživanjima.

Teoretski podaci o geometriji elektrofiltera pokazuju da ona značajno utječe na sve navedene parametre. Definiranjem dimenzija izrađenog uređaja, uvjetima rada i pretpostavkom konstantnih uvjeta temperature, tlaka i vlage zraka u laboratoriju, može se potvrditi ponovljivost mjerenja, a daljnjim istraživanjima i predvidjeti ponašanja sličnih sustava.

6. POPIS SIMBOLA

Q	naboj [C]
$\vec{P}$	dipolni moment po jedinici volumena [C/m ²]
$\vec{\delta}$	vektor pomaka naboja dielektrika [m]
N	broj atoma
P	dielektrična polarizacija [C/m ²]
ε	dielektričnost sredstva [As/(V m)]
ε_0	dielektričnost vakuumu, $8.854187817 \cdot 10^{-12}$ [As/(V m)]
ε_r	relativna dielektrična konstanta
E_{pol}	jakost električnog polja polarizacijskog naboja [V/m]
E_0	vanjsko električno polje dielektrika [V/m]
E	ukupna jakost električnog polja u dielektriku [V/m]
χ_e	električna susceptibilnost
F_e	sila električnog polja [N]
q	naboj čestice [C]
E	jakost električnog polja [V/m]
$v(q, E, r)$	brzina čestica [m/s]
$q(E, r)$	naboj čestice [C]
$C(r)$	Cunninghamova korekcija Stokesovom zakonu
η	dinamička viskoznost plina [Pa s]
Q_r	udio čestica određene vrste raspodjele
p	tlak plina [Pa]
V	volumen plina [m ³]
n	množina tvari [mol]
R	opća plinska konstanta [J/(mol K)]
T	temperatura [K]
ρ	gustoća plina [kg/dm ³]
A	površina presjeka cijevi [m ²]
v	brzina strujanja plina u cijevi [m/s]
$\emptyset$	promjer cijevi [mm]
x_{mode}	najučestalija veličina u promatranoj populaciji
Q	toplina [J]

m	masa zraka [kg]
c_p	specifični toplinski kapacitet zraka pri 25 °C [J/(kg K)]
ΔT	razlika temperature na termoparovima [K]
P	snaga grijača [W]
t	vrijeme [s]
A_1, A_2	amplitude
τ_1, τ_2	vremenske konstante [s]
M	molarna masa zraka [g/mol]
$\frac{dm}{dt}$	promjena mase po jedinici vremena [g/s]
$\frac{dp}{dt}$	promjena tlaka po jedinici vremena [Pa/s]
Δp	promjena tlaka [bar]
$\dot{m}$	maseni protok [g/s]
η	eksperimentalna učinkovitost
Δm	razlika masa [g]
U	napon [kV]
η_T	teoretska učinkovitost
v_t	brzina taloženja [m/s]
A	površina sakupljačkog prostora [m ²]
$\dot{Q}$	volumni protok plina [m ³ /s]
ρ_{zrak}	gustoća zraka [kg/m ³]
r	polumjer žice [m]
l	duljina žice [m]

7. LITERATURA

- [1] Tillman, D. A., Coal-Fired Electricity and Emissions Control: Efficiency and Effectiveness, Butterworth-Heinemann, Elsevier, UK, 2018
- [2] Korištenje interneta (pristup 7. srpnja 2020)
<https://www.chemie.de/lexikon/Elektrofilter.html>
- [3] Oglesby S. Jr., Nichols G.B., A Manual of Electrostatic Precipitator Technology Part I - Fundamentals, Southern Research Institute, SAD, 1970.
- [4] Korištenje interneta (pristup 20. lipnja 2020)
<https://www.britannica.com/technology/electrostatic-precipitator>
- [5] Cheremisinoff, N. P., Handbook of air pollution prevention and control, Butterworth, Heinemann, SAD, 2002.
- [6] Vrsaljko D., Procesna oprema u ekoinženjerstvu, interna skripta, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2017.
- [7] Duroudier J. P., Separation by Decantation or Precipitation in a Magnetic or Electrical Field, Liquid-Gas and Solid-Gas Separators, 1-46, 2016.
- [8] Turner J. H., Lawless, P.A., Yamamoto, T., Coy, D.W., Greiner, G.P., McKenna, J.D., Vatavuk, W.M., Electrostatic Precipitators, SAD, 1999.
- [9] Oglesby S. Jr., Nichols G.B., A Manual of Electrostatic Precipitator Technology Part II - Application Areas, Southern Research Institute, SAD, 1970.
- [10] Berberović S., Dadić M., Elektromagnetska polja, Elektrostatika, Zagreb 2010
- [11] Korištenje interneta (pristup 26. lipnja 2020)
<https://www.elex.ch/de/content/elektrofilter>
- [12] Matijašić G., Mehaničko procesno inženjerstvo, Nastavni materijali, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2014.
- [13] Filipović I., Lipanović S., Opća i anorganska kemija: I dio; 37, 92-95, 1987
- [14] Nakayama Y., Introduction to fluid mechanics, 55-57, Tokai University, Japan, 1998.

- [15] Alnor Hvac Assessment handbook, A Practical Guide To Performance Measurements In Mechanical Heating, Ventilating And Air Conditioning Systems, 2014
- [16] Perry, 1984. Perry's Chemical Engineers' Handbook, edited by Robert Perry and Don Green, 6' Edition, McGraw-Hill, New York, NY, 1984.
- [17] Veranth J.M., Ghandehari H., Grainger D.W., Nanoparticles in the Lung, Comprehensive Toxicology, Volume 15, 2018, Pages 322-341
- [18] Wesolowski M., Thermal Decomposition of Talc: A Review, Institute of Chemistry and Analytics, Medical Academy, Al. K. Marksa 107, PI 80- 416 Gdansk, Poland, 1984
- [19] Korištenje interneta (pristup 10.srpnja 2020)
<https://www.biusante.parisdescartes.fr/cosmeto/en/05-01.htm>
- [20] Korištenje interneta (pristup 1. srpnja 2020)
<https://products-re.evonik.com/www2/uploads/productfinder/AEROSIL-COK-84-EN.pdf>
- [21] Vasić Rački Đ., Bilance Tvari i Energije II, Interna skripta, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2003.
- [22] Darvell B.W., Materials Science for Dentistry (Tenth Edition), 2018

8. ŽIVOTOPIS

Sandra Trstenjak [REDACTED] Osnovnu školu završava 2008. godine u Prelogu. Srednjoškolsko obrazovanje nastavlja u Gimnaziji Čakovec, koju završava 2012. godine kada upisuje i Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu. Titulu prvostupnice ekoinženjerstva stječe akademske godine 2017./2018. Aktivna je sportašica i igračica hrvatske ženske futsal reprezentacije.