



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**PÜROLÜÜSI KATSESEADME
ELEKTROSTAATILISE FILTRI KÕRGEHINGE
PROJEKTEERIMINE**

**DESIGNING THE HIGH VOLTAGE FUNCTIONS OF AN
ELECTROSTATIC PRECIPITATOR FOR AN
EXPERIMENTAL PYROLYSIS UNIT**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Otto-Kristjan Vanajuur

Üliõpilaskood: 179511EAAB

Juhendaja: Kristjan Pütsep, lektor

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“18” mai 2021.

Autor: Otto-Kristjan Vanajuur

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“18” mai 2021.

Juhendaja: Kristjan Pütsep

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Otto-Kristjan Vanajuur (*autori nimi*) (sünnikuupäev: 07.04.1998)

1 Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
Pürolüüsi katseseadme elektrostaatilise filtri kõrgepinge projekteerimine,
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on Kristjan Pütsep,
(*juhendaja nimi*)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh
Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni
autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna
kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni
autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2 Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka
autorile.

3 Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

18.05.2021 (*kuupäev*)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Otto-Kristjan Vanajuur

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Pürolüüsi katseseadme elektrostaatilise filtri kõrgepinge projekteerimine

Kuupäev:
18.05.2021

55 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja: lektor Kristjan Pütsep

Töö konsultandid: Ivar Kiitam, Viktor Rjabtšikov, Alar Konist, Paul Taklaja, Ilja Ruljov

Sisu kirjeldus:

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli projekteerida elektrostaatiline filter, mille saaks ka realselt valmis ehitada. Selle eesmärgi täitmiseks tutvuti esmalt erinevate teadusartiklitega, kirjandusega ning 2020. aastal samal teemal koostatud lõputöödega, et tutvuda ning sügavamalt mõista elektrostaatilisi filtreid. Töö esimeses peatükis on selgitatud elektrostaatilise filtrite tööpõhimõtteid. Teises peatükis on kirjeldatud samal projektiga tegelenud kaastudengi tööd. Kolmandas peatükis on teostatud arvutused elektrostaatilise filtri kasuteguri määramiseks ning läbi selle tööpinge määramiseks. Samuti on selles peatükis kirjeldatud voolu määramiseks teostatud katseid ning analüüsitud nende katsete tulemusi. Viimases ehk neljandas peatükis on kirjeldatud valitud kõrgepinge toiteallikat. Antud lõputöö tulemused peaksid looma aluse, et tulevikus oleks võimalik valmis ehitada planeeritud elektrifilter, mis täidaks oma eesmärgi.

Märksõnad: elektrostaatiline filter, suitsugaas, osakesed, koroonalahendus, koroneeriv elektrood, sadestav elektrood, plaat-tüüpi elektrostaatiline filter

ABSTRACT

<i>Author:</i> Otto-Kristjan Vanajuur	<i>Type of the work:</i> Bachelor's Thesis
<i>Title:</i> Designing the high voltage functions of an electrostatic precipitator for an experimental pyrolysis unit	
<i>Date:</i> 18.05.2021	<i>55 pages (the number of thesis pages including appendices)</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor of the thesis:</i> Lector Kristjan Pütsep	
<i>Consultants:</i> Ivar Kiitam, Viktor Rjabtšikov, Alar Konist, Paul Taklaja, Ilja Ruljov	
<i>Abstract:</i> <p>The purpose of this bachelor's thesis was to create a project according to which, an electrostatic precipitator could be built. In order to complete this task various research articles, literature as well as bachelor's theses written on the same topic in 2020 were consulted to provide a deeper understanding of electrostatic precipitators. The first chapter of this thesis concerns the working principles of electrostatic precipitators. The second chapter focuses on the work done by the other student working on this project. The third chapter displays the calculations conducted to determine the theoretical efficiency of an electrostatic precipitator as well as a necessary operating voltage. Additionally, this chapter describes the laboratory tests conducted to determine the necessary operating current and analyses the results of these tests. The fourth and final chapter explains the chosen high voltage power source. The results obtained from this thesis should lay the ground to build an electrostatic precipitator in the future that would be fit for purpose.</p>	
<i>Keywords:</i> electrostatic precipitator, flue gas, particles, corona discharge, discharge electrode, collector electrode, plate-type precipitator	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Pürolüüsi katseseadme elektrostaatilise filtri kõrgepinge projekteerimine
Lõputöö teema inglise keeles:	
Üliõpilane:	Otto-Kristjan Vanajuur, 179511EAAB
Eriala:	Elektroenergeetika ja mehhatroonika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Kristjan Pütsep
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	18.09.2021
Lõputöö esitamise tähtaeg:	18.05.2021

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Antud bakalaureusetöö eesmärgiks on tutvuda elektrostaatiliste filtrite ehk elektrifiltritega, mis kasutavad kõrgepinget tahkete osakeste eraldamiseks suitsugaasidest. Filter leiab rakendust põlevkivi pürolüüsi katseseadme koosseisus, Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia instituudi katsehallis korpuses U06.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on koostada projekt, mille alusel saaks ehitada elektrostaatiline filter tahkete osakeste sisalduse vähendamiseks (pürolüüsi)gaaside keskkonnas.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Uurida materjalide sobilikust filtri ning elektrikilbi ühendamiseks;
- Selgitada välja kõige kuluoptimaalsem ning efektiivsem ühendus;
- Võrrelda teoreetiliste lahenduste reaalselt sobivust;
- Kuidas leida kõige optimaalsem filtri füüsiline lahendus?

4. Lähteandmed

Lähteandmeteks on 2020. kevadel Tallinna Tehnikaülikoolis kaitstud lõputööd. Antud töö käigus uuritakse vastavasisulisi teadusartikleid, energiatehnoloogia instituudi poolt välja töötatud pürolüüsiseadme kavandatavaid parameetreid ning kasutatavate detailide tootelehti.

5. Uurimismeetodid

Tutvutakse vastavsisulise teadus artiklitega, disainida ning valmis ehitada antud kõrgepinge filter. Selle teostamiseks tutvutakse kirjanduse ning olemasolevate lahenduste ja projektidega. Filtri ehitamisel lähtutakse kogutud andmetest, ökoloogilise jalajälje vähendamise printsiibist ning teistest headest tavadest.

6. Graafiline osa

Graafiline osa on tööpõhiosas välja toodud tekstijoonistena, lisades kajastatakse filtri jooniseid, elektriskeeme ning teisi suuremõõtmelisi skeeme või jooniseid.

7. Töö struktuur

- Eessõna
- Sissejuhatus
- Elektrifiltrite teoreetilised alused
- Elektrifiltri toite ning ühenduse realiseerimine
- Järeldused
- Kokkuvõte
- Kasutatud kirjandus
- Lisad

8. Kasutatud kirjanduse allikad

X. Xu, X. Gao, P. Yan, W. Zhu, C. Zheng, Y. Wang, Z. Luo, K. Cen „Particle migration and collection in a high-temperature electrostatic precipitator” in „Separation and Purification Technology” 143, Hangzhou, 2015.

G. Xiao, X. Wang, G. Yang, M. Ni, X. Gao, K. Cen „An experimental investigation of electrostatic precipitation in a wire-cylinder configuration at high temperatures” in „Powder Technology” 269, 2015.

K. P. Shah „Construction, Working, Operation and Maintenance of Electrostatic Precipitators (ESPs)”, 2017.

Pürolüüsiseadme alusdokumendid (Energie tehnoloogia instituut)

D. Iliin „Pürolüüsi katseseadme elektrifiltri materjalide valik lähtuvalt talitlusparameetritest”, Tallinn, 2020

A. Bõkov „Pürolüüsi katseseadme elektrifiltri elektritoide”, Tallinn, 2020

M. Neustus „Pürolüüsi katseseadme elektrifiltri korpuse ja elektroodide kujundamine tahkete osakeste vähendamiseks”, Tallinn, 2020

9. Lõputöö konsultandid

Alar Konist, Viktor Rjabtšikov, Ivar Kiitam, Paul Taklaja

10. Töö etapid ja ajakava

Kirjanduse kogumine ning tutvumine - (09.11.2020)

Seadmete valik - (16.11.2020)

Filtri disain - (30.11.2020)

Teoreetilise osa kirjutamine - (30.12.2020)

Filtri ehitus - (15.01.2021)

Ühendus elektrikilbiga - (31.01.2021)

Töö tulemuste kirjeldamine - (28.02.2021)

Järelduste kirjutamine, kokkuvõtte koostamine - (31.03.2021)

Töö esimene versioon valmis, juhendajale läbilugemiseks saatmine - (21.04.2021)

Paranduste sisseviimine, juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine - (05.05.2021)

Töö lõplik versioon valmis - (16.05.2021)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	10
Lühendite ja tähiste loetelu	11
SISSEJUHATUS	13
1 ELEKTROSTAATILISTE FILTRITE TEOREETILISED ALUSED	15
1.1 Elektrostaatilise filtri tööprotsess	15
1.2 Kõrgepinge seadmed ning elektrifiltrite toide	16
1.3 Koroonalahendus.....	17
1.4 Osakeste laadimine ja liikumine	19
1.5 Osakeste kontsentratsiooni mõju.....	20
1.6 Vahekokkuvõte	21
2 FILTRI DISAIN, ANDURID NING SEADMED	22
2.1 Ülesande püstitus	22
2.2 Filtri disaini, andurite ning seadmete lühikokkuvõte	22
3 TEOREETILISED ARVUTUSED JA PRAKTILISED KATSED	26
3.1 Planeeritud elektrostaatiliselt filtrilt oodatavad parameetrid	26
3.2 Planeeritud elektrostaatilise filtri teoreetiline kasutegur.....	27
3.3 Katsed planeeritud elektrostaatilise filtri mudeliga	33
3.4 Vahekokkuvõte	39
4 ELEKTROSTAATILISE FILTRI KÕRGEPINGE TEHNILINE LAHENDUS	40
4.1 Toiteallikas ja kaablid	40
4.2 Vahekokkuvõte	42
KOKKUVÕTE	43
SUMMARY	44
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	46
LISA 1 ELEKTROSTAATILISE FILTRI TÖÖPROTSESS [6].....	48
LISA 2 FUYU PÕLEVKIVI TERMILISED NING ELEKTRILISED OMADUSED [14].....	49
LISA 3 LÕPUTÖÖ KATSEJUHEND.....	50

EESSÕNA

Antud lõputöö teema pakkus meile välja elektroenergeetika ning mehhatroonika programmijuhti professor Lauri Kütt, lootuses realiseerida eelmisel aastal koostatud elektrifiltri põhimõtteid tutvustava töö alusel reaalne lahendus. Juhendajaks oli meil, alati abivalmis ning professionaalne lektor Kristjan Pütsep, kelle mitmekülgsete motiveerivate aktsioonideta ei oleks me nii kaugele jõudnud. Tööks vajalikud materjalid koguti TTÜ raamatukogust, internetist ning TTÜ kõrgepinge laboris koostöös doktorant-nooremteadur Ivar Kiitamiga, kelle abita oleks jäänud lahenduse kõrgepinge osa puudulikuks. Konsultantidena olid oma nõu ning jõuga veel igati abiks doktorant-nooremteadur Viktor Rjabtšikov, vanemlektor Paul Taklaja ning professor Alar Konist.

Pürolüüsi katseseadme projekti koostamine jagati kahe tudengi vahel ära. Egert Siigur tegeles filtri mehhaanilise disaini ning seadmete ja andurite valikuga. Tänu heale koostööle sujus töö koostamine probleemideta. Antud töö autor tegeles kõrgepinge elektrostaatilise filtri elektrilise poole projekteerimisega. Lisaks soovin tänada piiramatu kannatusega WEGi tööstuse valdkonna projektijuhti Ilja Ruljovit, kes aitas leida vajaliku toiteallika antud kõrgepinge filtri jaoks.

Lühendite ja tähiste loetelu

- A – koroonavoolu algväärtus
 A_c – sadestavate elektrodide pindala
 B – koroonavoolu lõppväärtus
 B_{ioon} – ionide liikuvus
 B_{osa} – osakeste liikuvus
 B_{kulu} – põlevkivi kulu pürolüüsiseadmes
 C_c – Cunninghami parandustegur
 D_k – osakeste kontsentratsiooni mõju koroonavoolule kirjeldav tegur
 D_p – osakesete diameeter
 e – elementaarlaeng
 E – laadiva elektrivälja tugevus
 E_{av} – elektrivälja keskmine tugevus elektrostaatilises filtris
 E_c – elektrivälja tugevus sadestaval elektroodil
 E_{max} – elektrivälja maksimaalne tugevus elektrostaatilises filtris
 F – arvutuslik tegur
 G – elektroodi geomeetria koefitsient
 H – elektrodide vaheline kaugus
 I – vool
 I_{kar} – koroonavoolu väärtus pingevoolu karakteristikul
 k – ionide liikuvus
 K – maksimaalse ning keskmise elektrivälja suhe elektrostaatilises filtris
 N – osakeste kontsentratsioon
 N_0 – osakeste algkontsentratsioon
 N_{ioon} – ionide arv mahuühiku kohta
 p – rõhk otsitaval väärtusel
 p_0 – rõhk väärtuse mõõtmisel
 q – osakeste laeng
 Q – gaasi mahuvoolukiirus
 S – osakeste kogupindala gaasi mahuühiku kohta
 t – osakeste ning välja kokkupuute aeg
 T – temperatuur otsitaval väärtusel
 T_0 – temperatuur väärtuse mõõtmisel
 $T-R$ – trafo-alaldi (*transformer-rectifier*)
 T_f – väljalahendamise konstant
 U – pinge
 U_{ok} – koroonal algpinge

U_p – ülelöögpinge

U_{rak} – koroneerival elektroodil rakendatav pinge

W – sadestavate ning koroneerivate elektroodide vaheline kaugus

ε – osakeste dielektriline läbitavus

ε_0 – vaakumi dielektriline läbitavus

$\eta(D_p)$ – elektrostaatilise filtri kasutegur

κ – tolmuosakese dielektriline konstant

λ – elektroni vaba tee pikkus gaasis

$\lambda(p, T)$ – elektroni vaba tee pikkus mõjutatuna rõhust ja temperatuurist

μ – õhu dünaamiline viskoossus

ξ – osakeste alalaetuse aste maksimaalse laengu suhtes

SISSEJUHATUS

Üldlevinud teadmiste põhjal saab väita, et elektrostaatilised filtrid mängivad tänapäevastes gaasipuhastusagregaatides väga olulist ning spetsiifilist rolli, võimaldades eemaldada heitgaasidest nii tahkeid kui ka vedelaid osakesi. Oma küllaltki lühikese ajaloo jooksul on elektrostaatilised filtrid muutnud asendamatuks osaks tänu nende kõrgele kasutegurile, madalale energiakulule, universaalsusele ning võimele püüda kinni isegi kõige väiksemaid saasteaine osakesi. Rakendades elektrostaatilisi filtreid on olnud võimalik märgatavalt vähendada heitgaasides olevaid kahjulikke osakesi ning seeläbi säästa inimeste tervist. Lisaks on elektrostaatilised filtrid käinud käsikäes tööstusettevõtete jätkusuutlikusega võimaldades neil jätkata tööd isegi olukorras, kus keskkonnanõuded muutuvad üha rangemaks.

Tulenevalt plaanist luua Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia instituudi katsehalli, Ehitajate tee 5 U06 korpusesse põlevkivi pürolüüsi katseseade paluti koostada katseseadmele sobilik elektrostaatiline filter. Antud katseseade on mõeldud keevkihttehnoloogia võimaluste uurimiseks, et paranda olemas olevat pürolüüsi protsessi. Juhul kui katsetulemused on positiivsed on nende abil võimalik töötada välja töökindlam ning keskkonnasõbralikum tööstuslik põlevkiviõli tootmiseade. Elektrostaatiline filter täidaks selles katseseadmes oma ootuspärast rolli. Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks eelmainitud elektrostaatilise filtri kõrgepinge poole jaoks rakendamisvalmis projekti koostamine.

Käsitletava elektrostaatilise filtri projekteerimine toimus ka 2020. aastal D. Iliini, A. Bõkovi ja M. Neustuse lõputöodes, kelle koostatud bakalaureusetöid rakendati algallikatega tutvumiseks ning arvutustel algspositsioonide määramiseks. Sarnaselt eelmisele aastale jagati ka sellel aastal elektrostaatilise filtri projekteerimine võrdselt ära, kuid erinevalt eelmisest aastast tegeles selle tööga kaks tudengit. Egert Siigur tegeles filtri mehhaanilise disaini ning seadmete ja andurite valikuga. Antud bakalaureusetöö autor tegeles elektrostaatilise filtri kõrgepinge poole projekteerimise ning sellega seotud ülesannetega. Selle saavutamiseks tutvuti teemakohase kirjandusega, teostati teoreetilisi arvutusi ning koostati lihtsustatud mudel, mille abil viidi läbi vajalike praktilisi katseid Tallinna Tehnikaülikooli kõrgepinge laboris.

Bakalaureusetöö autor valis selle teema, kuna leiab, et see teema on väga akuutne arvestades arenguid põlevkivi rakendamises nii energeetika valdkonnas kui ka keemiatööstuses ning keskkonna kaitses. Selleks, et jätkata põlevkivi väärindamist ning sellega kaasnevat majandusliku heaolu on vaja teha tõsisid samme heitgaaside

vähendamises. Selles sammus aga mängivad olulist rolli elektrostaatilised filtrid, millela on tänapäevaste nõuete saavutamine väga keeruline kui mitte reaalsusest irduv. Tulenevalt põlevkivi vähesest rakendamisest laias maailmas ei ole ka selle bakalaureusetöö autori arvates mõtet oodata ka protsessis olevate probleeme lahendavaid arenguid mujalt maailmast.

Käesolev bakalaureusetöö on jagatud neljaks peamiseks peatükiks ning mitmeks erinevaks alapeatükiks. Esimeses peatükis kirjeldatakse elektrostaatiliste filtrite teoreetilisi aluseid, keskendudes peamiselt elektrilisele poolele, ning elektriväljale vajaliku toite tagamist. Teises peatükis tutvustatakse lühidalt Egert Siiguri poolt tehtud tööd. Kolmandas peatükis lahatakse teostatud teoreetilisi arvutusi elektrostaatilise filtri kasuteguri arvutamiseks ning analüüsitakse volt-amper karakteristiku määramiseks teostatud katseid. Neljandas ehk viimases peatükis tutvustatakse valitud kõrgepinge seadmeid ning tutvustatakse kõrgepinge praktilist lahendust.

1 ELEKTROSTAATILISTE FILTRITE TEOREETILISED ALUSED

Antud peatükis selgitatakse elektrostaatiliste filtrite aluseid ning antakse lugejale alused mõistmaks elektrostaatiliste filtrite tööprotsessi ning lõputöö raames koostatud elektrostaatilise filtri teoreetilist toimimist.

1.1 Elektrostaatilise filtri tööprotsess

Elektrostaatiliste filtrite töö saab kokku võtta kolme peamise etapina, nendeks on: kõrgepinge alalisvoolu tekitamine, mida kasutatakse gaasivoos osakeste laadimiseks (peaaegu kõik kaubanduslikult saadavad olevad elektrostaatilised filtrid on negatiivse polaarsusega), elektrivälja loomine koroneeriva elektroodi ning sadestavate elektroodi vahele, mis suunab negatiivselt laetud ioonid ning tahked osakesed sadestava elektroodi suunas, ning kogutud tahkete osakeste eemaldamine raputusmeetodite (või märgade filtrite puhul vee voolu) abil. [1]

Toodud etapid on muidugi lihtsustused ja kokkuvõtted, kuid need on toodud töös toimumise järjekorras andmaks lugejale lihtsat ning selget ülevaadet elektrostaatiliste filtrite toimise protsessist. Esimeses etapis ehk kõrgepinge alalisvoolu tekitamisel kasutatakse trafot, mille abil tõstetakse toiteallikast saadav pinge antud süsteemi toimimisele sobivale pingestmele. Saadud kõrgepinge muundatakse alaldit kasutades seejärel vahelduvvoolust alalisvooluks.

Elektrostaatiliste filtrite puhul on tavaliselt tegemist suletud kambriga, mis on valmistatud kas metallist, keraamikast või teistest nõuetele vastavatest materjalidest. Kambri sees on teraskonstruktsiooniga ühendatud ning maandatud sadestavad elektroodid, tavaliselt plaadid mille peale sadestub filtri töö tagajärjena tolmu. Nende elektroodide vahel ripuvad koroneerivad elektroodid, mis on maast isoleeritud ning mida toidetakse trafost ning alaldist saadava kõrgepinge alalisvooluga. [1] Koroneerivad elektroodid kannavad seda nime, sest nende „peal“ tekib koroonalahendus. Tulenevalt sadestavate ning koroneerivate elektroodide vahelisest suurest potentsiaalide erinevusest tekib nende vahele elektriväli. Tööstuslikel elektrostaatilistel filtritel jääb praktikas elektriväljatugevus tavaliselt vahemikku 300-600 kV/m, kuid eristel süsteemidel võib see ületada 1000 kV/m. [2] Eelpool kirjeldatud elektrivälja abil suunatakse filtrit läbivad negatiivse laenguga ioonid ning tahked osakesed sadestavale elektroodile.

Viimane etapp puudutab kogutud tolmu eemaldamist sadestavatelt elektroodidelt. Kuivades elektrostaatilistes filtrites saavutatakse mehhanismidega, mis aegajalt löövad või raputavad nii mõlemaid süsteemis rakendatavaid elektroode. Antud seadmeid saab aktiveerida solenoidi, õhurõhu, magnetvälja nõrgenemisele järgneva raskusjõuga või mehaaniliselt erinevate nukkide, haamrite või vibraatoritega. [1] Nagu võib eeldada juba nimest toimivad märjad filtrid teistel alustel. Nendes kasutatakse raputamise asemel tahkete osakeste eemaldamiseks sadestavatelt elektroodidelt vett või teisi elektrit juhtivaid vedelikke. Antud lahenduse puhul suunatakse nende elektroodide suunas pidev või vahelduva veejuga. Mõlemal juhul eemaldatakse kogutud tolm läbi kollektorite, mis tavaliselt asuvad filtri alumises osas.

1.2 Kõrgepinge seadmed ning elektrifiltrite toide

Nagu mainitud eelmises peatükis on elektrostaatiliste filtrite toimise aluseks kõrgepinge alalisvool. Kõrgepinge seadmed on seega määravad koroneerivate elektroodide ning sadestavate elektroodide vahelise elektrivälja tugevuse kontrollimisel. See protsess saavutatakse toiteplokkidega, mis koosnevad kolmest komponendist - pinget tõstev trafo, kõrgepinge alaldi ning juhtseade ja kaitselüliti (automaatikakomponendid). [3] Mainitud komponentidest moodustatud süsteeme nimetatakse *T-R*, ehk *transformer-rectifier* (trafo-alaldi), süsteemideks. Juhul kui rakendataval elektrostaatilisel filtril on mitu sektsiooni on parimaks lahenduseks varustada iga sektsioon eraldi *T-R* toitesüsteemiga. [4]

T-R süsteemi esimene komponent, nagu selle nimigi viitab, tõstab pinget. Käesoleva töö kontekstis tõstab antud trafo madalpingelist võrguvoolu mitmekümne kilovoldini. Tööstuses rakendavates elektrostaatilistes filtrites on koroneerivate elektroodide tööpingeks 25-100 kV. [5] Enne rakendamist on aga vajalik muuta trafo abil saadud kõrgepinge vahelduvvool alaldi abil alalisvooluks. Antud sammu juures võib tekkida lugejal õigustatud küsimus, miks ei saa elektrostaatiliste filtrite toiteks kasutada lihtsalt vahelduvvoolu. Alaldite eemaldamine lihtsustaks elektrostaatiliste filtrite toidet märgatavalt ning langetaks ka mõningate autoriteetide väitel sadestumisest tekkivaid probleeme. [6] Siiski muudab vahelduvvool mitmeid elektrostaatiliste filtrite konstrueerimisel tehtavaid eeldusi ning tulenevalt sellest, et selle töö raames projekteeriti alalisvoolu rakendav elektrostaatiline filter väljub sellise variandi uurimine käesoleva bakalaureusetöö raamidest. Siiski võib kaaluda sellel teemal uurimise

jätkamist teistes teadustöodes.

Väljastades vahelduvvoolu jääb elektrostaatiline filtri toitmiseks alalisvool, millega on lihtsaim saavutada täita järgnevaid nõudeid. Gaasivoost saab eraldada osakesi ainult siis, kui neid sunnitakse liikuma elektroodide suunas. Osakesed aga teevad seda ainult siis kui neist kõik (või vähemalt valdav enamus) kannavad sama polaarsusega laengut ning kui elektrivälja tööalas on pideva suunaga. [4] Eraldiseisva $T-R$ süsteemi asemel võib alati ka kasutada alalisvooluallikat kuigi enamikel elektrostaatilistel filtritel eelistatakse pool- või täislaadne alaldatud voolu. Alaldatud voolu peamiseks eeliseks on see, et individuaalsed voolulained eraldavad nn surnud hetked on piisavalt pikad, et sädelahendus jõuab kustuda spontaanselt ning alaldi poolt toidetud filtri sektsioon jõuab taastuda sädelahendusest. [6] Olenemata toiteallika valikust ühendatakse alalisvoolu üks polaarsus koroneerivate elektroodide külge ning teine tihtilugu maandatud sadestavate elektroodide külge. Eelistatud polaarsuseks negatiivne polaarsus, mis on ka enimlevinud tööstuses, kuid on olemas ka positiivse polaarsust rakendavaid elektrostaatilisi elektroode.

Negatiivse ning positiivse polaarsuse rakendamist ja negatiivse polaarsuse eeliseid elektrostaatilistes filtrites lahatakse täpsemalt alapeatükkides 1.3 ning 1.4.

1.3 Koroonalahendus

Varasemates alapeatükkides kirjeldatud protsesside aluseks on elektrostaatiline protsess. Seda mõistetakse kui elektriväljade mõju gaasis või vedelikus asuvatele laetud osakestele ning selle eesmärgiks on anda neile kindlas suunas liikumine, sest see on vajalik teatud tehnoloogilistele protsessidele. [7] Töös käsitletava filtri protsessi võib pidada sarnaseks pulbervärvimisega, kuna selles protsessis rakendatavad printsiibid on samad, kuid erinevalt sellest ei ole antud filtri eesmärk tolmu kihti kinnitada sadestavale elektroodile.

Antud protsessi kõige tähtsamaks osaks võib pidada koroonalahendust. Selle teeb oluliseks nii osakestele laengu omistamise kui ka osakeste suunamise sammude ühendamine üheks protsessiks. Koroonalahendust saab selgitada nii kvalitatiivselt kui ka kvantitatiivselt läbi pingevoolu karakteristiku. [6] Pingevoolu karakteristikuks on tõusev kurv, mis illustreerib koroonalahenduses voolu kasvu koroona algpingest kuni läbilöögipingeni. Antud pingete vahemikus iseloomustab karakteristikut joonis 1.1 ning

järgnev valem:

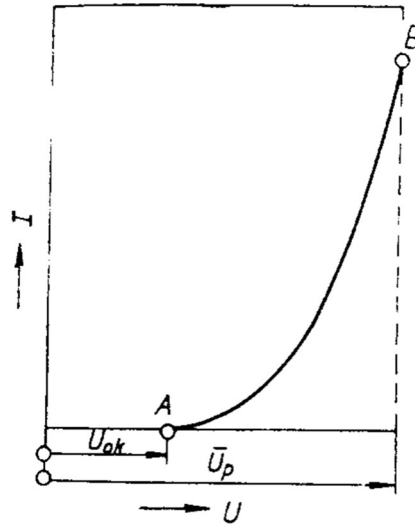
$$I_{kor} = kGU(U - U_{ok}) \quad (1.1)$$

kus k – ionide liikuvus (varieeruv, sõltub rõhust ja temperatuurist [6]);

G – koefitsient, mis sõltub elektrodide geometriast;

U – pinge;

U_{ok} – koroona algpinge. [7]



Joonis 1.1 Koroonalahenduse pinge-voolu karakteristik, kus U – pinge; I – vool; U_{ok} – koroona algpinge; U_p – ülelööginge; A – koroonavoolu algväärtus; B – koroonavoolu lõppväärtus [6]

Seega on tänapäevaste gaasipuhastamise protsesside nõuete täitmiseks oluline, et elektrostaatiliselt filtrid suudavad ioniseerida gaasimolekule, kuid et normaaltalitusel ei toimu nende sadestavate elektrodide juures läbilööki. [6] Seetõttu, kuigi elektrostaatilise filtri toiteks võidakse kasutada nii positiivset kui ka negatiivset alalisvoolu eelistatakse elektrostaatilistel filtritel, mida kasutatakse heitgaasidest tahkiste eemaldamisel, kasutada koroneerivatele elektrodidel negatiivset polaarsust. Mainitud polaarsuse eelistamine tuleneb sellest, et negatiivsel koroonal on kõrgem läbilööginge. [8] Siiski eksisteerib ka nišš positiivse polaarsusega elektrostaatiliste filtrite jaoks. Nimelt kasutatakse positiivset koroonat rakendavad filtreid tavaliselt õhuvoogude puhastamiseks, kuna nad toodavad vähem osooni kui negatiivsed koroonaad. [6] Peale laiatarbe õhupuhastajate rakendatakse neid ka tihti tööstuslikes protsessides, kus on oluline „puhta“ õhu olemas olek.

Rääkides elektrostaatiliste filtrite tööprotsessist ei saa käsitlemata jätta vastupidist koroonalahendust. Vastupidine koroonalahendus leiab aset siis kui halvasti voolu juhtivad osakesed tekitavad sadestavale elektrodile tiheda laetud osakeste kihi, mis tõukavad eemale sama laenguga osakesi ning segavad seeläbi elektrivälja tööd. Sadestatud osakeste pingestatus ületab viimaks kriitilise piiri ning tekitab sadestavale

elektroodi pinnal koroonalahenduse. [9] Antud protsessi tagajärjena langeb märgatavalt gaasipuhastuse efektiivsus. Selle olukorra vältimiseks peab aegajalt elektrostaatilise filtri sadestavaid elektroode puhastama. Sellest tulenevalt rakendatakse alapeatükis 1.1 kirjeldatud puhastamismeetodeid.

1.4 Osakeste laadimine ja liikumine

Nagu eelmises alapeatükis mainitud on gaaside puhastamise aluseks koroonalahendus ning seda võimaldav sobiv elektroodide süsteem. Seda läbivad osakesed ioniseeritakse ning liiguvad mööda koroneerivate elektroodide poolt loodud elektrivälja jõujooni sadestavatele elektroodidele, moodustadesioonivoo. Sellega loob iga koroneeriv elektrood laadimistsooni, millest osakesed peavad mööduma. [6] Samas on elektrostaatilise filtri töö liiga keeruline protsess, et seda vaadata ainult ühe sammuna. Parem viis kuidas seda kirjeldada on kui mitu osaliselt samaaegselt ning osaliselt järjestikust protsessi, mis tulenevalt selle kompleksusest näeb välja kui üks samm. Antud protsessid on illustreeritud lisa 1.

Nagu mainitud, ioniseerib koroonalahendus seda läbivad osakesed. Elektrostaatilise filtri toimimiseks on aga vajalik molekulide täielik ioniseerimine, sest ainult niimoodi tekib piisavalt katioone ning elektrone. [6] Nende tekkimine aitab suunata osakeste liikumist ning vähendada filtris oleva gaasi turbulentsust. Ka selles protsessi mängib rolli koroneerival elektroodil oleva toite polaarsus. Kuna koroneeriv elektrood lükkab endast eemale sama laenguga osakesi tähendab see, et polaarsus määrab, milline monopolaarne laeng kujuneb elektrivälja „passiivses” osas. See tähendab, et millise laenguga osakesed kogunevad eelmainitud „passiivses” osas ning millised neutraliseeruvad koroneerival elektroodil. Juhul kui rakendatakse koroneerival elektroodil negatiivset polaarsust esinevad „passiivses” osas nii elektronid kui ka anioonid, kuna elektronid on rohkem liikuvad selgitab see ka negatiivsete ionide suuremat liikuvust. Nagu varem mainitud on aga liikuvusel otsene mõju koroonavoolule ning seeläbi soodustab negatiivse polaarsuse rakendamine elektrostaatilise filtri tööd.

Osakeste eraldumine gaasivoost ning nende liikumine sadestavatele elektroodidele ei ole aga hetkeline. Osakeste sadestumise protsessi võib võrrelda elektriliste ning hajutavate jõudude vahelise võistlusena. [8] Elektrivälja ning selle jõujooned suunavad igast koroneerivast elektroodist mööduvaid laetud osakesi sadestavate elektroodide suunas. Nende vastu seisab gaasis olev turbulentsus, mis üritab hoida osakeste ühtlast

jaotust gaasis. Korrektselt ehitatud elektrostaatilises filtris on aga rakendatavad elektrijõud piisavalt suured, et need viimaks „võidavad“. See toimib läbi osakeste lähendamise sadestavatele elektroodidele, mille tagajärjena turbulentsuse mõju antud osakestele väheneb, muutes võimalikuks osakeste sadestamise vastaval elektroodil.

1.5 Osakeste kontsentratsiooni mõju

Elektrostaatilise filtri toimise efektiivsuse mõõtmiseks kasutatakse väljuva gaasivoo tolmuosakeste kontsentratsiooni. See sõltub otseselt sisendvoo kontsentratsioonist, koormusest, rõhust, niiskusest ning osakeste suuruselt. [10] Elektrostaatilise filtri kasutegur on väga kõrge, kuid on tavaliselt vahemikus 90 kuni 99,95 protsenti. [4] Seega, peab elektrostaatilise filtrit ehitades sellel masinal eeldatava kasuteguri saavutamiseks peale optimaalse elektriliste tingimuste arvestama veel kõigi eelmainitud teguritega ning olema võimalus nende väärtusi kontrollida.

Vaadates antud seadmeid praktilise rakenduse raames tuleb aga silmas pidada, et me ei vaata ainult üksikosakesi, vaid nende suurt kogumit. Osakeste suure kogumi puhul muutub üksikosakeste käitumine. Vaadeldes kogumit tuleb seejuures silmas pidada alljärgnevaid tegureid:

- Osakeste liikumistrajektoori muutus;
- Osakeste laadimisrežiimi muutus;
- Elektrostaatiline hajumisprotsessi mõju. [7]

Kuigi antud protsessidest esimesest tuleb silmas pidada võib selle mõju mitte arvestada. See tuleneb sellest, et kuigi trajektoori liikumisest toimuvad keskkonna häiringud leivad naaberosakestele kui nende distants väheneb, nende mõju ebaoluline filtri tööle tulenevalt madalast ruumalakontsentratsioonist. [7]

Sellele kontrastiks on laadimisrežiimi mõju, mis on tähtis ning mis sõltub gaasivoo liikumissuunast elektrivälja jõujoonte suhtes. Juhul kui osakeste liikumine toimub piki elektrivälja jõujooni on nende mõju elektrivälja tugevusele ning summaarsele ruumlaengu tihedusele olematu. Siiski on sellisel juhul olemas mõju koroonavoolule. [7] Kuna aga selles töös projekteeritud filtris puudub kokkupuude sellise gaasivooga, siis seda teemat pikemalt ei lahata. Juhul aga, kui gaasivool liigub risti elektrivälja suunaga, nagu on tegemist ka selles töös projekteeritud elektrostaatilise filtriga, avaldub osakeste kontsentratsiooni mõju järgneva valemi alusel:

$$D_k = \left(1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2}\right) \xi S H \quad (1.2)$$

- kus D_k – osakeste kontsentratsiooni mõju koroonavoolule kirjeldav tegur;
 ξ – osakeste alalaetuse aste maksimaalse laengu suhtes;
 ε – osakeste dielektriline läbitavus;
 S – osakeste kogupindala gaasi mahuühiku kohta;
 H – elektrodide vaheline kaugus. [7]

Parameetri D_k suurenemisega vähenevad nii ionide kontsentratsioon kui ka koroonalahenduse vool ning koroonavool võib langeda nulli. Juhul kui aktsepteerime voolu vähenemist kuni 30% võrra ning elektrivälja tugevuse muutumist kuni 10% võrra, siis kui $D_k < 0,5-0,8$ võib ka sellegi mõju jätta arvestamata. [7]

Viimase, ehk elektrostaatilisest hajumisprotsessist avaldub Coulomb'i seaduse alusel. Antud protsessi mõju avaldub tulenevalt monopolaarsest laengust elektrivälja „passiivses“ osas ning seda protsessi kirjeldab järgnev valem:

$$\frac{N}{N_0} = \left(1 + \frac{q^2 B_{osa}}{\varepsilon_0} N_0 t\right)^{-1} \quad (1.3)$$

- kus N – osakeste kontsentratsioon;
 N_0 – osakeste algkontsentratsioon;
 q – osakeste laeng;
 ε_0 – vaakumi dielektriline läbitavus;
 B_{osa} – osakeste liikuvus. [7]

1.6 Vahekokkuvõte

Antud peatükis sai antud põgus ülevaade elektrostaatilisest filtrite teoreetilised alused ning selgitatud erinevate tegurite mõju elektrostaatilisest filtri tööle. Peamiselt keskenduti erinevatele viisidele kuidas osakeste kontsentratsioon, liikumine, rakendatav alalisvoolu polaarsus ning koroonavoolu täpselt mõjutavad elektrostaatilisest filtrite funktsioneerimist. Lisaks selgitati erinevaid filtritel rakendatavaid kõrgepingeseadmete lahendusi.

2 FILTRI DISAIN, ANDURID NING SEADMED

Käesolev lõputöö on tehtud koostöös kaastudengi Egert Siiguriga, kes vastutas selles projektis elektrostaatilisest filtri mehaanilise disaini ning vajalike andurite ja seadmete valimise osade eest. [11] Käesolevas peatükis tehakse lühike kokkuvõte nendest kahest teemast, et luua lugejale parem arusaam projekti terviklikkusest ning taustast.

2.1 Ülesande püstitus

Projekti eesmärgiks on koostada realselt ehitatav projekt võimalikult efektiivsele gaasipuhastusseadmele, mida oleks plaan rakendada pürolüüsi katseseadme koosseisus. Filtri disain on oluline, kuna ta määrab mitmed olulised arvutuslikud tegurid, mis määravad filtri efektiivsust. Anduritelt saadav tagasiside on oluline järgimaks filtri sees olevaid keskkonna tingimusi, et sekkuda kui seade on rikkis või hoida ära õnnetust. Valitav eelsoojendi peab olema piisav, et soojendada filtri sisemus gaasiga sarnasele temperatuurile, et vältida kondensatsiooni teket ning sellest tõusvaid probleeme seadmete tööle.

2.2 Filtri disaini, andurite ning seadmete lühikokkuvõte

Egert Siiguri poolt projekteeritud elektrostaatiline filter on silindrikujuline ligikaudu 300 L mahutavusega seade, mille aktiivosa kõrguseks on 1100 mm ning mille diameeter on 500 mm. Filtrisse on planeeritud 100 mm diameetriga sissevoolu toru, millest siseneb puhastamist vajav gaas. Kõik filtri metallist osad on planeeritud ehitada happekindlast terasest AISI 316L.

Elektrostaatilises filtris on sadestavateks elektrodideks plaadid, mis on 1100 mm pikad, 300 mm laiad ning 3 mm paksud. Koroneerivateks elektrodideks on 1100 mm pikkusega, 10 mm laiuse ning 10 mm paksusega raudlatid. Plaatide ning elektrodide vahel ühendus puudub, kuid plaadid on ühendatud omavahel ning latid omavahel. Plaatide ning lattide vaheline kaugus on 23,5 mm.

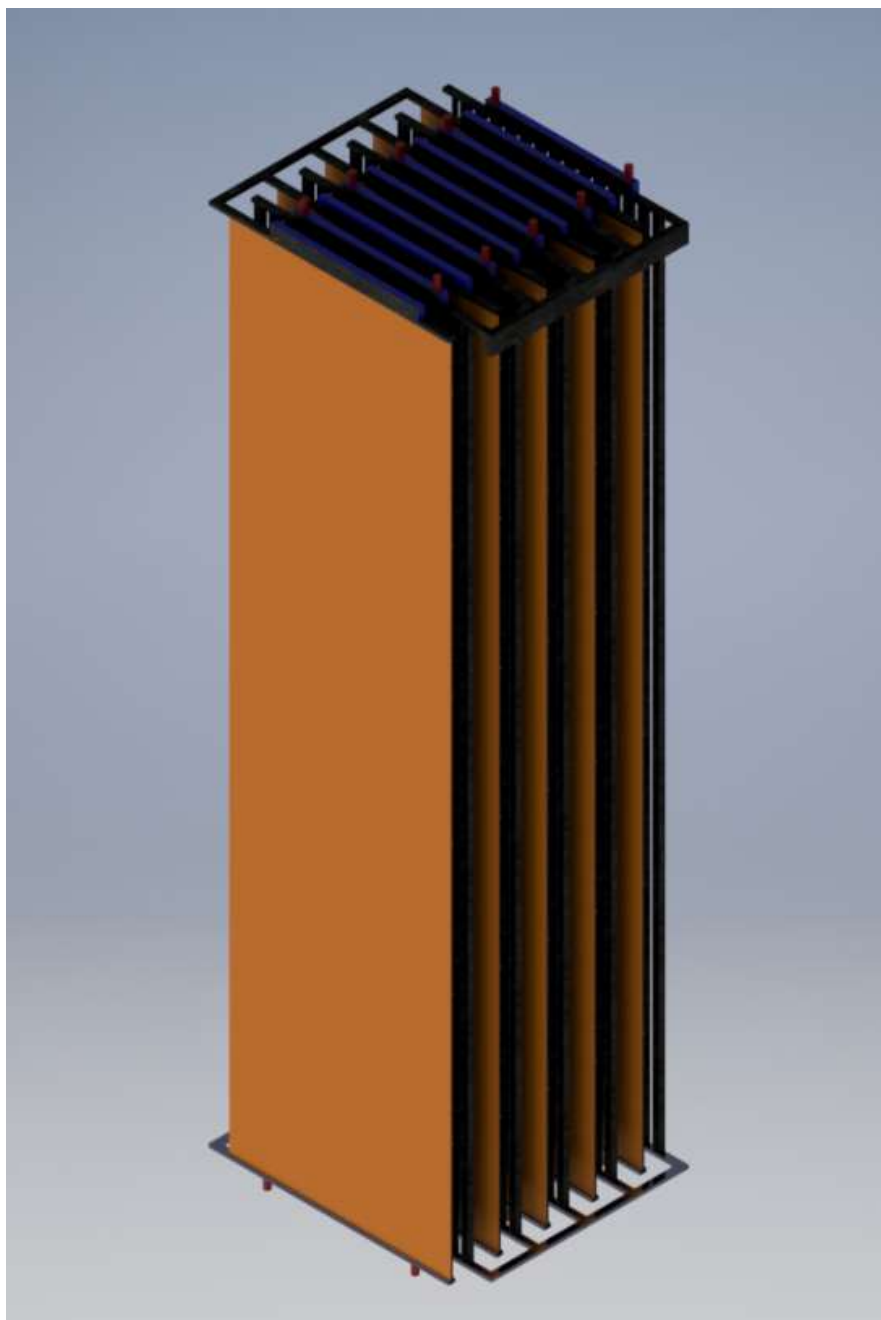
Kuna antud elektrostaatilisel filtril puuduvad tuha eemaldamise süsteem on projekteeritud filtri osa eemaldatavana. Kogunenud tuha eemaldamiseks filtrist on lisaks veel loodud seadme alumisse ossa koonilise kujuga tuhakogumise tsoon, kust saab kogunenud tuhka ning tolmu eemaldada kasutades liblik- ehk pöördsiibrit.

Seadme projekteerimisel lähtuti vajadusest mahutada korpusesse peale filtri ka lisaseadmeid, peamiselt eelsoojendi. Antud seadet on vaja, et tõsta elektrostaatiline filtri sisemine temperatuur 450°C, enne kui sinna suunatakse pürolüüsiseadme heitegaasivoog. Projekteeritud elektrostaatilise filtri jaoks kasutatav eelsoojendi peab olema 5,7 kuni 22,8 kW sõltuvalt sellest, kui kiiresti soovitakse saada filtrit töö valmis. 5,7 kW puhul kulub selleks tund ning 22,8 kW puhul ainult viisteist minutit. Kuna on soov soojendada filter üles võimalikult kiiresti, valiti eelsoojendiks Heatex Eesti OÜ 20 kW soojendi. Eelsoojendeid otsustati paigutada filtrisse kokku kaks, mille tulemusena peaks filter saavutama oodatava temperatuuri vähem kui 9 minuti jooksul.

Peale eelsoojendi on ka vaja elektrostaatilise filtri korpusesse mahutada isolaatorid. Isolaatorid asuvad elektrostaatilise filtri korpuse ning aktiivosa põhja vahel ning aitavad toetada aktiivosa, isoleerides selle maandatud korpusest. Korpuse ning aktiivosa omavaheline isoleerimine on aga vältimatu samm, selleks et vältida ohtu inimestele ning seadmetele. Kuna valitud isolaatorid peavad taluma toiteallikast aste kõrgemat pinget peaks valima isolaatori, mis talub vähemalt 30 kV tulenevalt, sellest et toiteallika pingeks valiti 25 kV.

Peale eelmainitud seadmete vajab ka elektrostaatiline filter andureid. Nii temperatuuri- kui ka rõhuandureid on planeeritud paigaldada filtrile kaks, nii sisenevale kui ka väljuvale gaasitorule. Sobivaks temperatuurianduriks osutusid mineraalisolatsiooniga termopaarid ning rõhuanduriteks Gefrani tooted. Mõlemad seadmed on valitud vastavalt vajadusele taluda nii happelist keskkonda kui ka kõrgeid temperatuure ning need on plaanitud paigaldada filtrile flantside abiga.

Allpool on toodud mõned joonised illustreerimaks planeeritud elektrostaatilist filtrit ning andmaks paremat arusaama projekteeritud seadmest.



Joonis 2.1 Modelleeritud elektrostaatilise filtri aktiivosa



Joonis 2.2 Modelleeritud elektrostaatilise filtri koost

3 TEOREETILISED ARVUTUSED JA PRAKTILISED KATSED

Käesolev peatükk tutvustab elektrostaatilise filtri planeerimisel esinenud teoreetilisi arvutusi ning nende kinnitamiseks koostatud praktilisi katseid. Antud katsed olid vajalikud kinnitamaks teoreetiliste väärtuste tulemusi koostatud filtri jaoks ning selleks, et määrata koroonavoolu suurused antud elektroodide süsteemile. Koroonavoolu teadmine on vajalik trafo võimsuse määramiseks.

3.1 Planeeritud elektrostaatiliselt filtrilt oodatavad parameetrid

Elektrostaatilist filtrist projekteerides võeti esmalt aluseks eelmisel aastal koostatud lõputööd ning energiatehnoloogia instituudi poolsed parameetrite ootused filtrile. Nende ootused on esitatud tabelis 3.1.

Tabel 3.1 Elektrostaatilisest filtrisse sisenevate kuumade gaaside parameetrid, kui põlevkivi kulu on $B_{kulu} = 20 \text{ kg/h}$ [12]

temperatuur	450 °C
mahuvoolukiirus	57,84 m ³ /h
poolkoksi kogus	0,3648 kg/h
poolkoksi sisaldus	6,29 g/m ³
poolkoksi osakeste mõõt, d	<0,3 mm

Plaanitava elektrifiltri tööpingeks valiti 10 kV alalisvoolu, kuna siseneva gaasi maht ja tolmu sisaldus on väike. Vajalik vool on umbes 0,1–0,2 A ja toiteallika võimsuseks peaks olema umbes 1-2 kW. [13] Toetudes eelnevalt mainitud kahele allikale loodi alus elektrostaatilise filtri modelleerimisele ning kõrgepinge poole projekteerimisele. Enne projekteerimise asumist pidas käesoleva töö autor vajalikuks kontrollida üle, planeeritava elektrostaatilise filtri elektrilised väärtused. Nagu ka mainitud esimeses peatükis on elektrostaatilise filtri efektiivsuse mõõtmise aluseks kasutegur. See on aga otseselt sõltuvuses koroneerivatele elektroodidele rakendatavast pingest. Järgnevat sõltuvust uuritakse ning valitud pinge sobivust kirjeldatakse lähemalt alapeatükis 3.2.

Valitud voolu sobivuse määramine osutus erinevalt pingest kahjuks keerulisemaks. Nimelt puudusid A. Bõkovi töös allikad või arvutused töös valitud vajaliku voolu jaoks.

Lisaks ei suutnud selle töö autor tuvastada teoreetilise materjaliga tutvumise järel voolu suuruse otsest mõju ühelegi töös kirjeldatud protsessile. Seega kuna puudusid võimalused arvutada voolu või kontrollida valitud väärtuse suurust tõsis ka küsimus toiteallika vajaliku võimsuse kohta. Toetudes Ivar Kiitami nõuandele, otsustati selle probleemi lahendamiseks määramata katseseadme poolt vajatav vool läbi praktiliste katsete. Selle jaoks koostati elektrostaatilise filtri vähendatud mudel. Neid katsete läbiviimist ning nende tulemusi kirjeldatakse pikemalt alapeatükis 3.3.

3.2 Planeeritud elektrostaatilise filtri teoreetiline kasutegur

Nagu mainitud esimeses peatükis tuleb elektrostaatilise filtri kasuteguri arvutamisel arvestada mitmete teguritega, mitte ainult elektrivälja tugevusega. Siiski kuna elektrostaatilise filtri toimise aluseks on elekter tuleb projekteerides vajalike elektriväärtusi pidada alati silmas.

Elektrostaatilise filtri kasuteguri määramisel on esimeseks sammuks projekteeritava filtri elektrivälja tugevuse määramine. Elektriväli on tugevaim joonel koroneerivast elektroodist sadetavale elektroodile ning seda iseloomustab järgnev valem väga hästi, kõikjal peale koroneeriva elektroodi läheduse:

$$E_{max} = \frac{U_{rak}}{W} \quad (3.1)$$

kus U_{rak} – rakendatav pinge;

W – sadestavate ning koroneerivate elektroodide vaheline kaugus. [8]

Siiski ei ole elektriväli ühtlane gaasivoo suunal ning gaasivoole rakendatavat pinget kirjeldab täpsemalt järgnev valem:

$$E_{av} = \frac{E_{max}}{K} \quad (3.2)$$

kus K – maksimaalse ning keskmise elektrivälja suhe, mis sõltub elektrostaatilise filtri ehitusest ning vastupidise koroona olemasolust ning mille keskmised väärtused on kirjeldatud tabelis 3.2. [8]

Rakendades valemit 3.1 valemis 3.2 saadakse elektrostaatilise filtri keskmise elektrivälja arvutamiseks seega järgnev valem:

$$E_{av} = \frac{V}{K \cdot W} \quad (3.3)$$

Tabel 3.2 Maksimaalse ning keskmise elektrivälja suhe elektrostaatilistes filtrites [8]

Elektrostaatilise filtri ehitus	Vastupidine koroon	K
plaat-traat	Puudub*	1,75
plaat-traat	Äge	2,5
plaat-plaat	Puudub*	1,26
plaat-plaat	Äge	1,8

* Kogutud osakeste takistus on väiksem kui $2 \cdot 10^9 \Omega \cdot m$ kohta

Eeldades, et pürolüüsi seadmes rakendatava põlevkivi tolmu elektriline takistus on sarnane Fuyu põlevkivile, mille väärtused on toodud lisas 2, [14] võib eeldada, et projekteeritaval plaat-traat elektrostaatilisel filtril puudub risk vastupidisele koroonale. Seega saab eeldada, et projekteeritava elektrostaatilise filtri maksimaalse ning keskmise elektrivälja suhe on 1,75. Tulenevalt soovist projekteerida võimalikult kompaktne elektrostaatiline filter valiti koroneerivate ning sadestavate elektroodide omavaheliseks kauguseks 23,5 mm. Toetudes nendele andmetele ning eelmises alapeatükis A. Bõkovi lõputöö alusel valitud filtri tööpingele 10 kV saab avaldada, keskmise elektrivälja tugevus projekteeritavas elektrostaatilises filtris rakendades valemit 3.3.

$$E_{av} = \frac{10000 V}{1,75 \cdot 0,0235 m} = 243161,09 V/m$$

Arvutuse tulemusena saadud elektrifiltri keskmiseks väljatugevuseks on seega 243,161 kV/m. Sellise väljatugevusega on aga antud pinge madalam kui alapeatükis 1.1 mainitud tööstuslike elektrostaatiliste filtrite töövahemik 300-600 kV/m. [3] Kuna aga oodatav gaasihulk, mida elektrostaatiline filter peab puhastama jääb alla tööstuslike ootuste võib pidada antud pinget eeldustele sobivaks. Siiski tuleks kaaluda filtri tööstuslikul rakendamisel rakendatava pinge tõstmist vähemalt 12,4 kV-le. Sel juhul ületaks elektrivälja keskmine väärtus ägeda vastupidise koroon puudumisel oodatud minimaalse 300 kV/m.

Elektrostaatilise filtri kasutegurit $\eta(D_p)$ kirjeldab valem, 3.4, seda eeldusel et on täidetud tingimus $t \gg \tau_f$, kus t on osakeste kokkupuute aeg väljaga, kirjeldatud valemis 3.5, ning τ_f on väljalaadimise konstant, kirjeldatud valemis 3.6. [8]

$$\eta(D_p) = 1 - \exp \left[-\frac{A_c \varepsilon_0 E_c E}{3\mu Q} (C_c F D_p) \right] \quad (3.4)$$

kus D_p – osakese diameeter;

A_c – sadestavate elektroodide pindala;

ε_0 – vaakumi dielektriline läbitavus;

E_c – elektrivälja tugevus sadestaval elektroodil;

E – laadiva elektrivälja tugevus;
 μ – õhu dünaamiline viskoossus;
 Q – gaasi mahuvoolukiirus;
 C_c – Cunninghami parandustegur;
 F – arvutuslik tegur, mida kirjeldab valem 3.7. [8]

$$t = \frac{s}{v} \quad (3.5)$$

kus s – elektroodide ning osakeste kokkupuute ala pikkus;
 v – siseneva gaasi voolukiirus.

$$\tau_f = \frac{4\varepsilon_0}{N_{ioon}eB_{ioon}} \quad (3.6)$$

kus ε_0 – vaakumi dielektriline läbitavus;
 N_{ioon} – ionide arv mahuühiku kohta, tavaliselt $2 \cdot 10^{15}$ iooni/m³;
 e – elementaarlaeng;
 B_{ioon} – ionide liikuvus, tavaliselt 10^{-4} m²/Vs. [8]

$$F = \left[\left(1 + \frac{2\lambda}{D_p} \right)^2 + \frac{2(\kappa-1)}{\left(1 + \frac{2\lambda}{D_p} \right)(\kappa+2)} \right] \quad (3.7)$$

kus λ – elektroni vaba tee pikkus gaasis;
 D_p – osakese diameeter;
 κ – tolmuosakese dielektriline konstant. [8]

Üheastmelistes elektrostaatilistes filtrites võib pidada elektrivälja sadestaval elektroodil, E_c , ning laadivat elektrivälja, E , võrdseks elektrostaatilise filtri elektrivälja keskmise tugevusega, E_{av} . [8] Sellisel juhul võib esitada valemit 3.6 järgneval kujul:

$$\eta(D_p) = 1 - \exp \left[-\frac{A_c \varepsilon_0 E_{av}^2}{3\mu Q} (C_c F D_p) \right] \quad (3.8)$$

kus E_{av} – elektrivälja keskmine tugevus. [8]

Valemi 3.8 rakendamiseks tuleb esmalt veenduda, et kehtib tingimus $t \gg \tau_f$. Selle avaldamiseks tuleb avaldada osakeste ning välja kokkupuute aja ning väljalaadimise konstandi väärtused, mis on kirjeldatud valemities 3.5 ning 3.6.

Esmalt avaldatakse osakeste ning kokkupuute aja väärtus. Antud valemi rakendamiseks on aga esmalt vaja leida siseneva gaasivoolu kiirus, mida saab kirjeldada gaasi mahuvoolukiiruse ning toruava pindala jagatisena. Võimalik gaasivoolukiirus oli ka esitatud M. Neustuse poolt eelmisel aastal koostatud lõputöös. Seal oli valitud

gaasivoolukiiruseks 0,25 m/s ning sisse vooks 25 cm diameetriga toru. [15] Siiski otsustati selles töös rakendada teisi väärtusi. Selle valiku taga seisis kaks põhjust, nimelt on projekteeritud filtriga võrreldes 25 cm diameetriga sissevoolu toru liiga suur. Teiseks ning tõenäoliselt suuremaks probleemiks on tõsiasi, et valitud väärtuste põhjal saadav arvutuslik mahuvoolukiirus on liiga madal võrreldes energiatehnoloogia instituudi poolt kehtestatud nõuetega. See on nagu on näha järgnevas arvutuses.

$$Q = 0,25 \frac{m}{s} \cdot \pi \cdot (0,125 m)^2 = 0,01227 \frac{m^3}{s} = 44,18 \frac{m^3}{h} < 57,84 \frac{m^3}{h}$$

Toetudes nõutud mahuvoolukiirusele [12] ning varasemalt kirjeldatud sissevoolu toru raadiusele avaldati valemi 3.5 ning eelnevalt kirjeldatud gaasivoolukiiruse avaldamise suhte põhjal otsitud ajaline väärtus.

$$t = \frac{1,1 m}{\frac{0,0161 m^3}{\pi * (0,05 m)^2 \cdot s}} = 0,5377 s$$

Järgmiseks tuleb avaldada väljalaadimise konstant. Valemis otsitava väärtuse avaldamiseks on oluline tuvastada planeeritud elektrostaatilises filtris ionide liikuvus ning arv mahuühiku kohta. Kuna elektrostaatiline filter on planeeritud opereerima normaalrõhul, ehk 101,325 kPa, ei ole seda vaja järgnevates arvutustes arvestada. Kuna aga elektrostaatiline filter on planeeritud opereerima normaaltemperatuurist, 20°C, kõrgemal temperatuuril 450°C peaks leidma ning avaldama temperatuuri mõju nii ionide liikuvusele kui ka nende arvule mahuühiku kohta. Siiski arvestades seda, et ionide liikuvus määratakse katseliselt leitavate difusiooni koefitsientide alusel ning seda on hetkel eksisteeriva meditsiinilise olukorra tõttu keeruline kui mitte võimatu teha kasutatakse normaaltingimusi.

$$\tau_f = \frac{4 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12}}{2 \cdot 10^{15} \cdot 1,61 \cdot 10^{-19} \cdot 0,0001} = 0,0011 s$$

Võrreldes osakeste ning välja kokkupuute aja ning väljalaadimise konstantide väärtust saadakse teada, et esimene on teisest ligikaudu 488,88 korda suurem. Seega saab järeldada, et eelmainitud tingimus $t \gg \tau_f$ kehtib, mille puhul saab asuda lahendama valemit 3.8. Kuna varasemalt on leitud juba elektrivälja keskmine tugevus ning on teada vaakumi dielektriline konstant, gaasi mahuvoolukiirus ning tolmuosakeste diameeter on seega vaja leida ning avaldada koguvate elektroodide pindala, õhu dünaamiline viskoossus, Cunninghami parandustegur ja viimaks valemis 3.7 kirjeldatud arvutuslik tegur.

Nagu kirjeldatud varasemas peatükis on elektrostaatilise filtri sadestavateks elektrootideks 300*1100 mm plaadid, mida on kokku viis. Ehituslikult saab pidada sadestavaks elektrootideks plaadi seda külge, mis on suunatud koroneerivate elektrootide suunas. Kuna kolmel plaadil kehtib see mõlema külje kohta saab seega väita, et sadestavaid elektrootide on kokku 8. Teades sadestavate elektrootide mõõtmeid ning nende arvu saab seega välja arvutada sadestavate elektrootide pindala, mis on esitatud järgnevas tehtes.

$$A_c = 0,3 \text{ m} \cdot 1,1 \text{ m} \cdot 8 = 2,64 \text{ m}^2$$

Õhu dünaamiline viskoossus määrati kasutades *Engineering Toolbox*-i poolset rakendust. Otsitava suuruse väärtus normaalrõhul ning 450°C on $34,02 \cdot 10^{-6} \text{ N*s/m}^2$ kohta. [16] Tulenevalt sellest, et elektrostaatiline filter on planeeritud töötama normaalrõhul ei pidanud tegema midagi muud kui sisestama töötemperatuuri.

Osakesed, mille diameeter on väiksemad kui 3 µm käsitletakse gaasis kui individuaalseid molekule. Need väiksed osakesed on võimelised lipsama gaasi molekulidest mööda ning nendega arvestamiseks on vaja rakendada Cunninghami parandustegurit, mille hinnangulist väärtust kirjeldab valem 3.9. [17] Kuigi Energiatehnoloogia instituudi poolt kirjeldatud andmetes antud poolkoksi diameetriks on < 0,3 mm, mis on 2 suurusjärku suurem kui kirjeldatud tingimus rakendatakse sellele Cunninghami parandustegurit.

$$C_c = 1 + \frac{6,21 \cdot 10^{-4} \cdot T}{D_p} \quad (3.9)$$

kus D_p – tolmuosakese diameeter;

T – temperatuur otsitaval väärtusel. [17]

Varasemalt leitud ning teada olevate väärtuste põhjal saab avaldada Cunninghami parandusteguri, mis on järgnev:

$$C_c = 1 + \frac{6,21 \cdot 10^{-4} \cdot 723,15}{300} = 1,001497$$

Viimaseks tuleb määrata valemis 3.7 kirjeldatud tegur F. Selle määramiseks on aga vaja välja selgitada tolmuosakese dielektriline konstant ning elektroni vaba tee pikkus gaasis. Eeldades taaskord, et antud põlevkivi omadused on sarnased või vähemalt lähedased Fuyu põlevkiviga saab taaskord rakendada lisas 2 asuvat tabelit [14]. Selle alusel saadakse teada, et 450°C juures on dielektriliseks konstandiks $0,8 \cdot 10^{-10} \text{ F/m}$ kohta.

Elektroni vaba tee pikkuse määramiseks õhus tuli teostada arvutus, õhus olevate gaaside protsentuaalsete suhete põhjal. Seoses teadmatusena, milline on gaaside suhe pürolüüsi seadmest väljumisel ning elektrostaatilisest filtrisse sisenemisel teostati arvutused tavalise õhu kohta. Tulenevalt sellest, et lämmastik moodustab õhust 78,09% ning hapnik 20,95% [18] otsustati mitte arvestada teisi õhus sisalduvaid gaase. Saavutamaks 100% tõsteti nii hapniku kui ka lämmastiku protsente vastavalt 21% ning 79%-ni.

Normaalrõhul ning 15°C juures on hapniku keskmine vaba tee pikkus 67,9 nm ja lämmastiku keskmine vaba tee pikkus 62,8 nm. [19] Seoses määratud keskkonna tingimustega sooritati arvutused normaalrõhul ning 450°C juures. Antud arvutust mõlema erineva gaasi kohta kirjeldab valem 3.10.

$$\lambda(p, T) = \lambda_0 \frac{T p_0}{p T_0} \quad (3.10)$$

kus $\lambda(p, T)$ – elektroni vaba tee pikkus mõjutatuna rõhust ja temperatuurist;
 T, T_0 – temperatuur otsitaval väärtusel ning temperatuur väärtuse mõõtmisel;
 p, p_0 – rõhk otsitaval väärtusel ning rõhk väärtuse mõõtmisel. [19]

Rakendades valemisse 3.8 varasemalt viidatud keskmisi vaba tee pikkus ning mainitud temperatuure saadakse järgnevad väärtused.

$$\lambda(p, T)_{O_2} = 67,9 \text{ nm} \frac{723,15 \text{ K}}{288,15 \text{ K}} = 0,170 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\lambda(p, T)_{N_2} = 62,8 \text{ nm} \frac{723,15 \text{ K}}{288,15 \text{ K}} = 0,158 \text{ } \mu\text{m}$$

Antud arvutustes ei arvestata rõhu muutust, kuna mõlemat gaasi vaadeldakse normaalrõhu juures. Elektron vaba tee pikkuse saamiseks õhus on vaja antud väärtused korrutada valitud hapniku ning lämmastiku suhetega õhus.

$$\lambda_{\text{õhk}} = 0,158 \text{ } \mu\text{m} \cdot 0,21 + 0,17 \text{ } \mu\text{m} \cdot 0,79 = 0,16 \text{ } \mu\text{m}$$

Leitud väärtused rakendatakse valemisse 3.7, mille leitud väärtus on järgnev:

$$F = \left[\left(1 + \frac{2 \cdot 0,16 \text{ } \mu\text{m}}{300 \text{ } \mu\text{m}} \right)^2 + \frac{2 \left(0,08 \frac{nF}{m} - 1 \right)}{\left(1 + \frac{2 \cdot 0,16 \text{ } \mu\text{m}}{300 \text{ } \mu\text{m}} \right) \left(0,08 \frac{nF}{m} + 2 \right)} \right] = 0,00321$$

Antud arvutuste põhjal on leitud koguvate elektroodide pindala, õhu dünaamiline viskoossus, Cunninghami parandustegur ning valemis 3.7 kirjeldatud arvutuslik tegur. Neile lisaks on ka juba varasemalt teadaolevad elektrivälja keskmine tugevus, vaakumi dielektriline konstant, gaasi mahuvoolukiirus ning tolmuosakeste diameeter. Leitud

väärtused tuleb rakendada valemisse 3.8, mille tulemusena saab avaldada A. Bökovi lõputöös [13] valitud elektrostaatilise filtri tööpingele vastava kasuteguri.

$$\eta(D_p) = 1 - \exp \left[- \frac{2,64 \cdot 8,854 \cdot 10^{-1} \cdot (243,161 \cdot 10^3)^2}{3 \cdot 3,402 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0161} (1,00150 \cdot 3,21 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-4}) \right] =$$
$$= 55,596\%$$

Saadud kasutegur jääb kaugemale alla elektrostaatilistele filtritele kehtestatud ootustele, mis on tavaliselt vahemikus 90 kuni 99,95%. [4] Olukord ei parane ka piisavalt rakendatava pinge tõstmisel 12,4 kV-ni, millisel juhul oleks täidetud minimaalne tööstuslikult rakendatava elektrostaatilise filtri elektrivälja keskmine väärtus, 300 kV/m. [3] Sellisel juhul oleks kasuteguriks 71,301%. Minimaalse oodatava kasuteguri saavutamiseks tuleks antud katseseadmes tõsta pinge vähemalt 16,842 kV/m kohta ehk ümardatult 16,9 kV/m kohta. Sellisel juhul saavutab katseseade minimaalse oodatava kasuteguri ehk ligikaudu 90%. Siiski tuleks vajadusel kaaluda pinge tõstmist veelgi kõrgemale saavutamaks paremat kasutegurit.

3.3 Katsed planeeritud elektrostaatilise filtri mudeliga

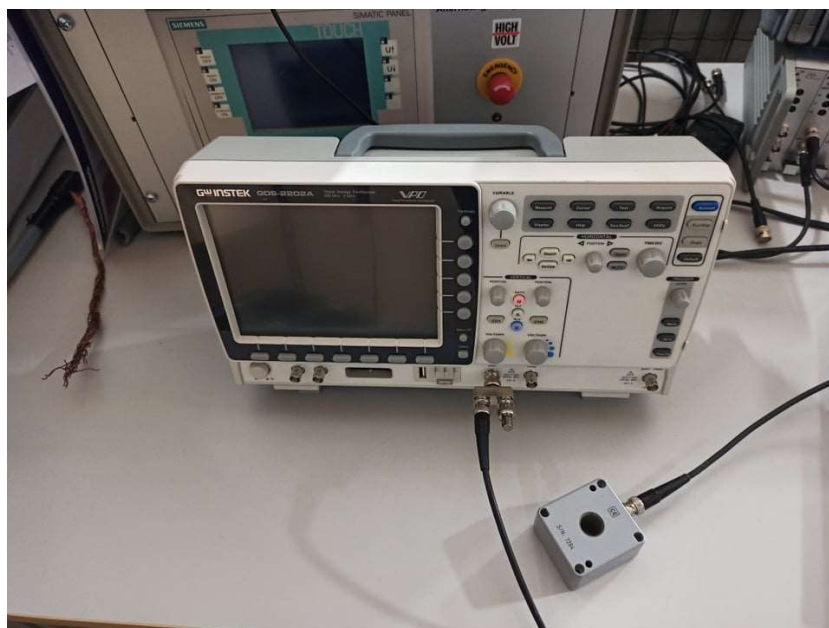
Nagu kirjeldatud peatükis 2.1 oli vaja katseseadme jaoks sobiva kõrgepingetrafo valimiseks teada voolu. Tulenevalt voolu arvutamiseks sobilike valemite puudumisest otsustati Ivar Kiitami soovitusel põhjal määrata elektroodide süsteemist sõltuvad voolu väärtused katseliselt. Antud katsed teostati järgides nii epideemilisi kui elektrilisi ohutusreegleid. Selleks, et tegutseda suunatult koostati katsete jaoks juhend, mis on toodud lisas 3. Juhendis toodud katsed viidi läbi kahes vahemikus esmalt üheksandal ning kuueteistkümnendal veebruaril. Pärast lühikest koroonaviiruse piirangutest põhjustatud analüüsi pausi jätkati katseid üheksandal ning kaheteistkümnendal märtsil.

Voolu määramiseks katsemeetodil loodi koroneerivatest ning sadestavatest elektroodidest koosnev vähendatud mudel, mille üldistatud kuju on esitatud lisas 3 asuval joonisel L3.1. Antud elektroodide süsteem rakendati katsestendile, selle koroneerivad elektroodid ühendati kõrgepinge alalisvooluga ning ülejäänud osad maandati. Katsete jooksul kasutatud mõõtevahendid on esitatud joonisel 3.1 ning 3.2. Katsestend koos ühe võimaliku elektroodide süsteemi mudeliga on illustreeritud joonisel 3.3.

Stendi jaoks kasutatud materjalid saadi kahest erinevast firmast. Sadestavate elektrootide simuleerimiseks kasutatud kaks plaati mõõtudega 300*3*1100 mm saadi Urmetist. Elektrostaatilise filtri koroneerivate elektrootide süsteemi modelleerimiseks kasutatud kolm latti, kaks mõõtudega 12*12*1100 mm ning eelneva kahe lati ühendamiseks kasutatud latti 12*12* mm, saadi Sten&Co-lt. Antud materjalid töötleti sobivaks – lattidel otsad ning plaatidel küljed ümaraks, et vältida ülelööke ebasobilikes kohtades. Mudeli kooshoidmiseks valmistati neljas mõõdus puitklotse, mis paigutati sadestavate elektrootide nurkadesse. Kõrgusteks olid 49, 59, 69 ning 79 mm. Need valiti selleks, et uurida koroonavoolu muutumist vahemiku kasvades ning kahanedes.



Joonis 3.1 Voolu mõõtmiseks kasutatud digitaalne multimeeter



Joonis 3.2 Sädelahenduste sageduse mõõtmiseks kasutatud ostsilloskoop ning mõõtevahend

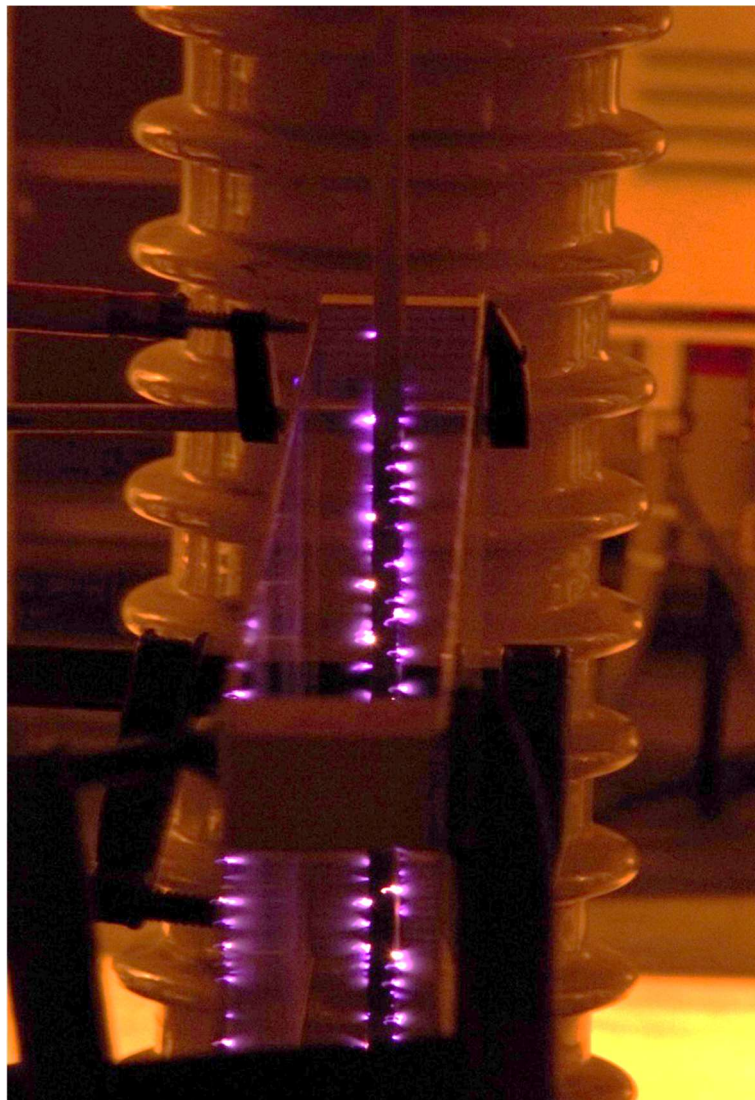


Joonis 3.3 Katsesend koos ühe võimaliku elektroodide süsteemi mudeliga

Tulenevalt sellest, et tootja poolt varustatud latid olid 2 mm laiemad kui need, mis tellitud ning mudelis planeeritud tuli seegi sisse arvestada puiduklotside kõrguse valikusse. Seega kuigi joonistel kujutati sadestavate elektroodide vahet 57 mm – 23,5 mm mõlema sadestava elektroodi pinnast koroneeriva elektroodini ning lisaks veel koroneeriva elektroodi laius, kasvas see vahemik lati tõttu kahe millimeetri võrra. Seega on katsetes saadud tulemused ligilähedased ootustele ning ei kirjelda täpselt mudelis planeeritud vahemikke.

Stendi ülesseadmisel esines ka teine probleem katseteks kasutatud materjalidega. Nimelt osutusid nii sadestavad kui ka koroneerivad elektroodid ootamatult painduvaks. Seega olid nad omandanud transpordis kui ka seistes kerge kumeruse, mis muutis algse elektroodide mudeli võimatuks, kuna ei olnud võimalik saavutada õigeid vahemaid sadestavate ning koroneerivate elektroodide vahel. Seetõttu otsustati hüljata plaan rakendada mudelil sadestavaid elektroode koroneerivate elektroodide täispikkuses ning selle asemel pöörati plaadid külili. Seda tehti eeldusel, et vool kasvab ühtlaselt koroneeriva elektroodi pikkuse kasvuga. Sarnaselt eelmise muudatusega on seega saadud tulemused ainult ligilähedased oodatud tulemustele ning kirjeldavad täpselt ainult seda mudelit.

Pärast materjalist tulevate probleemide lahendamist katsestendile oli vaja enne voolu mõõtmist määrata mudelile vastava ülelööginge. Mainitud pinge varieerus nii plaatide kui ka koroneerivate elektroodide vahekauguste muutmisel. Seega oli tähtis katseid korrata iga kord kui muudeti süsteemi kuju. Ülelööginge tuvastati iga mudeli variatsiooni korral vähemalt kolm korda. Ülelööginge määramine oli oluline tuvastamiseks piiri, mida ületades tekib risk kahjustada voolumõõtevahendit. Antud piiri nimetatakse edaspidi ohutuks mõõtevahemikuks ning see oli 4 kV väiksem kui ülelööginge. Joonisel 3.4 on illustreeritud ülelöögingele lähedal olev koroonalahendus, lilla valgus, katsestendil



Joonis 3.4 Ülelöögingele lähedal olev koroonalahendus, lilla valgus, katsestendil

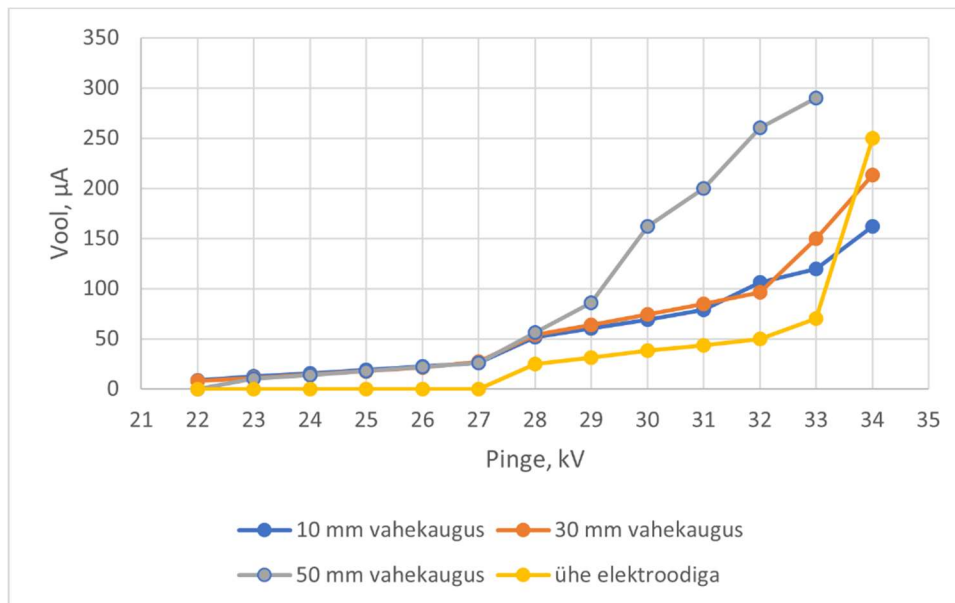
Ülelöögingete tuvastamise järel ühendati süsteemi mõõtevahendid – ehk digitaalne multimeeter ning sädelahenduste mõõtmisteks kasutatav ostsillooskoobi ning aparadi kombinatsioon. Katse tulemuste illustreerimiseks on toodud lisas 3 asuvates tabelites

L3.2 ning L3.3 saadud ülelöögipinged ning ligikaudne mõõdetava koroonavoolu algpinge. Viimane väärtus on puudu 49 mm sadestavate elektroodide vahega, kuna sellel vahekaugusel ei suutnud kasutatud mõõtevahend tuvastada voolu ohutus mõõtevahemikus. Kuna mõõtmiseks kasutatud multimeeter oli seadistatud mikroamprite mõõtmiseks, on võimalik, et antud voolud olid mõõtmiseks liiga väikesed. Samuti on võimalik viga mõõtevahendis. Kuna järgmistel mõõtmistel oli voolumõõtmine võimalik, eeldati et probleemiks olid liiga väikesed voolud. Seetõttu otsustati aja säästmiseks mitte mõõta voolu sellel vahekaugusel mitme elektroodiga mudelite puhul.

Peale voolu puudumise mudelil, kus sadestavate elektroodide vahemikuks oli 49 mm ning koroneerivaid elektroode oli üks, esines mõõtmistel ka teisi probleeme. Nimelt oli keeruline mõõta voolu kahe koroneeriva elektroodiga mudelitel, kus sadestavate elektroodide vaheks oli 79 mm ning koroneerivate elektroodide vahemikeks oli 10 ja 30 mm. Vool oli enamiku pingevahemiku peaaegu tuvastamatu isegi pärast kuulda ning nähtava lahenduse tekkimist, kuid siiski ilmus viimaks ohutu mõõtevahemiku lõpus. Isegi pärast ilmumist oli vool väga hüplik. Pärast multimeetri ümberseadistamist mikroampritele, see hüppelisus kadus, kuid seal oli tõenäoliselt lihtsalt tegu voolu ümardamisega. Tulenevalt eelmainitud probleemist otsustati aja säästmise eesmärgil antud koroneerivate elektroodide vahemikus loobuda 69 mm mudelil antud voolumõõtmisest. Selle asemel keskenduti 59 mm mudelile, mis oli kõige sarnasem koostatud mudelile.

Nagu on näha lisas 3 toodud tabelites L3.4 kuni L3.6 kahanesid ühe koroneeriva elektroodi puhul voolud plaatide vahemikkude kahanemisega vähemalt selle hetkeni kuni katsetel jõuti ohutu mõõtevahemiku piirini. Kuna sama tõepärasus kehtis ka kahe elektroodiga lahendustes ning kuna 49 mm ei olnud võimalik antud mõõteaparaadiga voole määrata võib eeldada, et sadestavate ning koroneerivate elektroodide vahe korral on voolud madalamad.

Tulenevalt multimeetri mõõtevahemiku poolt kehtestatud piirangutest ning toetudes kogutud informatsioonile ei saa laiendada sama järeldust elektroodide vahe kahandamisele. Selle teguri muutumisel olid vähemalt uurimise keskseks olnud sadestavate elektroodide 59 mm vahe puhul voolud küllaltki ühtlased nii koroneerivate elektroodide 10 kui ka 30 mm lahenduste puhul. Lähenedes ohutule mõõtepiirile oli märgata küll kergelt voolude erinevust, kuid ka see oli alla pooleteise kordne. Selle-eest oli voolude vahe võrreldes varasemalt mainitud kahte lahendust 50 mm vahekaugusega võrreldes enam kui kahekordne, nagu on näha jooniselt 3.5.



Joonis 3.5 Koroonavoolud 59 mm sadestavate elektroodide erinevate koroneerivate elektroodide lahenduste puhul

Nagu on näha on toodud ka eelmainitud joonisel ka ühe elektroodiga süsteem. Mainitud elektroodide süsteem on esitatud olenemata sellest, et selle puhul on tegemist teistsuguse elektroodide süsteemi ning läbi selle ka teistsuguse elektriväljaga, millel saadud voole ei saa otseselt laiendada otsitud väärtustele. [6] Ühe elektroodiga süsteemi väärtused jäid allapoole kõikidest mitme elektroodiga süsteemidest välja arvatud siis kui nad jõuadsid ohutu mõõtevahemiku piirini. Siiski ka siis jäi saadud vool alla 1 kV madalamale 50 mm vahekaugusega kahe elektroodiga lahendusele.

59 mm lahenduses ei suudetud määrata mikroampri mõõtevahemikus sobilikke lekkevoole 12,4 ning 16,9 kV jaoks. Seetõttu tuleb eeldada, et need voolud on väiksemad kui tabelis märgitud. Projekteeritud filtris on 75 koroneerivat elektroodi ehk 37,5 koroneerivat elektroodipaari, üles ümardades 38 elektroodipaari. Eeldades, et koroneerivate elektroodide arvu kasvades ühtlaselt on ka voolu kasv ühtlane oleks voolutarbimine antud eelduste põhjal ikka ainult mikroamprites või äärmisel juhul milliamprites. Sellisel juhul näib A. Bõkovi töös mainitud 0,1 – 0,2 A [13] piisavalt ning tundub isegi olevat üledimensioneeritud.

Siiski on need järeldused ainult eeldused ning kindla voolutarbimise määramiseks tuleks valmis ehitada elektrostaatilise filtri mudel ning leida veelgi väiksema mõõtevahemikuga ampermeeter. Sellise mudeliga saaks kindlalt määrata elektroodide arvu ning voolutarbimise vahelise suhte ning rakendades veelgi väiksemat multimeetrit saaks

kindlalt määrata vahemikus olevad koroonavoolud. Toetudes nendele kahele teadmisele saaks valida elektrostaatilise filtri jaoks sobiva toiteallika.

3.4 Vahekokkuvõte

Antud peatükis uuriti 2020. aastal antud tööde lähtepunkte elektrostaatilise filtri koostamiseks ning tõdetud, et nendes töödes tehtud järeldused ning plaanid ei ole piisavad täitmaks filtritele kehtestatud ootusi. Toetudes nendest töödest saadud väärtustele sai tuvastatud ootuste täitmiseks sobivad tööpinged. Need on 12,4 kV saavutamaks oodatud väljatugevust ning 16,9 kV, mis täidab ka väljapinge ootusi ning suudab pakkuda minimaalset oodatavat filtri kasutegurit.

Viimaks analüüsiti filtris tekkiva koroonavoolu määramiseks tehtud katseid ning nende tulemusi. Analüüsi tulemusena jõuti järeldusele, et ka eeldused voolu jaoks olid ebasobivad. Siiski tuleks kindla voolutarbimise määramiseks ehitada elektrostaatilise filtri täielik mudel ning rakendada veelgi täpsemat ning väiksema mõõtevahemikuga ampermeetrit. Nende kahe sammu abil saaks määrata täpsed vajalikud voolud filtri toiteallika valimiseks.

4 ELEKTROSTAATILISE FILTRI KÕRGEPIINGE TEHNILINE LAHENDUS

Selles peatükis antakse ülevaade projekteeritud elektrostaatilise filtri tehnilisest lahendusest. Kuigi antud lahendus jäi teoreetiliseks tulenevalt Energiatehnoloogia hinnangust, et antud projekti realiseerimine läheb liiga kalliks tuuakse antud peatükis välja planeeritud toiteallika ning kaablilahendus, mille abil edastatakse allikast filtri aktiivosale toidet. Sobivaid seadmeid aitas otsida WEGi esindaja Ilja Ruljov.

4.1 Toiteallikas ja kaablid

Kuigi eelmises peatükis sai leitud, et minimaalne vajalik pingeline on 16,9 kV otsustati tõsta elektrostaatilise filtri jaoks kasutatava toiteallika pingeline 25 kV-ni. Pingeline tõstmine kõrgemale astmele aitab veelgi tõsta elektrostaatilise filtri kasutegurit. Rakendades seda kõrgemat pingeline astet alapeatükis 3.2 toodud arvutustesse leitakse, et sellise elektrostaatilise filtri teoreetiline kasutegur 25 kV juures 99,37% ning keskmine väljatugevus antud pingeline on 607,90 kV/m. Kuigi keskmine väljatugevus kergelt ületab vahemiku ülemist piiri on teoreetiline kasutegur maksimum pingeline sobivas vahemikus. [3] [4]

Keskmine väljatugevuse piiripealne väärtus illustreerib ka suurepäraselt, põhjust miks ei ole antud projektis mõtet valida kõrgemat nimipinget kui 25 kV. Kuigi 30 kV juures tõuseks elektrostaatilise filtri kasutegur 99,93 protsendini ei asuks filtri keskmine väljatugevus enam optimaalse vahemiku lähedal, see oleks 729,48 kV/m kohta. Lisaks tõuseks ka tõenäoliselt toiteallika hind. Nende tegurite põhjal ja eeldades, et on saadaval madalama nimipingega toiteallikad ning ei ole vaja täita väga karme keskkonna nõudeid ei tundu 0,56% kasuteguri tõus optimaalne võrreldes eeldatava kulutuste kasvuga.

Tulenevalt alapeatükis 3.3 arutatud probleemidest voolu määramisega otsustati elektrostaatilise filtri maksimaalseks vooluks valida 50 mA. Kuigi elektrostaatilise filtri lekkevoolude puhul on tõenäoliselt jätkuval tegu mikro- või äärmisel juhul mõne milliampriga ei olnud katsete tulemuste põhjal võimalik määrata täpset suhet voolu kasvu ning koroneerivate elektrodide arvu kasvu vahel. Tulenevalt sellest, et ei suudetud leida ka varasemalt teostatud teadustööd vastavatel tingimustel, mis avaks seda seost tuleb filtri projekteerimisel arvestada kerge varuga.

Tulenevalt projekteeritud elektrostaatilisele filtrile kehtivatele väga spetsiifilistele nõuetele, alalisvoolu allikas nimivõimsusega 1,25 kW, osutus täpselt nendele nõuetele vastava tüüplahenduse leidmine oodatust keerukamaks. Seoses sooviga vältida erilahendust, mille tagajärjel võib antud projekti hind tõusta märgatavalt, otsustati leida sobiv lahendus turul olemasolevate seadmete hulgast. Seadmete hulgast, mis suudaksid antud nõudeid täita osutus valituks Spellman'i SL2KW sarjast pärinev toiteallikas, mis on kujutatud joonisel 4.1. [20]



Joonis 4.1 SL2KW tüüpi toiteallikas

Spetsiifiliseks valitud mudeliks osutus SL30N2000, mille nimivõimsuseks on 2 kW, nagu kõikidel SL2KW sarjast pärinevatel toiteallikatel. Valitud mudel annab 30 kV ning 66,6 mA negatiivse polaarsusega toidet. Seadme eeskorpusel olevate pöördnupp-lülitite abil on võimalik reguleerida sobivatele suurusetele nii voolu kui ka pinget. Kuigi antud seadmeid pakutakse ka reguleeritava polaarsusega, otsustati selle projekti raames ainult negatiivse polaarsusega seadme kasuks. Selle valiku põhjusteks olid soov vältida vale polaarsuse kasutamisest tekkivaid äpardusi ning ohtlike olukordi ja vajaduse puudumine positiivsele polaarsusele. Nagu näha jooniselt 4.1 on antud toiteallikas küllaltki kompaktne, mis on kindlasti boonuseks. Lisaks on SL2KW sarjas olevatel toiteallikatel digitaalne liides, mis võimaldab seadet reguleerida ning selle väärtusi kontrollida distantsilt.

Tulenevalt sellest, et projekti ei lahendatud füüsiliselt, mistõttu ei olnud võimalik koostada reaalselt elektriskeemi, kuna puudus informatsioon, kus filter asub ning kui kaugel peab toiteallikas asuma filtrist ning töökohast, kus seda kontrollitakse, on järgnev alapeatükk võrreldes eelnevaga rohkem teoreetiline. Siiski üritatakse anda selles alapeatükis põhilised ettepanekud, mille alusel valida ühendamiseks kasutatavaid kaableid. Toetudes valitud toiteallika nimipingele on teada, et valitavad kaablid peavad

taluvad vähemalt 30 kV pinget. Lisaks on teada, et nii pürolüüsi katseseadet kui ka teoreetilist projekteeritud elektrostaatilist filtrit plaanitakse kasutada korpuses U06 asuvas Energiatehnoloogia instituudi katsehallis ehk sisetingimustel. Tulenevalt sellest, et terve projekteeritud elektrostaatilise filtri aktiivosa takistus on teadmata, ei ole ka võimalik määrata lühisvoolu. Seetõttu tuleb enne projekti realiseerimist kindlasti valmis ehitada elektrostaatiline filter ning määrata selle takistus.

4.2 Vahekokkuvõte

Viimases peatükis selgitati toiteallikale püstitatud nõudeid ning põhjendati, miks said valitud just vastavad nõuded. Samuti tutvustati valitud toiteallikat ning kirjeldati lühidalt selle omadusi. Lisaks avati lühidalt kriteeriume, mida tuleks arvestada kaablite valikul projekti realiseerimise puhul. Kuna projekti praktiline realiseerimine osutus tellija hinnangul liiga kulukaks, ei olnud antud teemat võimalik sügavamalt avada ning tuli piirduda antud töös kirjeldatuga.

KOKKUVÕTE

Lõputöö ülesandeks oli projekteerida Energiatehnoloogia instituudi katsehalli, Ehitajate tee 5 U06 korpusesse põlevkivi pürolüüsi katseseadmele elektrostaatiline filter. Projektis loodud elektrostaatilise filtri mehhaanilise disaini, kasutatavad andurid ning seadmed olid kaasüliõpilase Egert Siiguri vastutada ning antud töö autor, Otto-Kristjan Vanajuur, tegeles filtri kõrgepinge poolega.

Antud bakalaureusetöös tutvustati esmalt elektrostaatiliste filtrite teoreetilisi aluseid ning selgitati erinevate tegurite, sh osakeste kontsentratsiooni ning rakendatava alalisvoolu polaarsuse mõju elektrostaatilise filtri tööle. Teises osas anti lühidalt edasi Egert Siiguri poolt teostatud tööd ning seejärel keskenduti antud lõputöö autori poolt läbiviidud ja teostatud ülesannetele.

Elektrostaatilise filtri teoreetilise kasuteguri arvutamisel tõdeti, et 2020. aastal koostatud töödes tehtud järeldused ning plaanid ei ole piisavad täitmaks filtritele kehtestatud ootusi. Sellele järeldusele jõudmiseks kasutatud arvutuste alusel määrati minimaalsed vajalikud tööpinged elektrostaatilise filtri ootuspäraste nõuete täitmiseks. Lisaks analüüsiti koroonavoolu määramiseks teostatud katsete tulemusi. Analüüsi tulemusena määrati eeldatav vajalik vool. Nende kahe sammu resultaadina määrati eelduslikud minimaalsed toitepinged ning -voolud tagamaks elektrostaatilise filtri toimimist eelduslikel parameetritel ning loodi alused kõrgepinge toiteallika valikuks. Katsete tulemusel tõdeti, et on jätkuvalt vajalik luua täismõõdus mudel, et määrata täpsed koroonavoolud.

Toetudes antud bakalaureusetöös arvutatule ning katsete järeldustele püstitati projekteeritud elektrostaatilisele filtri toiteallikale sobilikud nõuded. Töö tulemusena leiti sobilik toiteallikas, mis täitis ning ka ületas vajalikud nõuded. Viimaks avati lühidalt ka kaablitele kehtivaid kriteeriume. Need aga jäid küllaltki pinnapealseteks, mille taga seisis tõdemus, et tellija, Energiatehnoloogia instituudi, hinnangul osutus projekt liiga kulukaks. See piiras lõputöös kirjeldatu praktilist kinnitamist ning ka osade tehniliste lahenduste aspektide täieliku avamist. Autor hinnangul ei vähenda aga projekti mitte realiseerimine antud bakalaureuse töös loodud teoreetilist väärtust. Käsitatud teema väärrib kindlasti järgnevates töödes sügavamalt avamist.

SUMMARY

The task of this thesis was the creation of a project for an electrostatic precipitator, which is to be used for an experimental pyrolysis device located in the Department of Energy Technology testing hall, Ehitajate 5 building U06. The design of the body of the filter as well as choosing the sensors and devices necessary for the functioning of the precipitator were in the purview of Egert Siigur, whilst the author of this thesis, Otto-Kristjan Vanajuur, dealt with the high voltage side of the project.

The bachelor's thesis begins with an explanation of the theoretical basis of electrostatic precipitators as well as the different factors influencing the work of electrostatic precipitators, including concentration of particles and polarity of the applied direct current. The thesis continues with an explanation of the work done by Egert Siigur and after that focuses on the work done by the author of this thesis.

A conclusion was reached, based on the calculations done to determine the theoretical efficiency of a planned electrostatic precipitator, that the plans and findings presented in the thesis created in 2020 are insufficient to fulfil the expectations set forth for precipitators. The calculations used to reach these conclusions were subsequently used to determine the necessary minimal operating voltage to fulfil the expectations. Additionally, analysis was conducted on the results of the tests done to determine the corona discharge current. As a result of this analysis, the estimated necessary current was determined. These two steps were the basis for determining the presumptive minimum operating voltage and current, which would assure the functioning of the electrostatic precipitator at expected levels and provide the basis for the selection of a high voltage power supply. However, it was recognized that a full-scale model is still necessary to determine accurate corona currents.

The necessary requirements of the power supply of the electrostatic precipitator, were determined based on the calculations as well as the conclusions gathered from the experiments conducted under the purview of this bachelor's thesis. The thesis determined a fitting power supply that fulfilled, but also surpassed the requirements. The requirements set forth for cabling were also discussed as a final note. However, the discussion on that topic remained rather shallow, given that the Department of Energy Technology, that requested that this project be conducted, determined the project too costly. This limited not only the confirmation of the topics discussed in this thesis, but also the finalisation of some technical parts. However, in the opinion of the fact that the electrostatic precipitator was not realized does not detract from the theoretical basis

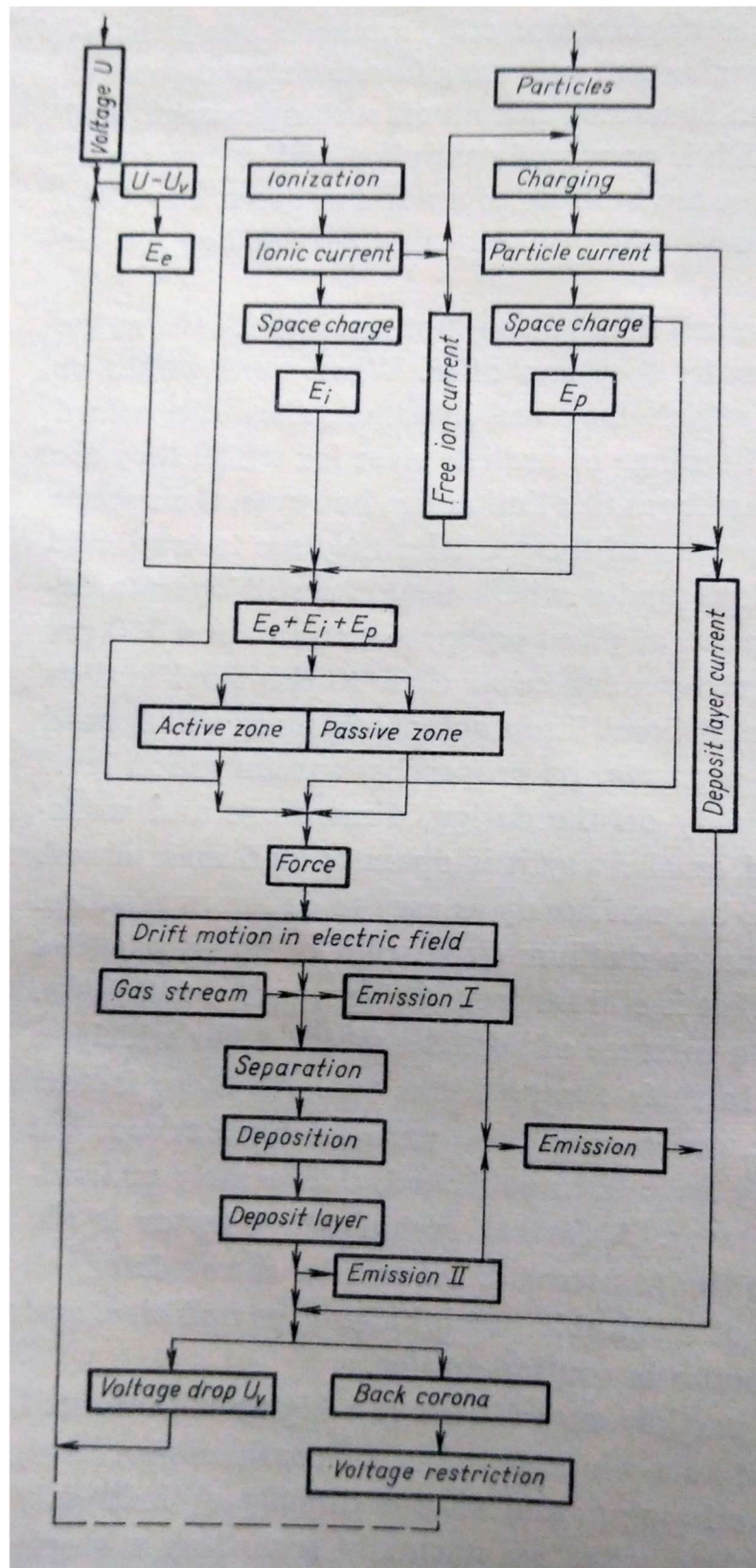
provided by this thesis. The topic at hand undoubtedly deserves a more thorough look at in other papers.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] M. F. Szabo, G. L. Saunders, R. L. Hawks, D. R. Dunbar, W. K. Kemner, J. A. Wuderle, M. H. Phillips ja J. Day, „Operation and maintenance manual for electrostatic precipitators : manual.“, Research Triangle Park (N.C.): U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Air and Energy Engineering Research Laboratory, 1992.
- [2] A. G. Vetoškin, „Tolmupuhastuse protsessid ja seadmed“, Penza: Penza Riiklik Ülikool, 2005.
- [3] K. P. Shah, „Construction, Working, Operation and Maintenance of Electrostatic Precipitators (ESPs),“ Jaanuar 2017. [Võrgumaterjal].
<https://practicalmaintenance.net/wp-content/uploads/Construction-Working-Operation-and-Maintenance-of-Electrostatic-Precipitators-ESPs.pdf>. [Kasutatud 02 03 2021].
- [4] I. P. Muhlenov, A. Y. Averbuh, D. A. Kuznetsov, E. S. Tumarkina ja I. E. Furmer, „Üldine keemiline tehnoloogia, 2 osa, tähtsamad keemiatööstused“, Moskva: Kõrgkool, 1984.
- [5] V. Straus, „Tööstuslik gaasipuhastus“, Moskva: Keemia, 1981.
- [6] J. Böhm, „Electrostatic precipitators“, Praha: SNTL Publishers of Technical Literature, 1982.
- [7] V. G. Gerasimov, P. G. Grudinskiy, L. A. Žukov, V. A. Labuntsov, I. N. Orlov, M. M. Sokolov, A. M. Fedoseev, A. Y. Šihhin ja I. V. Antik, „Elektrotehniline teatmik. Kolmas köide. Raamat 2. Elektrilise energia kasutamine“, Moskva: Энергоиздат, 1982.
- [8] J. Benitez, „Process Engineering and Design for Air Pollution Control“, Upper Saddle River (N.J.): Prentice Hall, 1992.
- [9] A. G. Kasatkin, „Peamised keemilise tehnoloogia protsessid ja seadmed“, Moskva: Keemia, 1971.
- [10] L. M. Polotsky ja G. I. Lapašenkov, „Keemiatööstuse automatiseerimine“, Moskva: Keemia, 1982.
- [11] E. Siigur, "Pürolüüsi katseseadme kõrgepingefiltri elektrimuundamine", Tallinn: TTÜ, 2021.
- [12] Energiatehnoloogia instituut, „Pürolüüsiseadme alusdokumendid“, Tallinn, 2020.
- [13] A. Bõkov, „Pürolüüsi katseseadme elektrifiltri elektritoide“, Tallinn: TTÜ, 2020.

- [14] S. Youhong, Z. Shuai, L. Qiang, L. Shichang ja H. Jing, „Thermoelectric coupling analysis of high-voltage breakdown industrial frequency pyrolysis in Fuyu oil shale”, *International Journal of Thermal Sciences*, 2017.
- [15] M. Neustus, "Pürolüüsi katseseadme elektrifiltri korpuse ja elektrootide kujundamine tahkete osakeste vähendamiseks", Tallinn: TTÜ, 2020.
- [16] Engineering ToolBox, „Air - Dynamic and Kinematic Viscosity,” 2003. [Võrgumaterjal]. https://www.engineeringtoolbox.com/air-absolute-kinematic-viscosity-d_601.html. [Kasutatud 15 Detsember 2020].
- [17] Environmental Protection Agency, APTI 413: Control of Particulate Matter Emissions, Newport News, Virginia: C2 Technologies, Inc, 1999.
- [18] A. N. Cox, "Allen's Astrophysical Quantities (Fourth Edition)", New York: Springer Science+Business Media, 2000 .
- [19] E. Kuffel ja W. S. Zaengl, "High Voltage Engineering Fundamentals", Oxford: Pergamon Press, 1984.
- [20] Spellman High Voltage Electronics Corporation, „Compact 2kW High Voltage Power Supplies,” 2008. [Võrgumaterjal]. <https://www.spellmanhv.com/en/high-voltage-power-supplies/SL2KW>. [Kasutatud 6 Mai 2021].

LISA 1 ELEKTROSTAATILISE FILTRI TÖÖPROTSESS [6]



LISA 2 FUYU PÕLEVKIVI TERMILISED NING ELEKTRILISED OMADUSED [14]

Temperature °C	Nature	Anisotropic constants	Dielectric constant F/m	Thermal conductivity (W/m·°C)		Resistivity Ω·m		Specific heat capacity (J/kg·°C)
				Parallel bedding	Vertical bedding	Parallel bedding	Vertical bedding	
				25	1.19	1.12×10^{-10}	0.6155	
150	1.22	0.93×10^{-10}	0.6951	0.5506	1.50×10^6	0.91×10^7	2004.0	
250	2.16	1.00×10^{-10}	0.4068	0.3282	0.88×10^6	1.10×10^7	1733.0	
350	1.24	1.14×10^{-10}	0.3637	0.3369	0.20×10^6	1.00×10^7	970.7	
450	1.37	0.80×10^{-10}	0.3568	0.3320	0.50×10^5	0.80×10^6	1187.0	
520	1.68	1.40×10^{-10}	0.2324	0.2177	0.20×10^4	0.77×10^5	1033.0	
550	1.58	1.60×10^{-10}	0.2088	0.1797	1000	0.24×10^4	764.0	
600	1.40	1.25×10^{-10}	0.1845	0.1633	600	1000	738.2	
700	1.49	1.15×10^{-10}	0.1564	0.1531	100	100	365.4	
750	1.37	1.10×10^{-10}	0.1573	0.1540	0.1	0.1	353.0	

LISA 3 LÕPUTÖÖ KATSEJUHEND

Lõputöö katsejuhend

Töö eesmärk

Koostada volt-amper karakteristik koroona tekkimise kohta antud katseseadmes.

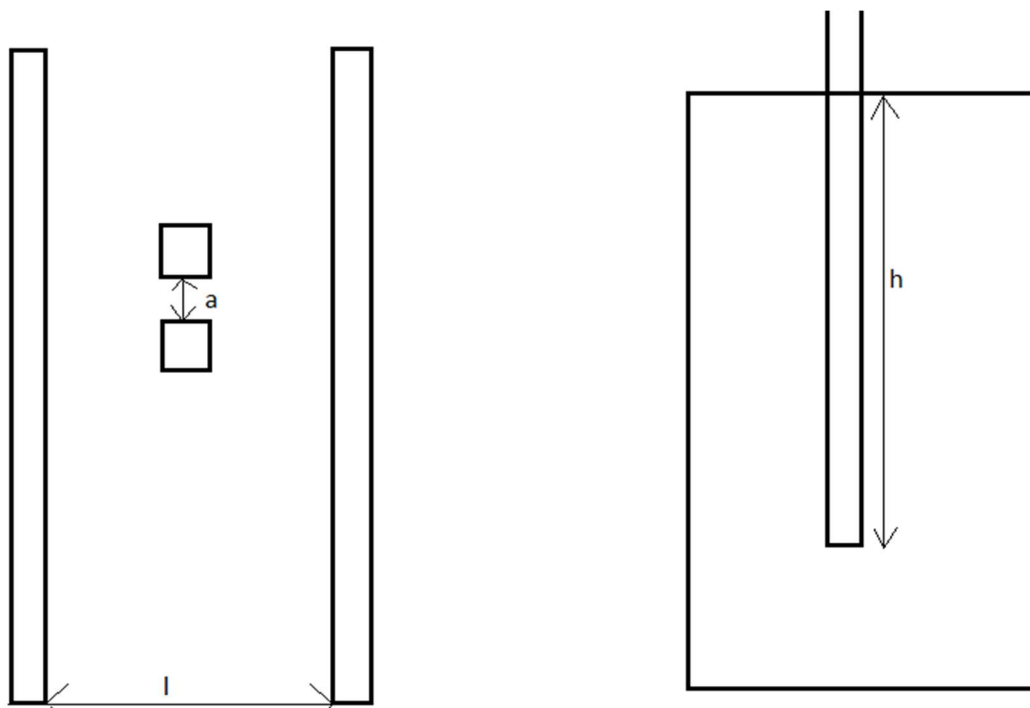
Programm

- 1 Fikseerida atmosfääri parameetrid (rõhk, temperatuur, õhuniiskus);
- 2 Mõõta ülelöögipinge sadestavate ja koroneerivate elektrodide erinevatel vahekaugustel;
- 3 Selgitada välja ligikaudne hetk, millal koroona tekkimise vool sadestavate ja koroneerivate elektrodide erinevatel vahekaugustel;
- 4 Mõõta koroonavool sadestavate ja koroneerivate elektrodide erinevatel vahekaugustel;

Töö selgitus

Koostatakse katsestend vastavalt joonisel 1 kujutatud skeemile. Esimene katse tehakse ühe elektrodiga, enne katset mõõdetakse ära pulk elektrod plaat elektrodide vahel olev pikkus h . Katse käigus veendutakse, et ülelöök ei toimuks varda otsa ja plaadi või plaadi serva ja varda vahel. Kui ülelöök toimub eelnimetatud kohtades korduvalt tuleb katsevahendeid probleemsetest kohtadest ümardada. Katse käigus määratakse plaatide erinevate vahemaade l puhul ülelöögipinge, koroona tekkimise pinge ja koroonavool.

Järgnev katse teostakse kahe elektrodiga, enne katset mõõdetakse ära elektrodide plaatide vahel olev pikkus h (mõlema elektroodi pikkused liidetakse kokku) ja elektrodide vahekaugus a . Katset korratakse erinevate elektrodide vahekauguse korral ning mõõdetakse kindla plaatide vahemaa l puhul ülelöögipinge, koroona tekkimise pinge ja koroonavool. Pulk elektrodile rakendatakse negatiivset alalispinget.



Joonis L3.1. Katsestendi skeem

Tabel L3.1 Katsetingimused

Katse	Temperatuur T_{kuiv} , °C	Õhurõhk p , hpa	Õhuniiskus a , %
49 mm	20	1013,1	12
59 mm	20,6	982,6	12
69 / 79 mm	20,7	1009,6	10,6

Tabel L3.2 Pinged ühe koroneeriva elektroodiga plaatide vahekauguse muutmisel

Plaatide vahekaugus, mm	Ülelöögipinge, kV	Mõõdetava koroonavoolu algpinge, kV	Plaatide vahekaugus, mm	Ülelöögipinge, kV	Mõõdetava koroonavoolu algpinge, kV
49	29,3	-	69	44	26
	32	-		45	27
	32	-		45	27
59	38	28	79	50	17
	37	27		49	16
	38	28		50	17

Tabel L3.3 Pinged kahe koroneeriva elektroodiga plaatide ning lattide vahekauguse muutmisel

Plaatide vahekaugus, mm	Lattide vahekaugus, mm	Ülelöögipinge, kV	Möödetava koroonavoolu algpinge, kV
59	10	37	22
		38	22
		37	22
	30	37	22
		37	22
		37	22
	50	37	23
		37	23
		37	23
69	10	-	-
		-	-
		-	-
	30	-	-
		-	-
		-	-
	50	45	19
		44	19
		45	19
79	10	49	35
		49	35
		50	35
	30	50	40
		49	40
		50	40
	50	49	15
		50	15
		49	15

Tabel L3.4 Koroonavoolud ühe koroneeriva elektroodiga plaatide vahekauguse muutmisel

Pinge, kV	79 mm Vool, μ A	69 mm Vool, μ A	59 mm Vool, μ A
15	0	0	0
16	0	0	0
17	2,3	0	0
18	3,8	0	0
19	5,5	0	0
20	7,1	0	0
21	8,9	0	0
22	10,8	0	0
23	13	0	0
24	15,3	0	0
25	17,6	0	0
26	20,1	0	0
27	30,3	0,5	0
28	35	17	24,5
29	39,4	32,2	31
30	44,4	38,7	38
31	49,8	44,6	43,5
32	74,2	51,2	50
33	83	57,8	70
34	91,8	65,3	250
35	112,5	112	Ohutu mõõtevahemiku piir
36	150	124	
37	165,8	220	
38	182	300	
39	220	400	
40	350	620	
41	400	Ohutu mõõtevahemiku piir	
42	510		
43	620		
44	800		
45	1000		
46	Ohutu mõõtevahemiku piir		

Tabel L3.5 Koroonavoolud 79 mm vahega sadestavatel elektroodidel koroneerivate elektroodide vahekauguse muutmisel

Pinge, kV	50 mm Vool, μ A	30 mm Vool, μ A	10 mm Vool, μ A	30 mm Vool, mA	10 mm Vool, mA
14	0	0	0	0	0
15	2,1	0	0	0	0
16	3,1	0	0	0	0
17	4,3	0	0	0	0
18	5,8	0	0	0	0
19	7,2	0	0	0	0
20	8,9	0	0	0	0
21	10,6	0	0	0	0
22	12,5	0	0	0	0
23	25,5	0	0	0	0
24	53,5	0	0	0	0
25	78	0	0	0	0
26	97,8	0	0	0	0
27	115	0	0	0	0
28	142	0	0	0	0
29	169	0	0	0	0
30	210,5	0	0	0	0
31	243	0	0	0	0
32	292	0	0	0	0
33	355	0	0	0	0
34	395	0	0	0	0
35	467	0	170	0	0
36	506	0	180	0	0
37	593	0	225	0	0
38	651	0	260	0	0
39	707	0	3400	0	0
40	787	84	Multimeetri viga	0	0
41	894	140		0	0,03
42	980	240		0,05	0,04
43	1100	3860		0,2	0,1
44	1420	Multimeetri viga		0,38	0,2
45	1610			0,40	0,28
46	Ohutu mõõtevahemiku piir	Ohutu mõõtevahemiku piir	Ohutu mõõtevahemiku piir	0,65	Ohutu mõõtevahemiku piir

Tabel L3.6 Koroonavoolud 69 mm ning 59 mm vahega sadestavatel elektroodidel koroneerivate elektroodide vahekauguse muutmisel

Pinge, kV	(69) 50 mm Vool, μ A	50 mm Vool, μ A	30 mm Vool, μ A	10 mm Vool, μ A
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	6,2	0	0	0
20	12,1	0	0	0
21	20,8	0	0	0
22	44,5	0	8	8,5
23	76,5	10,3	11	12,3
24	122	13,9	14	15,5
25	148,5	17,8	17,5	18,9
26	194,5	22	21,5	22,4
27	250	26	27	26
28	290	56	54	51,5
29	330	86	63,7	60
30	388	162	74	69
31	477	200	84,5	78,8
32	551	260	96	106
33	615	290	150	119,5
34	715	-	213	162
35	802	Ohutu m�ootevahemiku piir	Ohutu m�ootevahemiku piir	Ohutu m�ootevahemiku piir
36	904			
37	1055			
38	1162			
39	1258			
40	1370			
41	Ohutu m�ootevahemiku piir			