

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND
Füüsika Instituut

**Koroonalahendusel ja mehaanilisel filtril põhinevate õhupuhasüsteemide võrdlus
realistlikes tingimustes**

Simon Drõgin

Magistritöö (30 EAP)

Füüsika

Juhendajad:

Indrek Jõgi, PhD

Heikki Junninen, PhD

Tartu 2025

Infoleht / Abstract

Koroonalahendusel ja mehaanilisel filtril põhinevate õhupuhastite võrdlus realistlikes tingimustes

Magistritöö raames uuriti koroonalahendusel põhineva õhupuhastusseadme efektiivsust realistlikes tingimustes. Laadurist ja kollektorist koosneva õhupuhastiga tehti eksperimente Tartu Ülikooli Physicumi õppehoone kabinetis. Õhupuhastis kasutati aerosoolidele elektrilaengute viimiseks koroonalahendusel põhinevat laadurit ja seejärel kasutati pingestatud plaatidega kollektorit laengutega aerosoolide eemaldamiseks. Mõõtmisi tehti kahe laaduri prototüübiga ning katsete käigus muudeti erinevaid tegureid – õhupuhastisse sisenevat õhuvoogu (ventilaatori kiirust), laaduri pinget ning puhasti sisendi ja väljundi asukohti. Lisaks uuriti ka erineva suurusega aerosoolide (kuni 1,15 µm) eemaldamise efektiivsust ja osooni tootlikkust. Töö käigus saadi teada, et uuritav seade puhastas kabineti õhku efektiivsemalt kui kommertsiaalselt kasutatav HEPA filter. Laaduri pinge kasvatamisel tekkis CADR (inglise k. *Clean Air Delivery Rate*) väärtuse „platoo“ ning asukoha muutus mõjutas peamiselt suuremaid (1,15 µm) osakesi. Osooni tootlikkus jäi alla 100 ppb. Tõestati, et koroonalahendusel põhinev õhupuhastusseade on efektiivne kabinetis kasutamiseks ning seadmel on potentsiaali kommertsiaalselt kasutusse jõuda.

Märksõnad: koroonalahendus, õhupuhasti, CADR, HEPA, PM2,5

CERCS: P240 Gaasid, vedelike dünaamika, plasma

Comparison of corona discharge-based and mechanical filter air purifiers under realistic conditions

The effectiveness of an air purifier based on corona discharge was studied under realistic conditions. Experiments were conducted in the Physicum building at the University of Tartu. The air purifier consisted of a charger (for charging aerosols) and a collector (for capturing charged aerosols). Two charger prototypes were tested and the following parameters varied – incoming air flow to the purifier (via fan power), charger voltage and the positioning of the inlet and outlet. The CADR (Clean Air Delivery Rate) of different sized aerosols (max 1.15 µm) and the production of ozone were also studied. Results showed that the corona discharge air purifier was more effective than the commercially used HEPA filter. When the charger voltage was increased, the CADR value reached a plateau, and changes in device placement

mainly affected the removal efficiency of larger particles. Ozone production did not exceed 100 ppb. These findings show that the air purifier based on corona discharge is an effective device to use in an office and has potential to be used commercially.

Keywords: corona discharge, air purifier, CADR, HEPA, PM2.5

CERCS: P240 Gases, liquid dynamics, plasma

Sisukord

1	Kasutatud lühendid	6
2	Sissejuhatus	7
3	Kirjanduse ülevaade	8
3.1	Lühiülevaade aerosoolidest	8
3.2	Aerosoolid ja inimtervis	8
3.3	Lühiülevaade õhupuhastitest	9
3.3.1	Mehaanilised filtrid	10
3.3.2	Elektrostaatilised filtrid/sadestid	11
3.3.3	Ultraviolettkiirgusega puhastamine.....	11
3.3.4	Aktiivsöefiltrid	12
3.4	Koroonalahendus ja koroonatuul	12
3.5	Puhta õhu tootmise kiirus (CADR)	13
4	Eksperimentaalsed seadmed ja meetodid	15
4.1	Eksperimentide keskkond	15
4.2	Aerosoolide mõõtmine	17
4.2.1	Alphasense OPC-N3	17
4.2.2	FMPS TSI Model 3091	17
4.3	Osooni mõõtmine	18
4.4	Koroonalahendusel põhinev õhupuhastusseade	18
4.4.1	Prototüüp I.....	20
4.4.2	Prototüüp II	20
4.5	Eksperimenti kirjeldus.....	21
4.6	Andmetöötlus	21
5	Tulemused ja arutelu	23
5.1	Saaste loomuliku eemaldumise teguri k_t leidmine	23
5.2	HEPA filtri võrdlus prototüübiga I ja II	24
5.3	CADR sõltuvus laaduri pingest.....	25
5.3.1	Prototüüp I.....	25
5.3.2	Prototüüp II	26
5.4	FMPS mõõtmised.....	27
5.5	Õhupuhasti sisendi ja väljundi asukoha sõltuvus.....	28
5.6	Osooni tootlikkus	30

5.7	Määramatust mõjutavad tegurid.....	31
5.7.1	Aerosoolide algkonsentratsiooni varieeruvus	31
5.7.2	Aerosoolide genereerimise lahus.....	33
6	Kokkuvõte	34
7	Kasutatud kirjandus.....	35
8	Lisad	37

1 Kasutatud lühendid

HEPA – kõrge efektiivsusega osakeste õhufilter (*High Efficiency Particulate Air*)

PM – tahked osakesed (*Particulate Matter*)

UV – ultraviolett

CADR – puhta õhu tootmise kiirus (*Clean Air Delivery Rate*)

OPC – optiline osakeste loendur (*Optical Particle Counter*)

FMPS – kiire liikuvusega osakeste mõõtja (*Fast Mobility Particle Sizer*)

ppb – osakest miljardis (*parts per billion*)

RH – suhteline niiskus (*Relative Humidity*)

2 Sissejuhatus

Tänapäeval väärtustatakse puhast õhku järjest enam, kuna inimeste teadlikkus õhukvaliteedi ja tervise vahelisest seosest on märgatavalt tõusnud. Õhusaastest tulenevad haigused tapavad mitu miljonit inimest aastas [1]. Suurenenud teadlikkusega kasvab ka nõudlus siseruumide õhupuhastite järele, eriti riikides, kus majandusareng ja tööstus on kiiresti kasvamas, nagu näiteks Hiinas [2]. Siseruumides (kodud, koolid, kontorid) kasutatavad õhupuhastid peavad olema efektiivsed mitte ainult labori keskkonnas vaid ka reaalsetes töö- ja elamistingimustes. Seetõttu on oluline katsetada selliseid seadmeid igapäevases keskkonnas.

Siseruumide õhu filtreerimiseks on võimalik kasutada mitmeid erinevat tüüpi filtreid, nagu näiteks mehaanilised filtrid, aktiivsöe filtrid ja elektrostaatilised filtrid, millest kõikidel on omad tugevused ja nõrkused. Elektrostaatilistes filtrites saavad õhuosakesed laengud ning need laenguga osakesed korjatakse õhuvoolust elektrostaatilise jõu abil kokku. Erinevalt mehaanilisest filtrist ei osuta elektrostaatiline filter õhuvoole olulist vastupanu.

Antud magistritöö eesmärgiks on uurida koroonalahendusel põhineva elektrostaatilise õhupuhasti efektiivsust realistlikes tingimustes ning võrrelda seda laialdaselt kasutatava HEPA (inglis k. *High Efficiency Particulate Air*) filtriga. Lisaks uuritakse puhastamise efektiivsust ka erinevate aerosoolide suuruste puhul, sest inimtervise koha pealt mängib aerosoolide suurus olulist rolli. Antud töös uuriti 6 nm ... 1,15 µm suuruste aerosoolide puhastamise efektiivsust. Veel uuriti õhupuhasti sisendi ja väljundi asukohast tulenevaid muutusi ning osooni tekkimist seadme töö käigus.

Uurimistöö eesmärgi saavutamiseks viidi läbi eksperimente Tartu Ülikooli Physicum'i õppehoone kabinetis. Eksperimendi keskkonda genereeriti aerosoole, mida eemaldati uuritava õhupuhastiga, et saada teada puhasti efektiivsust erinevatel tingimustel. Katseid tehti kahe erineva koroonalahendusel töötava filtri prototüübiga realistlikes oludes, mille jooksul varieerus päeviti temperatuur ja õhuniiskus.

3 Kirjanduse ülevaade

3.1 Lühiülevaade aerosoolidest

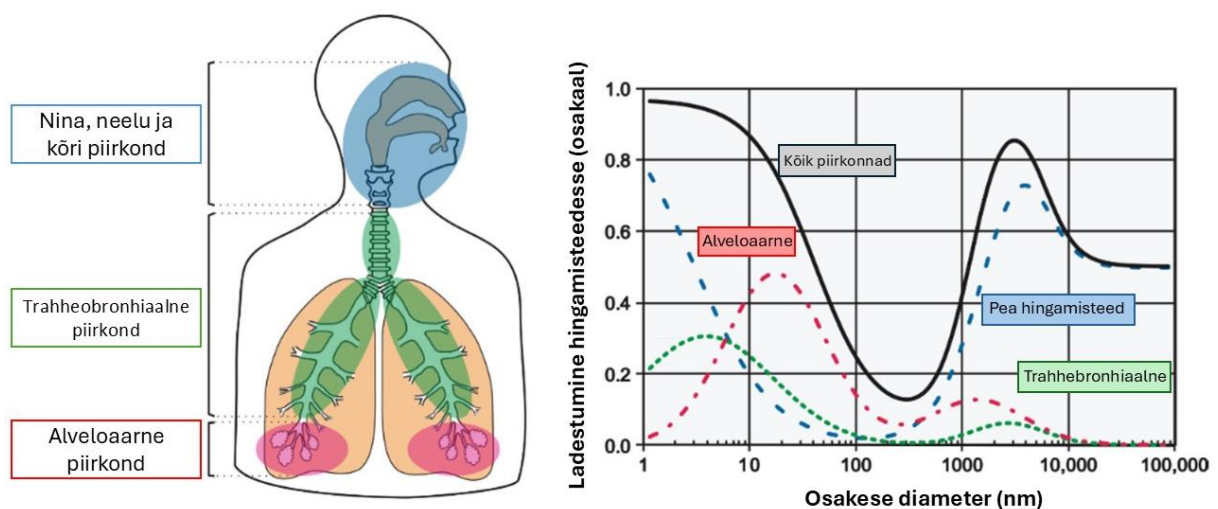
Aerosoolid on väikeste tahkete ja gaasi osakeste või vedeliku piiskade dispersne segu ning nad jäävad suuruse vahemikku mõni nanomeeter kuni sajad mikromeetrid. Selliseid osakesi võib jagada tekke- ja emiteerumisallikate järgi orgaanilisteks ja inimtekkelisteks aerosoolideks. Orgaanilised aerosoolid moodustavad suurema osa õhu aerosoolidest ning need pärinevad looduslikest allikatest – õietolm, bakterid, lenduvad orgaanilised ühendid. Inimtekkeliste aerosoolide allikaks võib olla näiteks tööstusest tulenev saaste [3]. Aerosooli võib jagada ka tekkeviisi järgi primaar- ja sekundaarosakesteks. Primaarosakesed paisatakse õhku tahke või vedela aine pihustumisega juba valmiskujul. See protsess võib esineda nii looduslikult (vulkaanipursked, veelainete murdumine, tuulest tingitud erosioon) kui ka inimtekkeliselt (plahvatusliku aine lõhkamine, transpordist tulenev saaste). Sekundaarosakeste formeerumiseks on vaja väikest osakest, kuhu külge saaksid kondenseeruda erinevad õhku paisatud lisandgaasid (SO_2 , NH_3 , NO_x , joodioksiidid, gaasilised orgaanilised ained). Nimetatud protsess on nukleatsioon. Sekundaarosakesed võivad kasvada ka erinevate sekundaarosakeste liitumisel – koagulatsioon. Tulenevalt kasvuprotsesside aeglustumisest ja osakeste eemaldumisest atmosfäärist, ei saa sekundaarosakesed kasvada suuremaks kui 1 mikromeeter [4].

3.2 Aerosoolid ja inimtervis

Juba 20. sajandist on teada, et inimese tervise ja puhta õhu vahel on otsene seos. Epidemioloogilised uuringud on näidanud, et aastal 2010 suri umbes 3,3 miljonit inimest just õhusaastest tulenevate haiguste tõttu ning tänavu on see number veelgi suurem [1]. Kui õhus on kõrge kontsentratsiooniga saaste, nagu näiteks osoon (O_3), lämmastikoksiidid (N_2O , NO , NO_2 , NO_3 , N_2O_5) ja aerosoolid, siis see võib põhjustada erinevaid terviseprobleeme nagu allergilisi, hingamisteede ja südameveresoonekonna haigusi [5]. Aerosooli teaduses, eriti inimtervise valdkonnas, kategoriseeritakse sissehingatavaid tahkeid osakesi aerodünaamilise diameetri järgi üldiselt kahte gruppi: kuni $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$, inglise k. *Particulate Matter*) ja kuni $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}). Aerodünaamiline diameeter on osakese mõõt, mis arvestab selle kuju ja tihedust. See on defineeritud kui 1000 kg/m^3 tihedusega sfäärilise osakese diameeter tingimusel, et see osake settib sama kiirusega kui uuritav (mitte sfääriline) osake [6]. $\text{PM}_{2,5}$ osakesed võivad sisse hingates ladestuda kopsudesse ning tuua esile hingamisteede haigusi.

Puhta õhu olulisust teadvustavad ka erinevate riikide valitsused ning seetõttu on nad pannud piirväärtused PM_{2,5} ja PM₁₀ osakeste kokkupuutele inimese kohta. Euroopa Liidus on näiteks aastane keskmine kokkupuute piirang PM_{2,5} puhul 20 µg/m³ ning PM₁₀ puhul 40 µg/m³ [7].

Viirused jäävad suurusevahemikku 20 ... 400 nm ning seetõttu on neid õhust kätte saada üsnagi keeruline. Uuringud on näidanud, et aerosoolid käituvad kui efektiivsed transpordivahendid nii gripiviiruse A kui ka SARS-CoV-1 viiruse levikul [8], [9]. Väikesed viirust kandvad aerosooli osakesed (< 5 µm) võivad sissehingamisel jõuda inimese organismi ning sealabi aidata viirusel isikut nakatada. Sissehingatavad aerosoolid võivad jõuda, olenevalt nende suurusest, erinevatesse hingamiselundkonna osadesse (nina, neelu ja kõri piirkond; trahheobronhiaalne piirkond; alveloaarne piirkond) [10]. Seda illustreerib joonis 1, mis on kohandatud artiklist [10]. SARS-CoV-2 viiruse uuringute käigus on leitud, et viirus on aerosooli osakese küljes nakatumisvõimeline mitmeid tunde pärast väljahingamist, mis võimaldab viirusel läbida võrdlemisi pikki distantse [11]. Seetõttu mängib aerosooli osakeste õhust eemaldamine suurt rolli rahvastiku haigestumise vältimises.



Joonis 1. Erinevate suurustega aerosoolide ladestumine erinevatesse hingamiselundkonna osadesse.

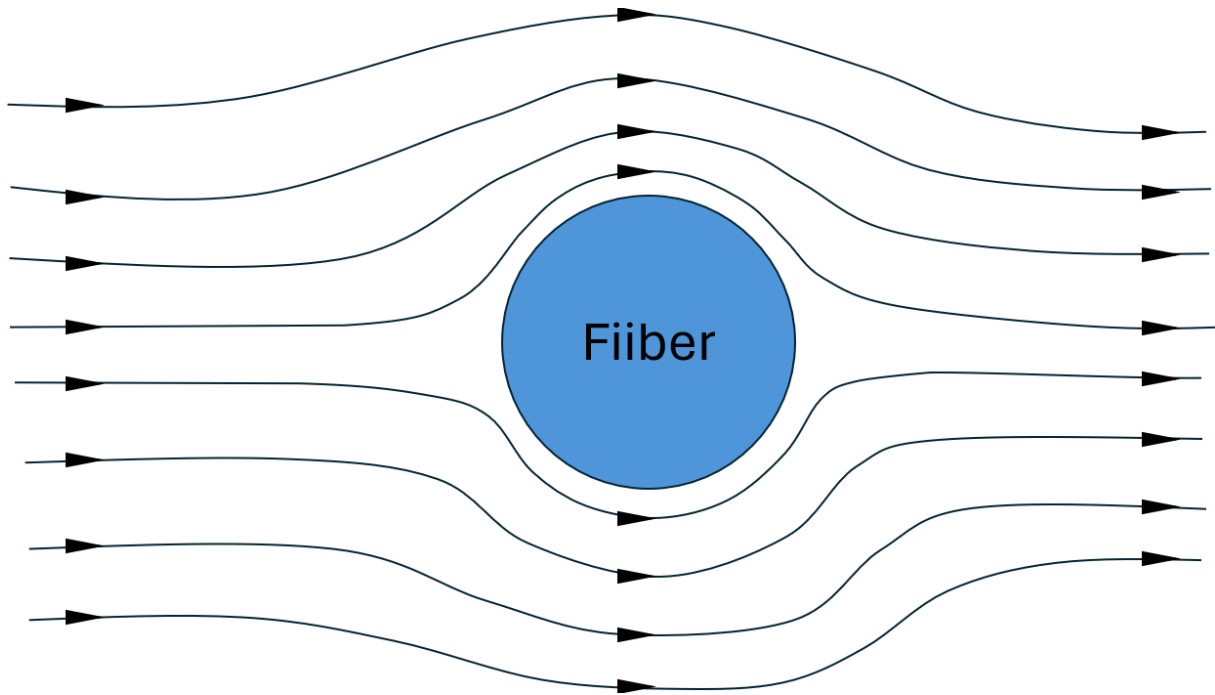
3.3 Lühiülevaade õhupuhastitest

Viimastel aastatel on õhupuhastite kasutamise populaarsus maailmas kasvanud. Selles mängivad suurt rolli nii massiivne tööstuse kasv arenguriikides (nagu näiteks Indias ja Hiinas) kui ka kasvanud teadlikkus puhta õhu ja hea tervise vahelisest seosest. See tähendab ka seda, et inimesed on nõus maksma kodus sisse hingatava puhta õhu eest. Selliseid aspekte on uuritud

Hiina näitel [12], [13]. Efektiivne siseruumi õhu kvaliteedi tõstmine koosneb kahest osast – ventilatsioon ja õhu puhastamine. Tänapäevaks on turule toodud mitmeid erinevate meetoditega töötavaid õhupuhasteid.

3.3.1 Mehaanilised filtrid

Mehaaniline filter (nt. sigareti filter) kasutab tihedat võrkstruktuuri, millest õhk läbi suunatakse. Sellise filtri efektiivsus oleneb võrkstruktuuri poori suurusest ning aerosooli osakeste kinni püüdmine toimub, olenevalt osakese aerodünaamilisest diameetrist, läbi kolme mehhanismi [14]. Joonisel 2 on kujutatud voolujooni ümber üksiku filtri fiibri, mida mööda liigub gaas (õhk). Kui osake liigub mööda voolujooni, aga puutub fiibriga kokku, siis see kleepub fiibri külge. Sellise efekti tõenäosus kasvab, kui filtri fiibri (või graanuli) diameeter läheneb osakese geomeetrilisele diameetrile. Kui aerosooli osakesel on piisavalt suur inerts (suuremad osakesed), siis see osake ei liigu mööda voolujoone kõverust vaid suundub otse vastu fiibrit. Viimati kirjeldatud efekti tõenäosus kasvab osakese suurusega ja õhuvoolu kiirusega. Palju väiksemad osakesed liiguvad, tulenevalt väiksele inertsile, üsna hästi mööda voolujooni. Sellistele osakestele mõjub Browni liikumine [15] oluliselt rohkem ehk lisaks voolujoonte suunalisele liikumisele tuleb arvestada ka suvalises suunas saadud impulssidega (difusioon). Kui see üliväike osake jõuab fiibrile piisavalt lähedale, siis kleepub see Van der Waalsi jõu [16] tõttu filtri võrkstruktuuri külge. Difusiooni efekti tõenäosus on pöördvõrdelises seoses osakese suuruse ja õhuvoolu kiirusega. Suure efektiivsusega tahkete osakeste õhufilter (HEPA, inglise k. *High Efficiency Particulate Air*) on hetkel kõige populaarsem õhupuhastites kasutatav filtri tüüp. Eeltoodud mehhanisme arvestades püütakse kõige väiksema efektiivsusega kinni 0,3 µm suuruseid osakesi ning HEPA filtrite efektiivsus antaksegi selle suuruse jaoks. HEPA filtri efektiivsus on standardite järgi 99,97 % [15]. Üldiselt on mehaanilise filtreerimise puhul soovitatav kasutada mitme filtri süsteemi. N-ö “eelfiltri” kasutamine aitab peamise filtri eluiga pikendada. Eelfiltri võrkstruktuuri poori suurus on peafiltri omast suurem ning selle ülesanne on kinni püüda suuremaid osakesi, et peamise filtri võrkstruktuur ei ummistuks nii kiiresti [15]. HEPA filtri korral on suure õhutakistuse tõttu kiiret õhuvoo raske saavutada ning selle saavutamisel tekib rohkem müra. Suure takistuse tõttu peab olema ka rõhkude erinevus ja ventilaatori võimsus võrdlemisi suur.



Joonis 2. Õhu liikumise voolujooned ümber ühe mehaanilise filtri fiibri.

3.3.2 Elektrostaatilised filtrid/sadestid

Erinevalt mehaanilisest filtrist ei osuta elektrostaatiline filter õhuvoole olulist vastupanu, st õhk liigub materjali asemel läbi elektrivälja. Sellised filtrid kasutavad laetud osakeste tekitamiseks koroonalahendust [16]. Saastunud õhk liigub läbi piisavalt kõrge elektrivälja, milles õhu molekulid ioniseeruvad. Tekkinud ioniseeritud molekulide abil toimub osakeste laadumine. Seejärel kogub positiivse/negatiivse laenguga plaat negatiivse/positiivse laenguga osakesed kokku ning filtrist väljub puhas õhk. Elektrostaatilised sadestid nõuavad efektiivselt õhu puhastamiseks kõrgeid pingeid, mitmeid kilovolte. Võrreldes mehaanilise filtriga on elektrostaatiline filtri õhutakistus oluliselt väiksem ja vastavalt on vaja vähem võimsat ventilaatorit. Sellest tulenevalt on elektrostaatilised sadestid ka vaiksemad ja kompaktsemad kui näiteks HEPA filtritega õhupuhastid. Selliste filtrite efektiivsus sõltub elektriväljast ja ka õhust eemaldava osakese suurusel.

3.3.3 Ultraviolettkiirgusega puhastamine

Ultraviolettkiirguse (UV-kiirguse) “filter” on elektrostaatiline filtriga sarnane selle poolest, et õhk ei liigu läbi tiheda keskkonna, mis mängiks rolli õhuvoo vähenemises. Tööpõhimõte seisneb UV kiirguse võimel puhastatavas õhus kahjutuks teha mitmeid patogeene nagu bakterid ja viirused [17], [18]. Küll aga tuleks mainida, et UV kiirgusega viiruste paljunemisvõime hävitamine nõuab aega [19] ning see seab piirid õhuvoolu kiirusele. Sellisel moel ei ole

võimalik eemaldada õhust aerosoole ning efektiivseks õhu puhastamiseks oleks vaja kasutada täiendavaid meetmeid.

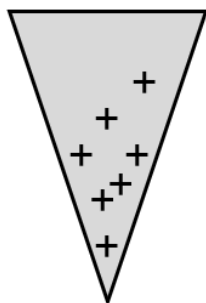
3.3.4 Aktiivsöefiltrid

Aktiivsüsi on süsinikul põhinev aine, millel on ülisuur arv väikseid poore. Sellest tulenevalt on aktiivsüsi väga suure pindala-ruumala suhtega. See võimaldab erinevatel saasteainetel kleepuda pooride seintele. Aktiivsöe filtrid eemaldavad õhust osakesi väga selektiivselt. Väga efektiivselt eemaldatakse erinevaid gaasiosakesi nagu näiteks lõhnad, osoon ja erinevaid lenduvaid orgaanilisi ühendeid [20]. Sellised filtrid aga ei suuda efektiivselt kinni püüda mikroorganisme (bakterid, viirused) [21] ja tahkeid osakesi nagu näiteks tolm [22].

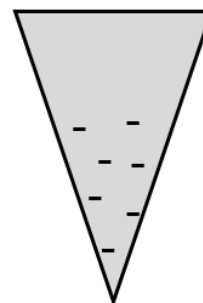
3.4 Koroonalahendus ja koroonatuul

Koroonalahendust eristab teistest gaaslahendustest [23] mittehomoogeense elektrivälja olemasolu teraviku või traatide ümbruses. See võimaldab lahenduse piirkonna lokaliseerida kõrgema elektriväljaga piirkonda, kus tekib ioone juurde. Koroonalahenduse rakenduste juures võidakse kasutada selle gaaslahenduse tüübi kahte iseloomulikku tulemit: toodetud ioonid ja kõrge energiaga elektronid. Tugevas elektriväljas tekkinud ionide omadused sõltuvad koroonalahenduse polaarsusest (positiivsed või negatiivsed ioonid) ning gaasist endast. Elektronide energiad sõltuvad samuti gaasist ning koroonalahenduse esile kutsumise meetodist. Koroonalahendust saab jaotada kaheks: positiivne ja negatiivne koroonalahendus (joonis 3). Nende kahe kategooria nimed tulenevad sellest, millise polaarsusega on tasapinnalise elektroodi vastas olev terava serva või tipuga elektrood (teravik) [16].

Positiivne koroonalahendus



Negatiivne koroonalahendus



Joonis 3. Teraviku ja tasapinnalise elektroodi laengud positiivse ja negatiivse koroonalahenduse korral.

Nii negatiivse kui ka positiivse koroonalahenduse puhul võivad õhus esimesed vabad (primaarsed) elektronid tekkida näiteks kosmilise või UV kiirguse tõttu. Positiivse koroonalahenduse puhul tekitab sekundaarelektrone koroonalahenduses tekkiv fotoioniseeriv kiirgus. Negatiivse koroonalahenduse puhul tekivad sekundaarelektronid teravikult kas fotoelektrilise efekti [24] tõttu või positiivse iooni pörkel teravikuga. Tekkinud sekundaarelektronid koguvad tugevas elektriväljas ionisatsiooniks piisava energia. Kuna elastsete põrgete energiaülekanne on masside erinevuse tõttu suur, siis elektron põrgetega energiat eriti ei kaota ja põrgete vahel energia järjest kasvab. Ioniseeriv elektron lööb õhu molekulist välja täiendava elektroni ning tekib elektronlaviini efekt, mis jätab maha positiivse laenguga ioone. Madalama energiaga elektronid võivad ka kleepuda õhu molekulide külge ning tekitada negatiivseid ioone. Teravikuga samamärgilised ioonid lükatakse teravikust eemale ning need pörkuvad neutraalsete molekulidega, andes neile liikumissuunalise impulsi – koroonatuul [16].

Uuringud ([25], [26]) on näidanud, et atmosfääri õhus tekitatud koroonalahendusega võib kaasneda osooni (O_3) tekkimine. Koroonalahenduse käigus kõrge energia saanud elektronid pörkavad kokku hapniku (O_2) molekulidega, mille käigus molekulid dissotseeruvad hapniku aatomiteks (O) (valem 1).



Tekkinud hapniku aatomid (O) on väga reaktiivsed ning ühinevad hapniku molekuliga (O_2), et moodustada osooni molekul (O_3) (valem 2).



M tähendab siin kolmandat keha, mis on vajalik impulsi jäävuse seaduse tagamiseks. Kuna osoon on tervisele kahjulik [5], siis on Euroopa Liit pannud osooni kokkupuutele piiranguks keskmiselt $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 8 tunni jooksul ühes päevas [7].

3.5 Puhta õhu tootmise kiirus (CADR)

Puhta õhu tootmise kiirus ehk CADR (inglise k. *Clean Air Delivery Rate*) on õhupuhasti efektiivsuse kirjeldamiseks enimlevinud kasutusele võetud karakteristik. Saaste osakeste kontsentratsioon $C(t)$ väheneb ajas eksponentsiaalselt, kui tekitada ruumi kindla õhuvoo kiirusega puhast õhku [27].

$$C(t) = C_0 e^{-kt} \quad (3)$$

Valemis 3 on C_0 algne eemaldavate osakeste kontsentratsioon ruumis ning k iseloomustab puhta õhu ruumi andmise kiirust. Suurus CADR sõltub suurusest k ja puhastatava ruumi ruumalast. Arvesse peab võtma ka saaste loomuliku eemaldumise.

$$CADR = (k_{\delta p} - k_l)V_{ruum} \quad (4)$$

Valemis 4 [27] on $k_{\delta p}$ õhupuhasti töötamisel puhta õhu ruumi andmise tegur, k_l on saaste loomuliku eemaldumise tegur ning V_{ruum} on puhastatava ruumi ruumala.

4 Eksperimentaalsed seadmed ja meetodid

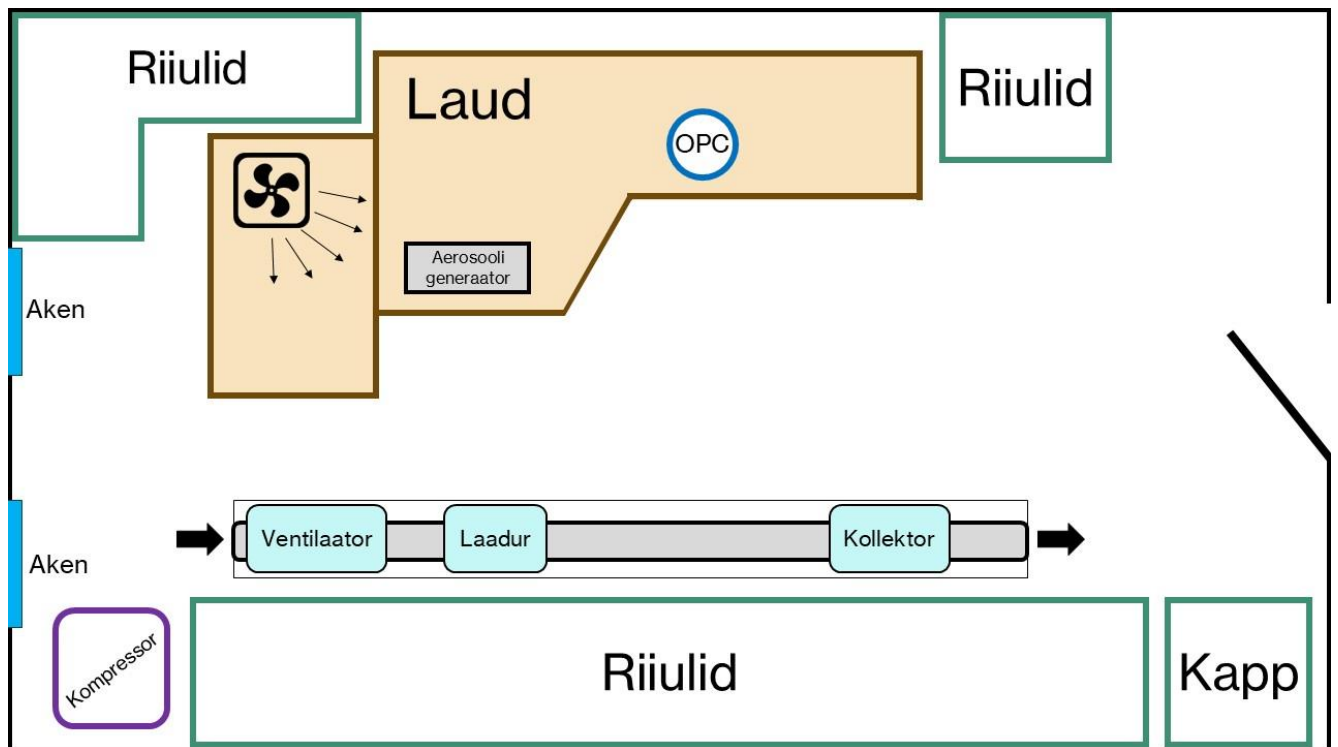
4.1 Eksperimentide keskkond

Antud magistritöö raames tehti koroonalahendusel põhineva õhupuhaõhustiga katseid Physicumis (W. Oswaldi 1, Tartu) ruumis D510, mis eraldati hoone üldisest ventilatsioonisüsteemist (joonis 4). Ruumi isoleerimine on oluline katsetatava seadme CADR võimekuse täpseks määramiseks. Kõik muu jäeti eksperimentaalruumis puutumata, et simuleerida võimalikult hästi igapäevast olukorda. Kabineti lihtsustatud skeem koos mööbli ja seadmete paigutusega on näidatud joonisel 5. Tasub mainida, et ruum ei olnud hoone ventilatsioonisüsteemist siiski täielikult isoleeritud – kabineti D510 ukse vahede kaudu oli ruum vähesel määral koridorile ja selle kaudu ka hoone ventilatsioonisüsteemile avatud. Eksperimendi ruumis käidi ukse kaudu sisse ja välja ainult mõõtmise sisse ja välja lülitamiseks. Mõõtmiste ajal eksperimendi ruumis ei viibitud.

Ruumis olev suhteline õhuniiskus varieerus väärtuste 28 % ja 42 % vahel ning temperatuur püsis erinevatel päevadel vahemikus 25 °C ... 29 °C. Õhuniiskuse ja temperatuuri mõju on lähemalt uuritud peatükis 5.7.1.



Joonis 4. Kabinet, kust tehti mõõtmisi. Kabineti eraldamine hoone ventilatsioonisüsteemist toimus ventilatsiooniavade katmise näol.



Joonis 5. Kabineti, kus eksperimente läbi viidi, lihtsustatud skeem.

4.2 Aerosoolide mõõtmine

4.2.1 Alphasense OPC-N3

Suuremas osas mõõtmistest kasutati aerosoolide loendamiseks ja suurusjaotuse leidmiseks optilist osakeste loendurit Alphasense OPC-N3, mis annab väljundina osakeste arvu kõrval ka suhtelise õhuniiskuse; temperatuuri; massikonsentratsiooni PM1, PM2,5 ja PM10 jaoks ning üle 5 minuti keskmistatud osakeste arvu PM1, PM2,5 ja PM10 jaoks. Valitud mõõteseade, mis on 1 sekundilise ajalise lahutusvõimega, suudab aerosooli osakesi loendada 24 erinevassuurusvahemikus (0,35 μm - 0,46 μm ; 0,46 μm - 0,66 μm ; 0,66 μm - 1 μm ; 1 μm - 1,3 μm ; ...) keskmiste väärtustega 0,41 μm , 0,56 μm , 0,83 μm , 1,15 μm ... 38,5 μm . Antud töös uuriti nelja kõige väiksemat suurusvahemikku, sest suuremaid osakesi registreeriti üksikuid.

4.2.2 FMPS TSI Model 3091

Veel väiksemate aerosoolide detekteerimiseks ja kontsentratsiooni leidmiseks kasutati FMPS (inglise k. *Fast Mobility Particle Sizer*) seadet TSI Model 3091. FMPS klassifitseerib osakesi suuruse järgi kasutades elektrilist liikuvust [28]. Aerosoolid juhitakse läbi laaduri ning seejärel läbi elektrivälja. Väiksemad osakesed (suurema liikuvusega) kalduvad elektriväljas rohkem kõrvale ning aerosoolid jaotuvad erinevatesse suurusvahemikesse. Antud töös kasutatud

mõõteseade andis väljundina 32 erineva suurusvahemiku kontsentratsiooni ($\#/cm^3$) iga 2 sekundi järel. Suurusvahemike keskmised väärtused olid 6,04 nm, 6,98 nm, 8,06 nm, 9,31 nm ... 523,3 nm. FMPS mõõteseade paigutati õhupuhasti väljundist umbes 1 meetri kaugusele (joonis 5).

4.3 Osooni mõõtmine

Osooni mõõtja põhines UV kiirguse neeldumisel. UV kiirguse allikana kasutati deuteeriumi lampi (Hamamatsu L2D2). Läätsega, mille fookuskaugus oli 50 cm, tekitati paralleelne kiirtekimp ning 55 cm järel koondati kiirgus OceanOptics4000 spektromeetrile. Neeldumisspekter registreeriti iga 123 sekundi tagant. Algselt registreeriti pimespekter ja lambi kiirgusspekter ilma kooronalahendusega õhupuhasti töötamiseta. Kontsentratsiooni määramiseks kasutati Beer-Lamberti seadust [29] (valem 5)

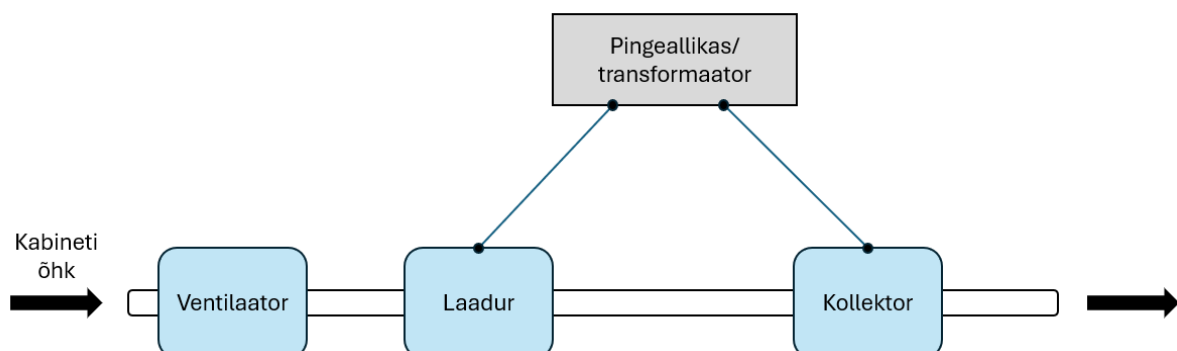
$$A = \varepsilon * c * l \quad (5)$$

, kus A on neelduvus, ε ($cm^2/molekul$) tähistab (osooni) neelduvuse ristlõike pindala, c ($molekuli/cm^3$) on kontsentratsioon ning l (cm) on optiline pikkus.

Sellise seadme tundlikkus oli ligikaudu 100 ppb (inglise k. *parts per billion*).

4.4 Koroonalahendusel põhinev õhupuhastusseade

Antud magistritöö raames tehti õhu puhastamise katseid kahe erineva koroonalahendusel põhineva prototüübiga. Mõlemad koosnesid ventilaatorist, laadurist ja kollektorist (joonis 6). Ainuke erinevus 2 prototüübi vahel seisnes laaduri ehituses. Lisaks tehti võrdluskatseid HEPA filtriga ja kommertsiaalse õhupuhastiga Winix Plasmawave.



Joonis 6. Koroonalahendusel põhineva õhupuhastusseadme komponendid.

Õhu puhastusseadmesse puhumiseks kasutati sisendis olevat kommertsiaalset ventilaatorit, mis puhus kabinetis oleva õhu läbi 100 mm läbimõõduga toru. Läbi puhasti liikuva õhu kiirust

väljundis mõõdeti kaussanemomeetriga, mis oli võimeline mõõtma alates kiirusest 1,3 m/s ($Q = 28 \text{ m}^3/\text{h}$). Mõõtmisi tehti kahel viisil: 1) kui väljundis oli kollektor (pingestamata), 2) kui väljundis oli HEPA filter. Eeldades turbulentsset voogu saab arvutada nendele kiirustele vastavad õhuvood valemiga (6).

$$Q = v_c \pi R^2 \quad (6)$$

, kus v_c on õhu liikumise kiirus ja R on toru raadius. Kahel viisil mõõdetud õhu liikumise kiirusele vastavad õhuvood on toodud tabelis 1. Antud tabelist on näha, et HEPA filter takistab õhu liikumist oluliselt rohkem kui kollektor. Katsetati ka laadurite mõju õhuvoole. Pingestamata laadurid õhuvoogu oluliselt ei mõjutanud.

Ventilaatori tase	1	2	3	4	5	6
HEPA filter väljundis Q (m ³ /h)	-	-	31	65	107	141
Kollektor väljundis Q (m ³ /h)	40	42	62	102	161	198

Tabel 1. Kolmel erineval viisil saadud õhuvood iga ventilaatori taseme jaoks.

Ventilaator puhus kabinetis oleva õhu läbi laaduri, mille tulemusena ioniseeriti õhumolekulid ning need omakorda põhjustasid aerosoolide laadumise. Laadunud aerosoolid kandusid õhuga edasi kollektorini, mis oli pingestatunud 4000 V-ni. Kollektor koosnes 32 üksteisega paralleelseltpaiknevast metallplaadist, mille kogu pindala oli 2.643 m² (joonis 7). Süsteemi väljund asus vahetult peale kollektorit.



Joonis 7. Koroonalahendusel põhineva õhupuhastusseadme kollektor.

4.4.1 Prototüüp I

Esimese prototüübi laadur koosnes positiivselt pingestatud elektroodi südamikust (22 mm läbimõõduga vasktoru) keskel ning kuuest süsiniku pintslist, mis käitusid kui katoodid (joonis 8). Laaduri pinget muudeti eksperimentide käigus vahemikus 1500 V ... 4500 V.



Joonis 8. Prototüüp I laadur paigaldatud toru sisse.

4.4.2 Prototüüp II

Teise prototüübi laaduri nii anoodiks kui ka katoodiks olid üksteisega paralleelselt paigutatud traadid, mis paiknesid plastmassist ringikujulisel raamil (joonis 9). Positiivse laenguga osakesi emiteeriv anood koosnes peenematest (65 % Ni + 17 % Cr + 18 % C) 64 µm läbimõõduga traatidest. Katood aga sisaldas paksemaid (molübdeen) traate. Anood ja katood paigutati kohakuti 100 mm läbimõõduga ventilatsioonitoru sisse ja nende vahekaugus oli 7 mm. Traatide pingestamisel tekkinud elektrivälja tekitab koroonatuule [30], mis varasemate mõõtmiste järgi ulatus kuni 0,5 m/s-ni. Hüpoteesiks võib seada, et tekitatud koroonatuul tõstab õhuvoo kiirust ning suurendab seekaudu ka puhastatud õhu hulka. Sellise laaduri pinget muudeti eksperimentide käigus vahemikus 5000 V ... 8000 V.



Joonis 9. Prototüübi II laaduri katoode (vasakul) ja anood (paremal).

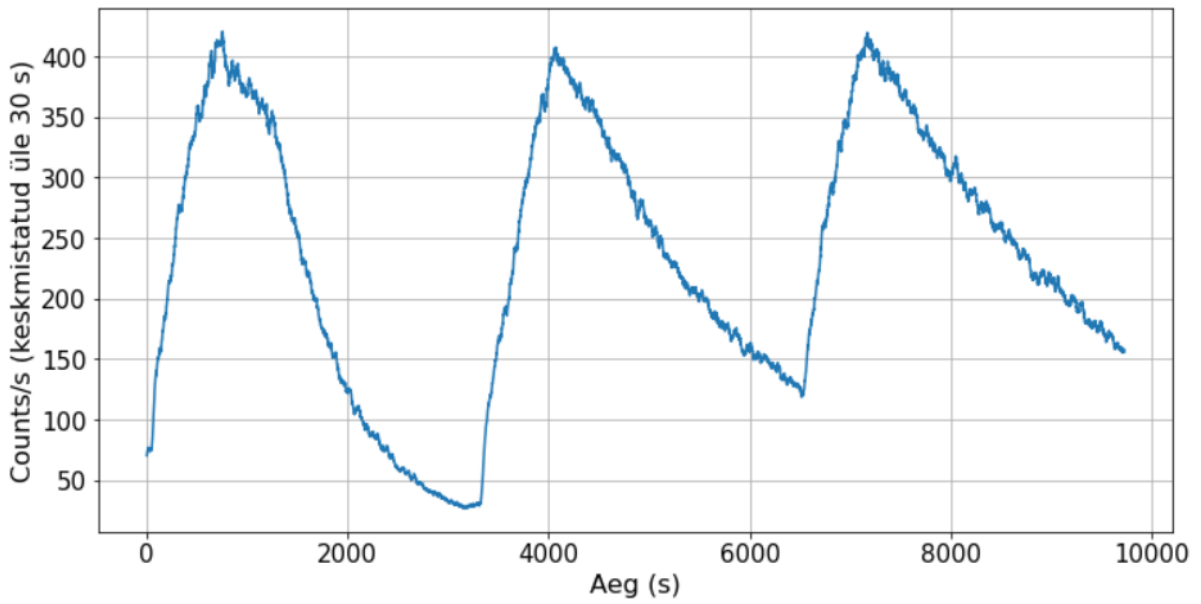
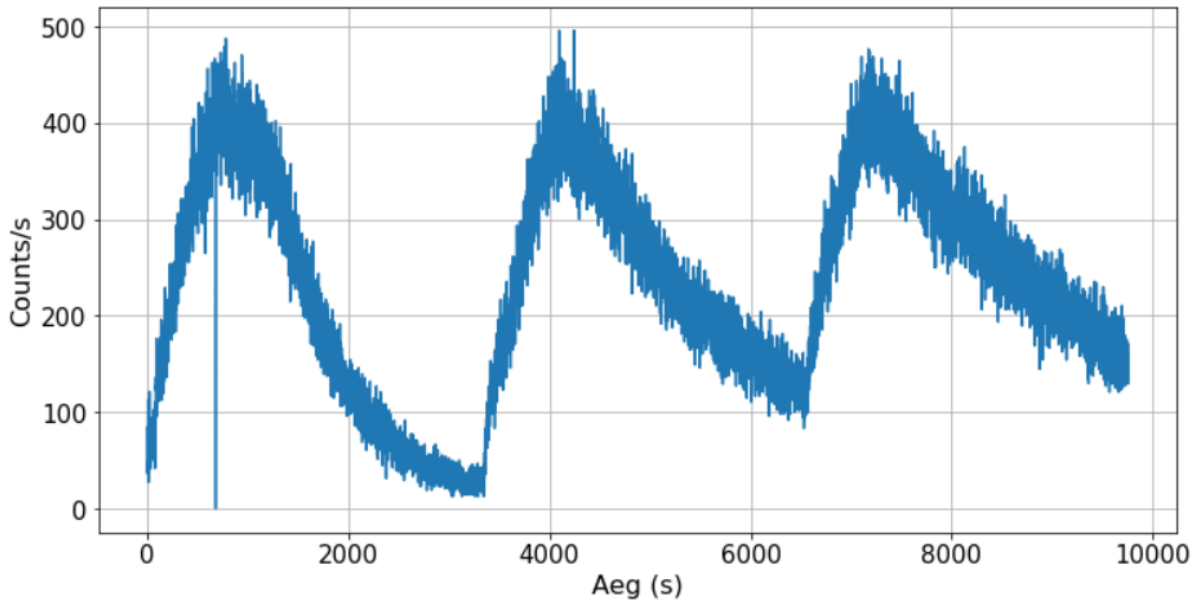
4.5 Eksperimendi kirjeldus

Kõik selle magistritöö raames tehtud eksperimendid toimusid Physicumi kabinetis D510. Enne igat õhupuhastusseadme sisselülitust genereeriti kabineti õhku testaerosooli. Selleks kasutati aerosoolide generaatorit Topas ATM 222, milles kasutati 2 % soolalahust, millele oli lisatud 10 tilka 3 μm lateksipalle. Genereerimise ajal jälgiti aerosoolide kogust Alphasense OPC-N3 abil ning generaator lülitati välja, olenevalt päevast, 5 – 12 min pärast sisselülitust. Selle ajaga näitas OPC 200 kuni 1000 lugemist sekundis. Aerosooli genereerimise varieeruvusest on pikemalt juttu peatükis 5.7. Pärast aerosooli generaatori väljalülitamist oodati paar minutit kuni aerosoolide koguse kasv peatus ning lülitati sisse õhupuhastusseade (koroonalahendusega seadme puhul tähendas see laaduri ja kollektori pingestamist ning ventilaatori sisse lülitamist). Õhu puhastamise ajal ei viibinud kabinetis ühtegi inimest ning üks puhastamise tsükkel kestis 35-45 minutit.

4.6 Andmetöötlus

Andmete töötlemiseks (peamiselt tähendab see CADR leidmist) ja visualiseerimiseks kasutati pythoni programmeerimise keelt. Toorandmed keskmistati üle 30 sekundi, et eemaldada müra (joonis 10). Pärast keskmistamist lähendati vastav mõõtepiirkond eksponentsiaalse kahanemise funktsiooniga, et leida kahanemise tegur k valemist (3), mille abil arvutati CADR.

CADR väärtus leiti nii kõikide detekteeritud aerosoolide jaoks kui ka erinevate Alphasense OPC-N3-e poolt detekteeritud suurusvahemike jaoks. Iga uuritava suurusvahemiku jaoks leiti saaste loomuliku eemaldamise tegur k_l (valem 4) eraldi (täpsemalt kirjeldatud peatükis 5.1).

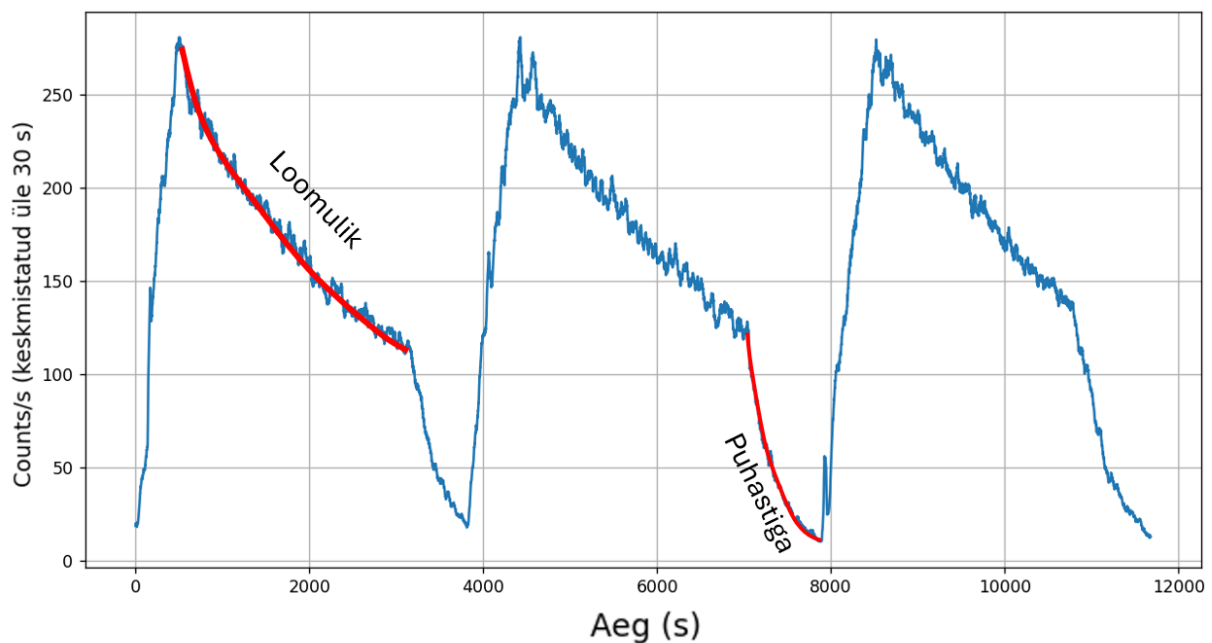


Joonis 10. Ühe mõõteseria graafiku näide. Toorandmed (üleval) ja üle 30 s keskmistatud andmed (all).

5 Tulemused ja arutelu

5.1 Saaste loomuliku eemaldumise teguri k_l leidmine

Teguri k_l (valem 4) leidmiseks tõsteti aerosoolide kontsentratsiooni aerosooli generaatoriga kuni OPC detektor näitas umbes 250 counts/s. Seejärel lasti aerosoolidel ilma mingi seadme abita umbes 40 minutit (loomulikult) õhust eemalduda. Pärast seda lülitati sisse kommertsiaalne õhupuhasti Winix Plasmawave, mis töötas umbes 10 min. Sellist seeriat tehti 3 korda, kusjuures OPC detektori asukoht kabinetis oli igal korral erinev (laua peal, ukse kõrval ja akna laua peal). Sellistes tingimustes aerosoolide ajalise evolutsiooni on näha joonisel 11, kus on selgelt näha nii aerosoolide loomulik kadumine, puhastiga eemaldamine ja juurde genereerimine.



Joonis 11. Aerosoolide ajaline evolutsioon - loomulik kadumine ja kommertsiaalne õhupuhasti.

Tegur k_l leiti nii integreeritud aerosoolide kontsentratsiooni jaoks kui ka iga uuritava suurusvahemiku jaoks eraldi. Kolmese mõõtmisseriesa käigus leitud väärtuste keskmised koos statistilise standardhõlbega on toodud tabelis 2.

Osakese keskmine suurus	0,41 μm	0,56 μm	0,83 μm	1,15 μm	Integreeritud
Loomuliku eemaldumise tegur k_l (1/h)	1,04 +/- 0,08	1,30 +/- 0,16	1,30 +/- 0,16	1,37 +/- 0,32	1,12 +/- 0,8

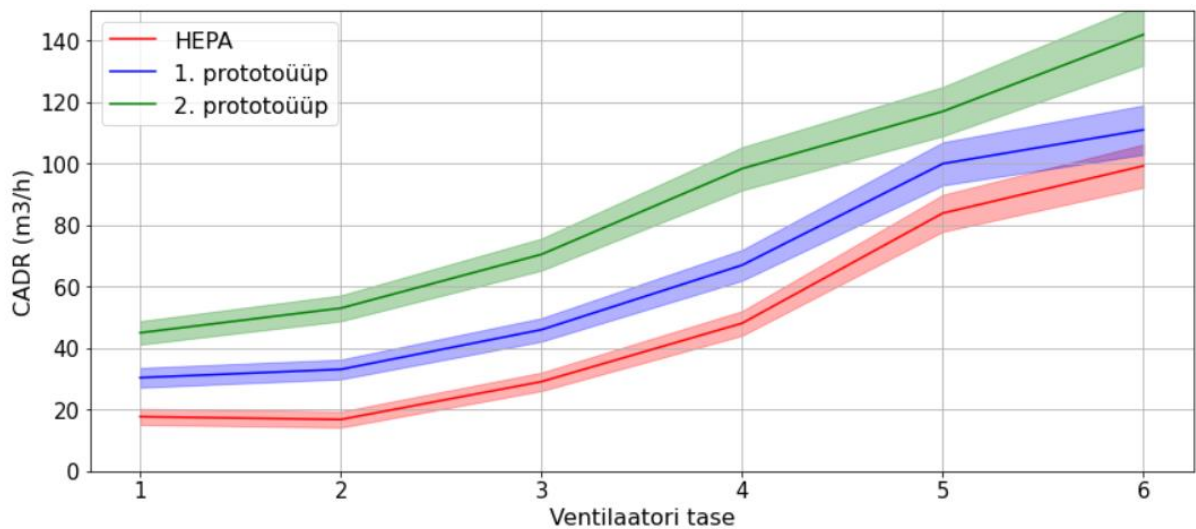
Tabel 2. 4 väikseima OPC poolt mõõdetud suurusvahemiku loomuliku eemaldumise tegurid ja integreeritud loomuliku eemaldumise tegur.

Õhupuhasti puhta õhu ruumi andmise teguri $k_{\delta p}$ määramatused on leitud pythoni teegi *scipy* funktsiooni *scipy.optimize.curve_fit* abil, mis kasutab vähimruutude meetodit.

5.2 HEPA filtri võrdlus prototüübiga I ja II

HEPA filtri võrdlemisel koroonalahendusel põhinevate filtritega tehti katseid sama süsteemiga (ventilaator-toru-filter süsteem), millel vahetati ainult filtrit. Muutujaks võeti ventilaatori töötamise võimsus, mida sai muuta seadme skaalal 1 – 6 (10 – 40 W) ja vastavalt muutus õhuvoo kiirus. Prototüübiga I katsetades olid nii laaduri kui ka kollektori pingete väärtused 4 kV. Prototüübiga II tehtud katsete käigus püsis laaduri pinge 8 kV ning kollektori pinge 4 kV väärtuse juures. Joonisel 12 on näha CADR väärtused kõigi 3 filtri puhul igal ventilaatori tasemel. Selgelt on näha, et sõltumata ventilaatori tasemest on HEPA filtri CADR väiksem kui koroonalahendusel põhinevate filtrite CADR. HEPA filter on õhuvoole suuremaks takistuseks (tabel 1), mis ilmselt mõjutab selle CADR väärtusi. Võib ka järeldada, et prototüüp II on prototüübist I efektiivsem. Siinkohal võib hüpoteesiks seada, et koroonatuule efekt, mida prototüübi I puhul ei teki, võib tulemusi mõjutada. Meie poolt kasutatud prototüübiga on varasemalt mõõdetud ioontuule kiirused väärtusteni 0,5 m/s, mis vastab õhuvoole 14 m³/h (valem 6).

Kõigil juhtudel jäi integraalne aerosoolide eemaldamine mõõdetud õhuvoo kiirusest oluliselt väiksemaks (tabel 1). Selle põhjusena võib hüpoteesina tuua erineva läbimõõduga osakeste jaoks erineva eemaldamise (erinev CADR väärtus). Antud kontekstis võrreldi CADR väärtusi ka erinevate suurusvahemike jaoks. Suuremate osakeste korral on CADR väärtus märgatavalt suurem ja ulatub 200 m³/h juurde ehk on võrreldav õhuvoo kiirusega seadme väljundis elektrostaatilist filtrit kasutades. Need graafikud on toodud peatükis „Lisad“.

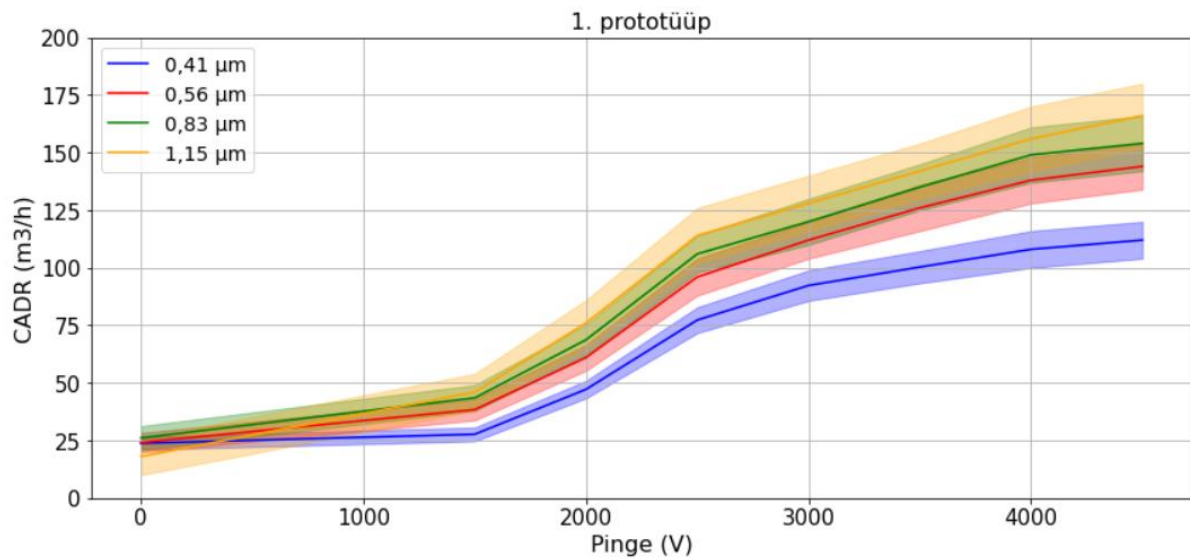


Joonis 12. HEPA filtri, prototüübi I ja prototüübi II CADR sõltuvus ventilatori tasemest.

5.3 CADR sõltuvus laaduri pingest

5.3.1 Prototüüp I

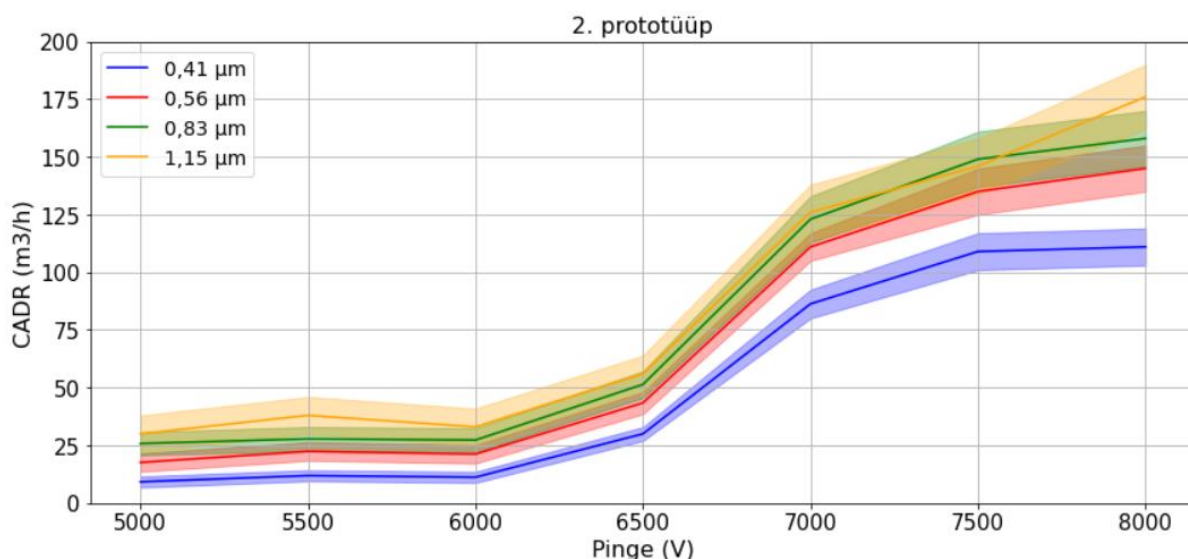
Positiivselt pingestatud südamikust ja negatiivselt pingestatud süsiniku pintslitest koosneva laaduri pinget muudeti vahemikus 1500 V ... 4500 V astmega 500 V. Veel suurema pinge korral on suur tõenäosus läbilöögi tekkimiseks. Ventilatori tase oli püsivalt 6 (maksimum). CADR väärtused 4 erineva suurusvahemiku jaoks on toodud joonisel 13. Uurimise alla võeti 4 kõige väiksemat suurusvahemikku, sest nende puhul oli detekteeritud osakeste arv kõige suurem. Suuremaid osakesi ($> 1,15 \mu\text{m}$) detekteeriti vahetult enne puhasti sisse lülitamist (maksimaalne aerosoolide arv) alla 10 osakese sekundis. Jooniselt on näha, et aerosoolide laadumine algab 1500 V juures ning laaduri pinge kasvamisel CADR väärtuse kasv pidurdub. $0,41 \mu\text{m}$ suuruste aerosoolide CADR väärtus jääb selgelt väiksemaks kui suuremate aerosoolide oma. Lisaks võib täheldada, et kõige väiksemate detekteeritud osakeste eemaldamise efektiivsus pidurdub kiiremini kui suuremate osakeste puhul. Integreeritud suuruste jaoks on sama graafik toodud peatükis „Lisad“.



Joonis 13. Laaduri pinget ja CADR sõltuvus erineva suurusega osakeste jaoks prototüübi I puhul.

5.3.2 Prototüüp II

Kahest erineva läbimõõduga traatidest koosneva laaduri pinget muudeti vahemikus 5000 V ... 8000 V astmega 500 V. Varasematest katsetest on järeldatud, et 8000 V-st kõrgemate pingete juures võib tekkida läbilöökk. Ventilaatori tase oli püsivalt maksimaalne ehk 6. Sarnaselt prototüübi I puhul ja samadel põhjustel näidatakse ka siin CADR väärtusi 4 kõige väiksemasse OPC poolt detekteeritud suurusvahemikku mahtuvate osakeste jaoks. Joonisel 14 on näha, et aerosoolide laadumine algab 6000 V juures ning pinget kasvamisel üle 7000 V CADR kasv pidurdub. 0,56 µm, 0,83 µm ja 1,15 µm (suurusakente keskmised väärtused) suuruste osakeste CADR väärtused ei ole ühegi laaduri pinget väärtuse juures kindlalt eristatavad. Ka prototüüp II puhul jääb 0,41 µm suuruste aerosoolide CADR selgelt väiksemaks suurtemate aerosoolide omast. Integreeritud suuruste jaoks on sama graafik toodud peatükis „Lisad“.



Joonis 14. Laaduri pinge ja CADR sõltuvus erineva suurusega osakeste jaoks prototüübi II puhul.

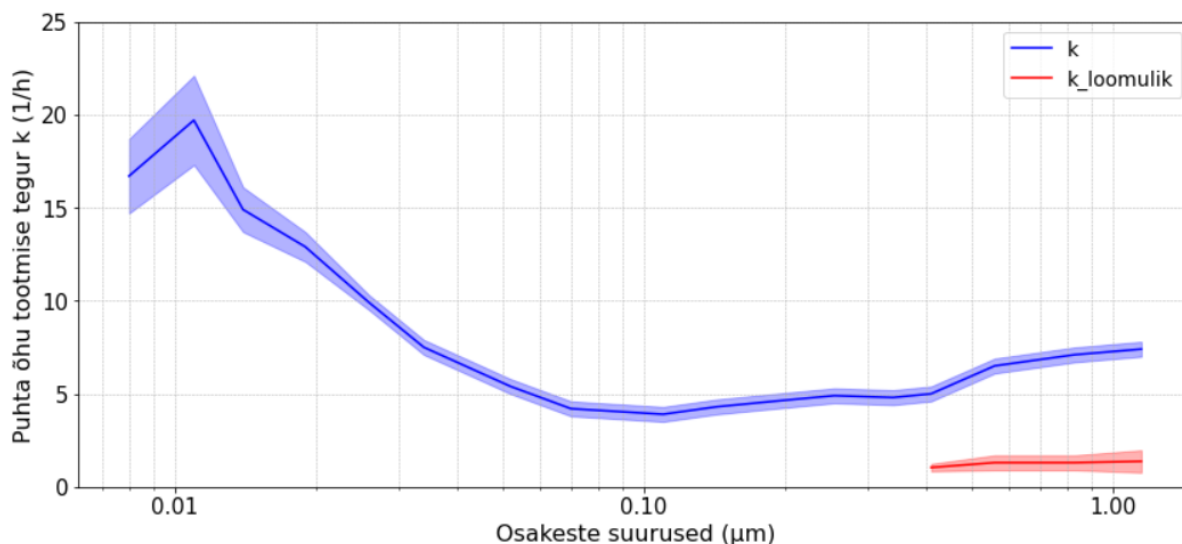
5.4 FMPS mõõtmised

FMPS mõõteseadmega katsete eesmärk oli näha kui efektiivselt on võimaline uuritav koroonalahendusel põhinev õhupuhasti eemaldama $< 0,41 \mu\text{m}$ (OPC alumine piir) osakesi. FMPS-iga eksperimendi käigus oli uuritavas suuruses osakeste loomuliku eemaldumise tegur (k_l valemist 4) tunduvalt suurem võrreldes OPC tulemustega (tabel 3). Arvatakse, et loomuliku eemaldumise mõõtmisel töötas õhupuhasti ventilaator, sest k_l väärtus tuli sarnaste suurustega aerosoolide jaoks FMPS ja OPC-ga mõõtmiste puhul erinev.

Osakese keskmine suurus	0,41 μm	0,45 μm	0,56 μm
Loomuliku eemaldumise tegur k_l (1/h) (OPC)	1,04 +/- 0,08	-	1,30 +/- 0,16
Loomuliku eemaldumise tegur k_l (1/h) (FMPS)	-	1,71 +/- 0,14	-

Tabel 3. Loomuliku eemaldumise tegur 3 aerosooli suuruse jaoks. 0,41 μm ja 0,56 μm on mõõdetud OPC-ga. 0,45 μm jaoks on mõõdetud FMPS-ga.

Ekspriimentide käigus õnnestus mõõta puhta õhu tootmise tegur k (valem 3) erineva suurusega aerosoolide jaoks. Selliseid mõõtmisi tehti prototüübiga II (ventilaatori tase 6, laadur 8 kV ja kollektor 4 kV). Tulemused on toodud joonisel 15.

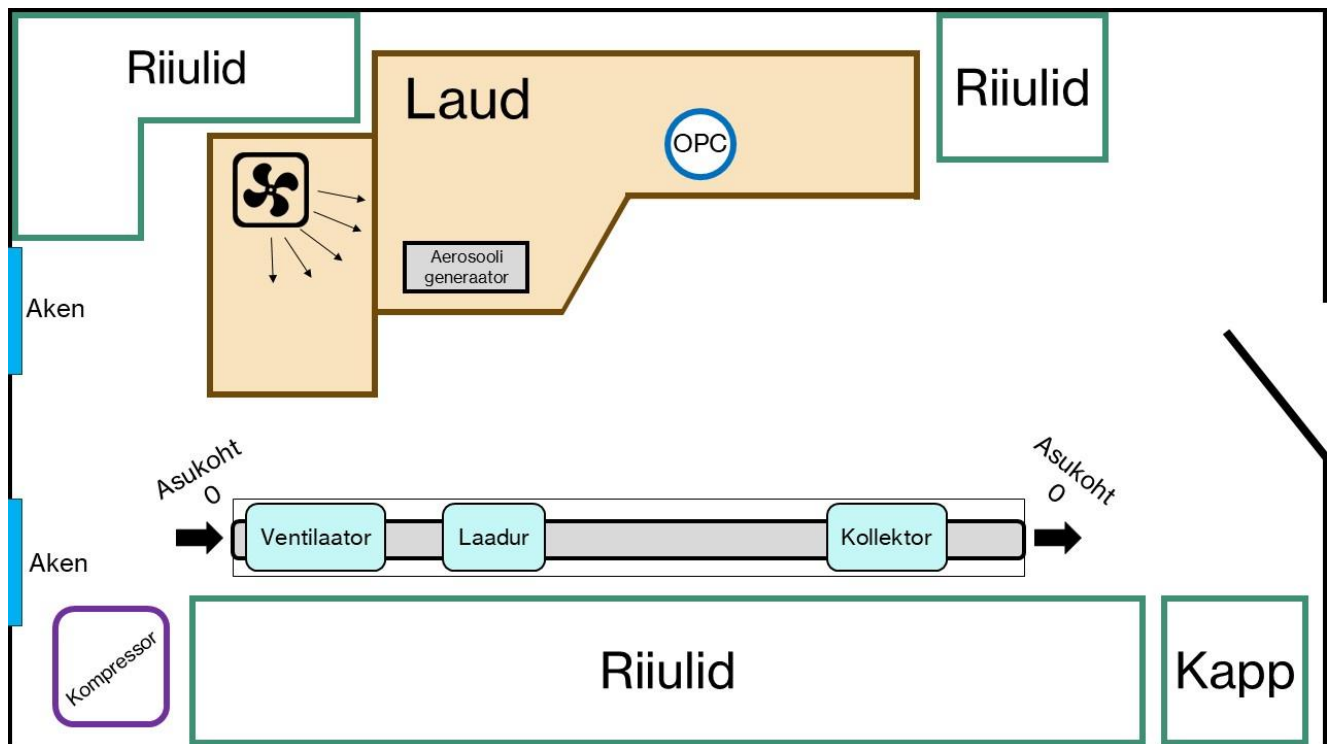


Joonis 15. FMPS ja OPC-ga mõõdetud prototüübi II puhta õhu tootmise tegur k erinevate aerosoolide suuruste jaoks (sinine). OPC-ga mõõdetud aerosoolide loomuliku eemaldumise tegur k_l erinevate aerosoolide suuruste jaoks (punane).

Joonis 15 illustreerib kui suur osa puhta õhu tootmisest on aerosoolide loomulikus eemaldumises õhust ning kui suur osa on õhupuhasti teha (osakeste suurus $0,41 \mu\text{m} \dots 1,15 \mu\text{m}$). Võib arvata, et prototüüp II on võimeline eemaldama õhust ka väiksemaid osakesi kui $0,41 \mu\text{m}$, sest ei ole põhjust arvata, et k_{loomulik} (k_l) muutuks järsult võrdseks k -ga väiksemate osakeste puhul. Võib seada hüpoteesiks, et väga väikeste osakeste puhul ($k > 8$) võib olla tegur k_{loomulik} (k_l) suurem. Õhuvoost tulenevate piirangute tõttu (ca $200 \text{ m}^3/\text{h}$) on prototüüp II maksimaalne k väärtuse panus umbes 7 1/h .

5.5 Õhupuhasti sisendi ja väljundi asukoha sõltuvus

Katseid, kus muudeti õhupuhastusseadme sisendi ja väljundi asukohta, tehti prototüübiga II ning OPC detektori asukoht laua pealt ei muutunud. Kui asukohta muutust ei ole mainitud, siis sisend ja väljund olid asukohas 0 (joonis 16). Tulemused erinevate suurusvahemike jaoks on toodud tulpdiagrammina joonisel 17. Tabelis 4 on toodud üle terve suurusjaotuse integreeritud CADR väärtused ning seal on näha arvestatavat CADR väärtuse vähenemist, kui sisend asetada ukse juurde. Õhu liikumine ruumis oli ka ventilaatorit kasutades piiratud ja seetõttu jõudis aerosoolidega õhk ukse juurde halvemini. Veel väiksema CADR väärtuse saavutanud olukorras, kus sisend oli lae all, võis rolli mängida gravitatsioon, mida ruumi õhu segamiseks kasutatud ventilaator nii hästi kompenseerida ei suutnud. Sisendi lae alla viimiseks kasutati painduvat ventilatsioonitoru, mis võis samuti panustada õhuvoo vähenemisesse. Esimese kolme olukorra (väljund laua all, väljund ukse juures ja sisend laua all) puhul ei tundu suurt erinevust olevat.

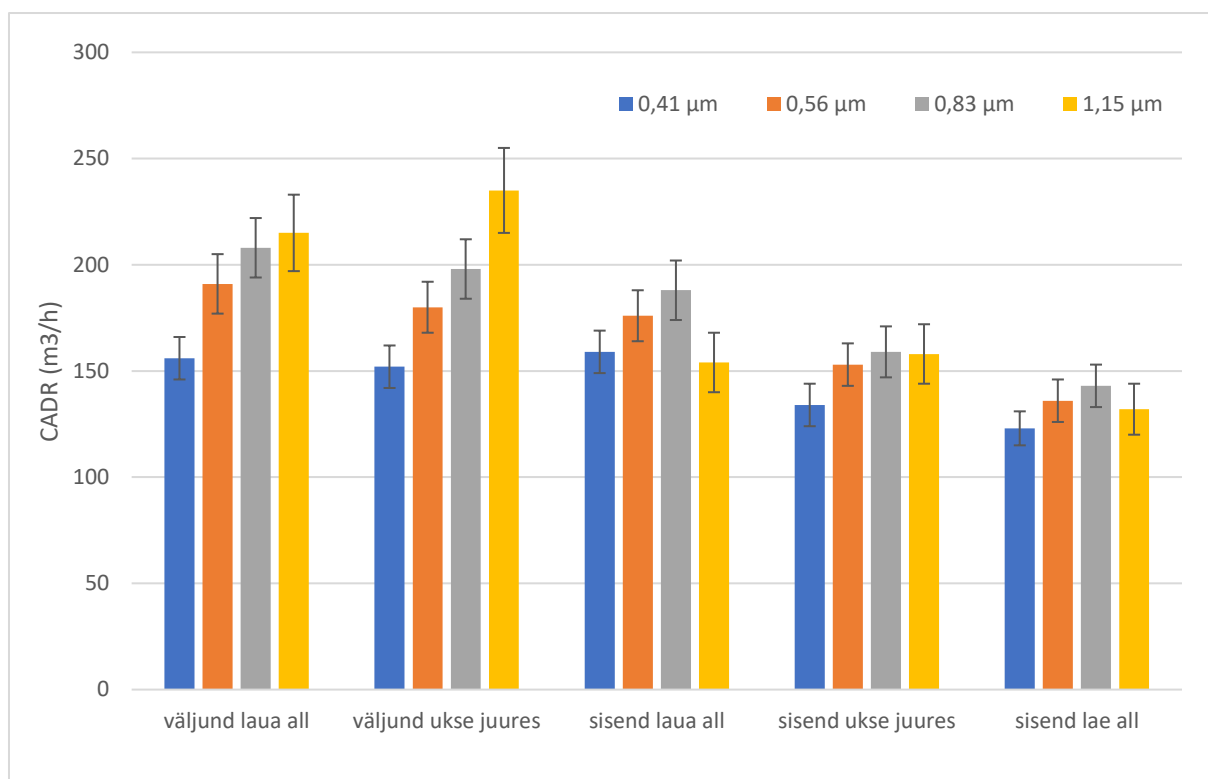


Joonis 16. Kabineti, kus eksperimente läbi viidi, lihtsustatud skeem ja asukohad 0.

Asukoht	CADR (m ³ /h)
Väljund laua all	164 +/- 12
Väljund ukse juures	158 +/- 12
Sisend laua all	163 +/- 12
Sisend ukse juures	139 +/- 10
Sisend lae all	126 +/- 8

Tabel 4. Koroonalahendusel põhineva õhupuhastusseadme prototüübi II katsed, kus on muudetud sisendi ja väljundi asukohti.

Tulpdiagrammi (joonis 17) vaadates võib täheldada, et erinevate asukohtade puhul muutub kõige suuremate osakeste (1,15 µm) CADR väärtus tunduvalt rohkem kui kõige väiksemate osakeste (0,41 µm) CADR väärtus. Seda võib põhjustada suurte osakeste suurem inerts ning väikeste osakeste võime liikuda paremini mööda õhuvoolu jooni. Viimast illustreerib hästi „sisend laua all“ olukord, kus kõige suuremate osakeste CADR väärtus on kõige madalam. Gravitatsiooni mõju [32] on näha kui võrrelda 1,15 µm osakeste CADR väärtusi „sisendi asukoht 0“ (2 vasakpoolsemat) ja „sisend lae all“ olukordi.

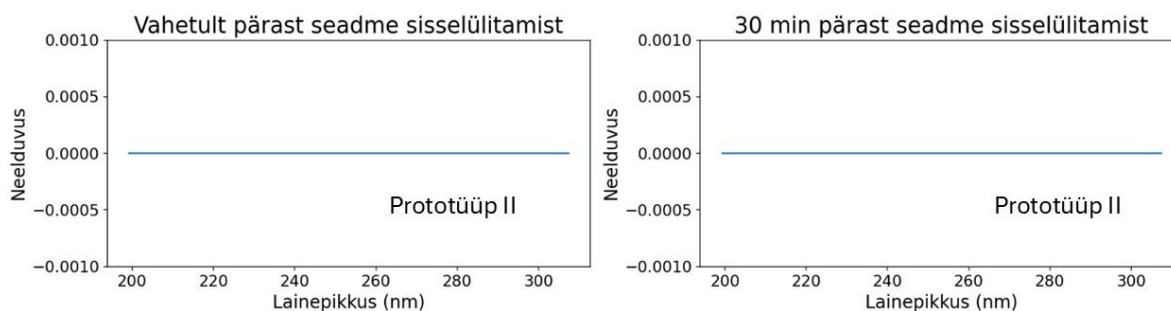


Joonis 17. Koroonalahendusel põhineva õhupuhastusseadme prototüübi II katsed, kus on muudetud sisendi ja väljundi asukohti.

Uurimistöö käigus on pidevalt täheldatud, et suuremate aerosoolide CADR väärtus on suurem kui väiksemate, näiteks 0,41 μm suuruste osakeste puhul. Artiklis [31], kus uuriti NaCl aerosoolide laadumist, leiti, et suuremad osakesed (1,13 μm) koguvad rohkem ioone kui väiksemad (0,44 μm). See tulemus aitab seletada ka meie tulemustes täheldatud suuremate aerosoolide kõrgemaid CADR väärtusi.

5.6 Osooni tootlikkus

Antud töö raames kasutatud osooni mõõteseadme tundlikkuse piir on ligikaudu 100 ppb. Kuna osooni UV neeldumise ulatus on vahemikus 200 – 300 nm (max umbes 254 nm) [33], siis uuriti neeldumist just selles vahemikus. Osooni mõõtmise tulemused on toodud joonisel 18.



Joonis 18. Osooni UV neelduvus vahetult pärast seadme sisselülitamist ja 30 min pärast seadme sisselülitamist (prototüüp II).

Jooniselt on selgelt näha, et 100 ppb tundlikkusega mõõteseade osooni ei tuvastanud. Seega jääb osooni tootlikkus alla 100 ppb. Osooni ei tuvastatud ka prototüübi I puhul.

5.7 Määramatust mõjutavad tegurid

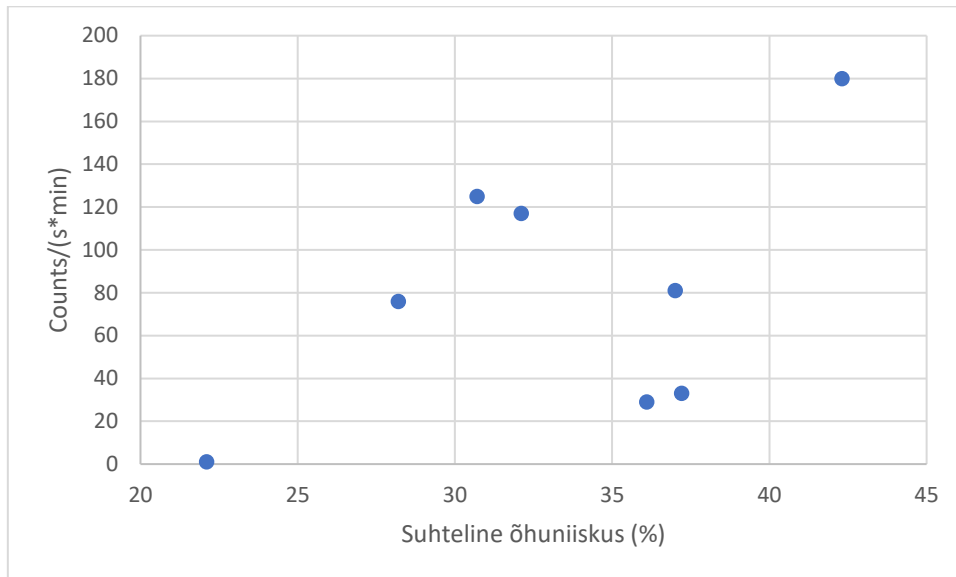
5.7.1 Aerosoolide algkonsentratsiooni varieeruvus

Eksperimentide tegemise käigus hakkas silma, et aerosoolide genereerimise kiirus varieerub päeviti märgatavalt. Erinevatel päevadel kasvas 1 minuti jooksul OPC kontsentratsiooni näit (*counts/s*) erinevate väärtusteni. Eksperimentide protokollide ja aerosoolide detektori lugemite abil sai arvutada erinevate päevade aerosooli kontsentratsiooni kasvu kiirused ($\frac{\text{counts}}{\text{s} \cdot \text{min}}$), mis on toodud tabelis 5. Samas tabelis on toodud ka suhteline õhuniiskus (RH, inglise k. *relative humidity*) ja temperatuur (mõlemad OPC-N3 poolt mõõdetud), mis võisid aerosooli genereerimist mõjutada.

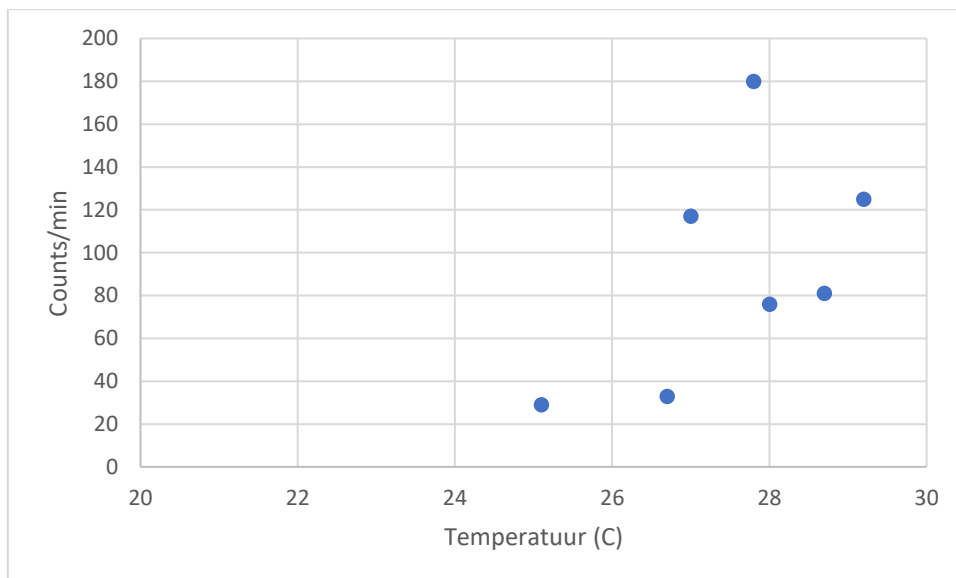
Kuupäev	Counts/(s*min)	RH (%)	T (°C)
01.04.2024	29	36.1	25.1
20.05.2024	76	28.2	28
27.05.2024	81	37	28.7
03.06.2024	180	42.3	27.8
10.06.2024	117	32.1	27
04.10.2024	125	30.7	29.2
11.10.2024	33	37.2	26.7

Tabel 5. Erinevatel mõõtmiste sooritamise kuupäevadel leitud aerosoolide kontsentratsiooni kasvamise kiirused ning registreeritud suhtelised õhuniiskused ja temperatuurid.

Graafikute 19 ja 20 põhjal oluline seos suhtelise aerosoolide kontsentratsiooni kasvu ning õhuniiskuse või temperatuuri vahel puudus ja seega nad olulist rolli aerosoolide kasvu kiiruses ei mängi.



Joonis 19. Aerosoolide kontsentratsiooni kasvamise kiiruse sõltuvus õhuniiskusest.



Joonis 20. Aerosoolide kontsentratsiooni kasvamise kiiruse sõltuvus temperatuurist.

Tabelis 6 on toodud samadel tingimustel (prototüüp I, ventilaator tase 6, laadur 4 kV, kollektor 4 kV) saadud CADR väärtused, kus erines eemaldavate aerosoolide algkontsentratsioon. Tabelis olevate andmete võrdlemisel võib järeldada, et aerosoolide algkontsentratsioon ei mõjuta oluliselt saadud CADR väärtust, sest kõik 3 väärtust ühtivad määramatuse piires.

Puhastatava õhu algne aerosoolide kontsentratsioon (<i>counts/s</i>)	CADR (m ³ /h)
400	118 +/- 8
700	111 +/- 8
700	120 +/- 8

Tabel 6. Prototüübiga I (vent 6, laadur 4 kV, kollektor 4 kV) saadud CADR väärtused erineva aerosooli algkontsentratsiooni korral.

5.7.2 Aerosoolide genereerimise lahus

Üheks põhjuseks, miks aerosoolide kontsentratsiooni kasvamise kiirus erines, võib pidada NaCl lahust, mida kasutati aerosoolide genereerimiseks. Eelviimasel eksperimenteerimise päeval kasutati võrdlemisi vana lahust, millest genereeritud aerosoolide kontsentratsioon oli antud kontekstis väga madal (ei ületanud väärtust 50 *counts/s*). Järgmisel eksperimenteerimise päeval kasutati värsket lahust ning kontsentratsiooni kasv oli oluliselt kiirem. OPC lugemi näit enne aerosoolide generaatori sisselülitamist oli iga päev mõnikümmend lugemit sekundis (sõltuvalt päevast u 10 – 50 *counts/s*).

6 Kokkuvõte

Käesolevas magistritöös uuriti koroonalahendusel töötava õhupuhasti efektiivsust realistlikes tingimustes – mööbliga kabinetis, kus erinevatel mõõtmispäevadel varieerus temperatuur ja õhuniiskus. Uuritav õhupuhasti koosnes laadurist ja kollektorist. Katseid tehti kahe erineva prototüübiga, mis erinesid koroonalahendust esile kutsuva laaduri poolest. Eesmärgi saavutamiseks tehti eksperimente, kus uuritava õhupuhastiga eemaldati eelnevalt õhku genereeritud soolalahuse aerosoole. Eksperimentide käigus muudeti erinevaid tegureid – õhupuhastisse sisenevat õhuvoogu (ventilaatori kiirust), laaduri pinget ning puhasti sisendi ja väljundi asukohti. Lisaks uuriti ka erineva suurusega aerosoolide (kuni 1,15 µm) eemaldamist ja osooni tootlikkust.

Koroonalahendusel töötavate filtrite võrdlemisel HEPA filtriga näidati, et uuritav elektrostaatiline sadesti puhastab genereeritud aerosoole efektiivsemalt kui HEPA filter. Lisaks oli näha, et prototüüp II oli efektiivsem kui prototüüp I. Hüpoteesina väideti, et selles mängis rolli koroonatuule efekt. Kahe laaduri pinge ja CADR sõltuvust uurides nähti sarnast käitumist – CADR väärtuse kasv pidurdub ning graafikul tekib „plato“. Seega on mõlemal laaduril mingi pinge väärtus, mida ületades CADR väärtus oluliselt enam ei parane. Suurema diameetriga osakeste korral ulatus see väärtus ventilaatori poolt tekitatud õhuvoo kiirusteni ehk filtris eemaldati peaaegu kõik osakesed. Õhupuhastusseadme sisendi ja väljundi asukoha muutmisel nähti erinevusi suuremate ja väiksemate osakeste jaoks. Erinevusi võib selgitada osakeste inerts, mis sõltub nende suurusest. Osooni tootlikkus jääb mõlema prototüübi puhul alla 100 ppb. Väiksemate kui 0,41 µm aerosoolide eemaldamise efektiivsuse kohta kindlaid järeldusi teha ei saa. Siiski on põhjust arvata, et prototüüp II on võimeline eemaldama ka < 0,41 µm aerosoole.

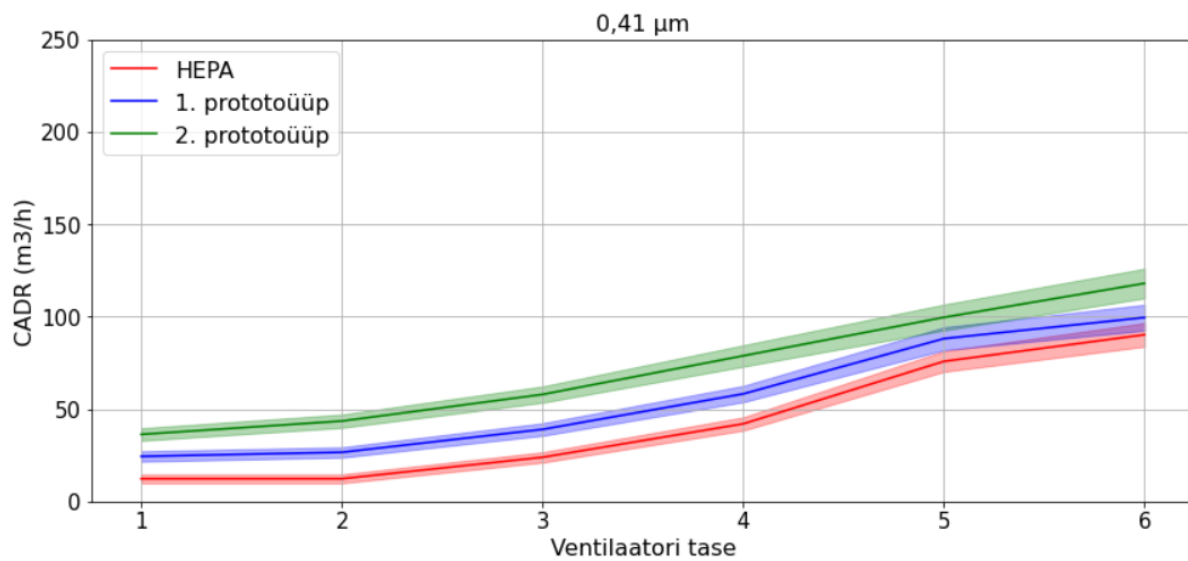
Kokkuvõtteks võib öelda, et magistritööle seatud eesmärk sai täidetud. Katsetatav koroonalahendusel põhinev õhupuhasti on efektiivne seade õhu puhastamiseks ja seadmel on potentsiaal reaalsesse kasutusse jõuda.

7 Kasutatud kirjandus

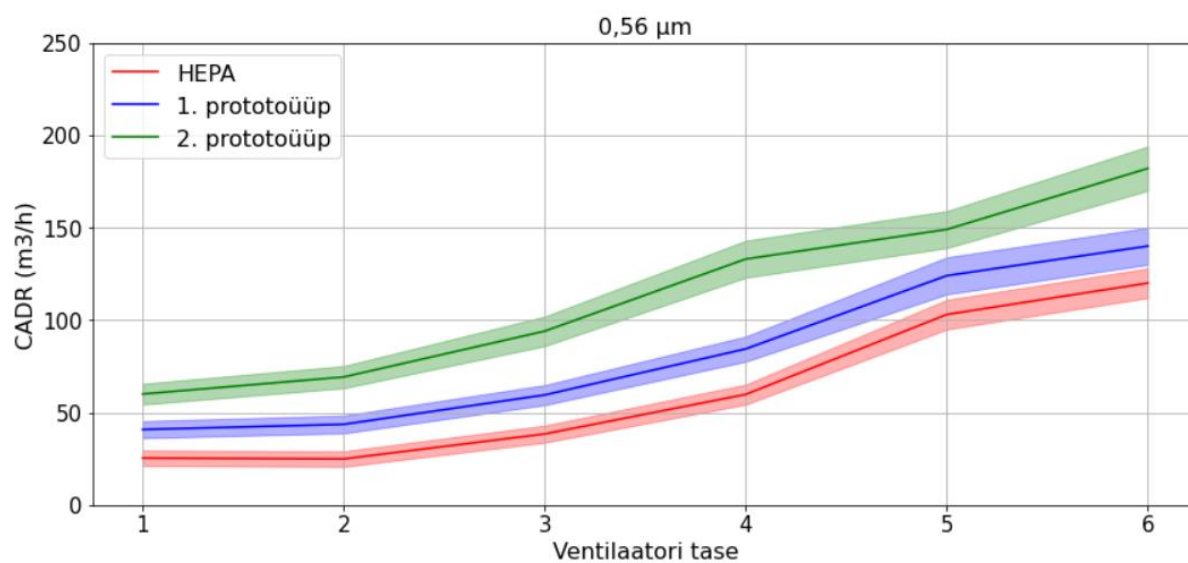
- [1] M. Shiraiwa *et al.*, “Aerosol Health Effects from Molecular to Global Scales,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 51, no. 23, pp. 13545–13567, Dec. 2017, doi: 10.1021/acs.est.7b04417.
- [2] L. Miller and X. Xu, “Ambient PM_{2.5} Human Health Effects—Findings in China and Research Directions,” *Atmosphere*, vol. 9, no. 11, p. 424, Oct. 2018, doi: 10.3390/atmos9110424.
- [3] P. V. Hobbs, *Introduction to Atmospheric Chemistry*. Cambridge University Press, 2000.
- [4] E. Tamm, “Atmosfääri- ja keskkonnafüüsika laborid: aerosooliosakeste allikad atmosfääris.” Accessed: Jan. 21, 2025. [Online]. Available: https://meteo.physic.ut.ee/kkfi/index_files/huvilisele/aerosoolid/aerosooliosakeste_allikad.html
- [5] C. A. Pope and D. W. Dockery, “Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect,” *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 56, no. 6, pp. 709–742, Jun. 2006, doi: 10.1080/10473289.2006.10464485.
- [6] W. Chen and D. W. Fryrear, “Aerodynamic and Geometric Diameters of Airborne Particles,” *J. Sediment. Res.*, vol. 71, no. 3, pp. 365–371, May 2001, doi: 10.1306/2DC4094A-0E47-11D7-8643000102C1865D.
- [7] “EU air quality standards - European Commission.” Accessed: Jan. 22, 2025. [Online]. Available: https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality/eu-air-quality-standards_en
- [8] R. Tellier, “Review of Aerosol Transmission of Influenza A Virus,” *Emerg. Infect. Dis.*, vol. 12, no. 11, pp. 1657–1662, Nov. 2006, doi: 10.3201/eid1211.060426.
- [9] I. T. S. Yu *et al.*, “Evidence of Airborne Transmission of the Severe Acute Respiratory Syndrome Virus,” *N. Engl. J. Med.*, vol. 350, no. 17, pp. 1731–1739, Apr. 2004, doi: 10.1056/NEJMoa032867.
- [10] L. Fan and S. Liu, “Respirable nano-particulate generations and their pathogenesis in mining workplaces: a review,” *Int. J. Coal Sci. Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 179–198, Apr. 2021, doi: 10.1007/s40789-021-00412-w.
- [11] N. Van Doremalen *et al.*, “Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1,” *N. Engl. J. Med.*, vol. 382, no. 16, pp. 1564–1567, Apr. 2020, doi: 10.1056/NEJMc2004973.
- [12] K. Ito and S. Zhang, “Willingness to Pay for Clean Air: Evidence from Air Purifier Markets in China,” *J. Polit. Econ.*, vol. 128, no. 5, pp. 1627–1672, May 2020, doi: 10.1086/705554.
- [13] S. Yang, “Survey of Air Purifier Market Acceptance in China.” 2016. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:59380100>
- [14] M. W. First, “Hepa Filters,” *J. Am. Biol. Saf. Assoc.*, vol. 3, no. 1, pp. 33–42, Mar. 1998, doi: 10.1177/109135059800300111.
- [15] V. Vijayan, H. Paramesh, S. Salvi, and A. K. Dalal, “Enhancing indoor air quality – The air filter advantage,” *Lung India*, vol. 32, no. 5, p. 473, 2015, doi: 10.4103/0970-2113.164174.
- [16] J.-S. Chang, P. A. Lawless, and T. Yamamoto, “Corona discharge processes,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 19, no. 6, pp. 1152–1166, Dec. 1991, doi: 10.1109/27.125038.
- [17] Y. Yang, H. Zhang, S. S. Nunayon, V. Chan, and A. C. Lai, “Disinfection efficacy of ultraviolet germicidal irradiation on airborne bacteria in ventilation ducts,” *Indoor Air*, vol. 28, no. 6, pp. 806–817, Nov. 2018, doi: 10.1111/ina.12504.

- [18] C.-C. Tseng and C.-S. Li, "Inactivation of Viruses on Surfaces by Ultraviolet Germicidal Irradiation," *J. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 4, no. 6, pp. 400–405, Apr. 2007, doi: 10.1080/15459620701329012.
- [19] D. A. Battigelli, M. D. Sobsey, and D. C. Lobe, "The Inactivation of Hepatitis a Virus and other Model Viruses by UV Irradiation," *Water Sci. Technol.*, vol. 27, no. 3–4, pp. 339–342, Feb. 1993, doi: 10.2166/wst.1993.0371.
- [20] H. Kabrein, M. Z. M. Yusof, and A. M. Leman, "PROGRESSES OF FILTRATION FOR REMOVING PARTICLES AND GASES POLLUTANTS OF INDOOR; LIMITATIONS AND FUTURE DIRECTION; REVIEW ARTICLE," *ARNP J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 11, no. 6, 2016.
- [21] T. Matsushita, H. Suzuki, N. Shirasaki, Y. Matsui, and K. Ohno, "Adsorptive virus removal with super-powdered activated carbon," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 107, pp. 79–84, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.seppur.2013.01.017.
- [22] S. Yang, Z. Zhu, F. Wei, and X. Yang, "Carbon nanotubes / activated carbon fiber based air filter media for simultaneous removal of particulate matter and ozone," *Build. Environ.*, vol. 125, pp. 60–66, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.08.040.
- [23] A. Bogaerts, E. Neyts, R. Gijbels, and J. Van Der Mullen, "Gas discharge plasmas and their applications," *Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc.*, vol. 57, no. 4, pp. 609–658, Apr. 2002, doi: 10.1016/S0584-8547(01)00406-2.
- [24] S. Klassen, "The Photoelectric Effect: Reconstructing the Story for the Physics Classroom," *Sci. Educ.*, vol. 20, no. 7–8, pp. 719–731, Jul. 2011, doi: 10.1007/s11191-009-9214-6.
- [25] J. Chen, "Ozone Production in the Negative DC Corona: The Dependence of Discharge Polarity," *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 23, no. 3, pp. 501–518, 2003, doi: 10.1023/A:1023235032455.
- [26] J. Chen and J. H. Davidson, "Ozone Production in the Positive DC Corona Discharge: Model and Comparison to Experiments," *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 22, no. 4, pp. 495–522, 2002, doi: 10.1023/A:1021315412208.
- [27] M. Küpper, C. Asbach, U. Schneiderwind, H. Finger, D. Spiegelhoff, and S. Schumacher, "Testing of an Indoor Air Cleaner for Particulate Pollutants under Realistic Conditions in an Office Room," *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 19, no. 8, pp. 1655–1665, 2019, doi: 10.4209/aaqr.2019.01.0029.
- [28] E. O. Knutson and K. T. Whitby, "Aerosol classification by electric mobility: apparatus, theory, and applications," *J. Aerosol Sci.*, vol. 6, no. 6, pp. 443–451, Nov. 1975, doi: 10.1016/0021-8502(75)90060-9.
- [29] D. F. Swinehart, "The Beer-Lambert law," *J. Chem. Educ.*, vol. 39, no. 7, p. 333, 1962.
- [30] J. Qu *et al.*, "A review on recent advances and challenges of ionic wind produced by corona discharges with practical applications," *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 55, no. 15, p. 153002, Apr. 2022, doi: 10.1088/1361-6463/ac3e2c.
- [31] L. Unger, D. Boulaud, and J. P. Borra, "Unipolar field charging of particles by electrical discharge: effect of particle shape," *J. Aerosol Sci.*, vol. 35, no. 8, pp. 965–979, Aug. 2004, doi: 10.1016/j.jaerosci.2004.01.006.
- [32] S. Wang *et al.*, "A Simple Method for Aerosol Transport Efficiency Tests in Sampling Tubes," *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 22, no. 11, p. 220219, 2022, doi: 10.4209/aaqr.220219.
- [33] D. Daumont, J. Brion, J. Charbonnier, and J. Malicet, "Ozone UV spectroscopy I: Absorption cross-sections at room temperature," *J. Atmospheric Chem.*, vol. 15, no. 2, pp. 145–155, Aug. 1992, doi: 10.1007/BF00053756.

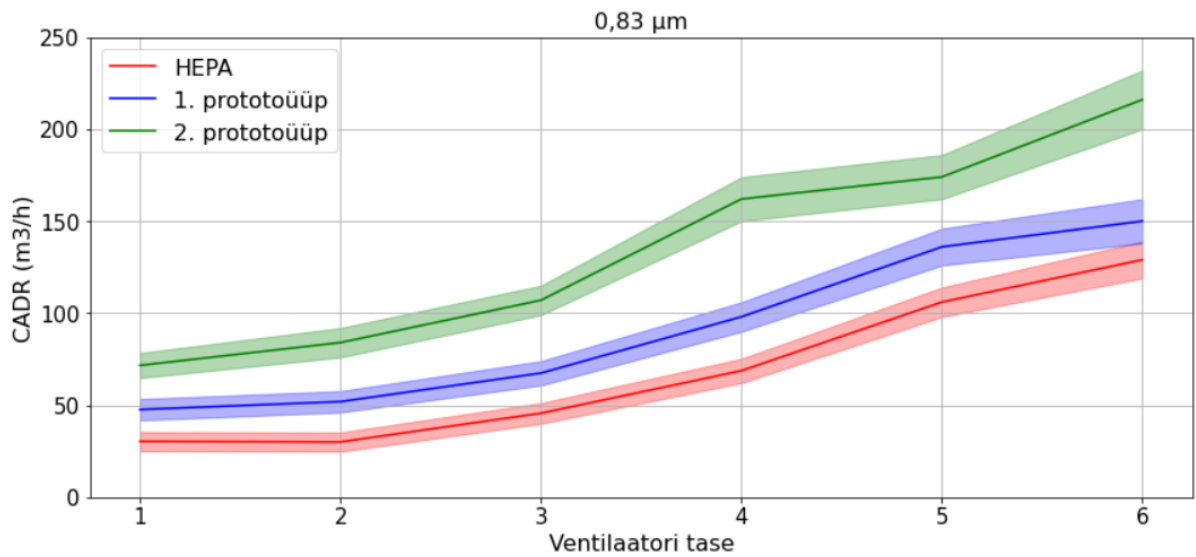
8 Lisad



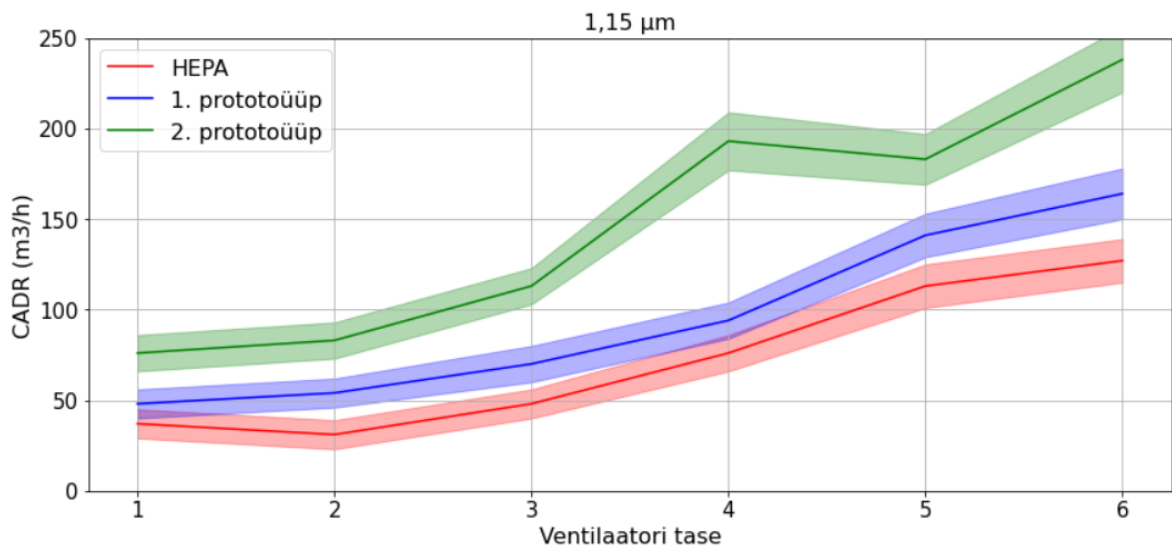
Joonis 21. HEPA filtri, prototoüübi I ja prototoüübi II CADR sõltuvus ventilatori tasemest 0,41 μm jaoks.



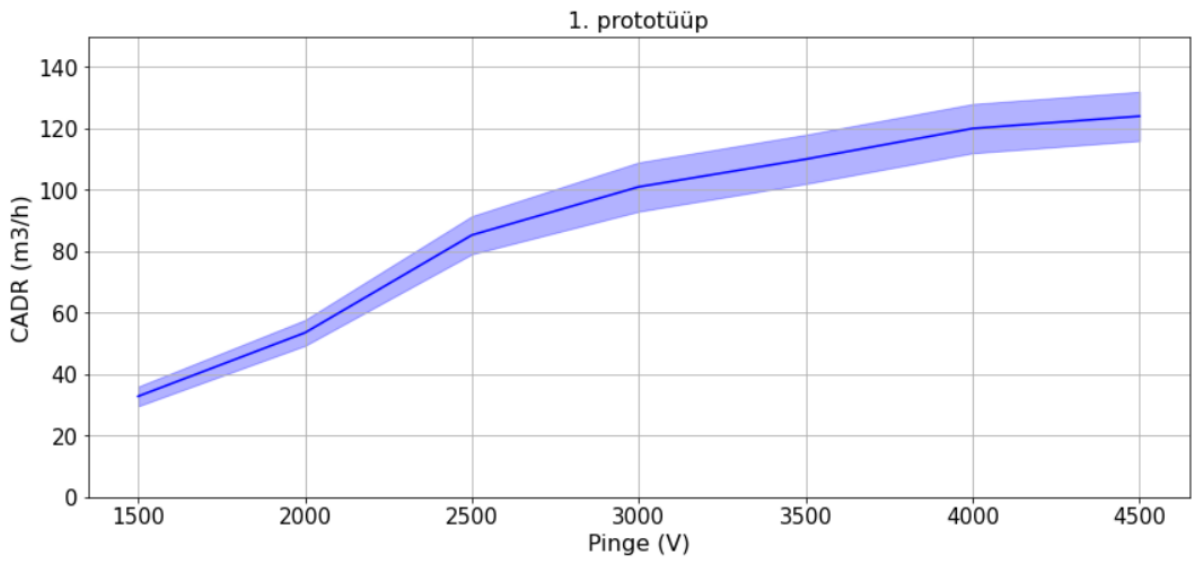
Joonis 22. HEPA filtri, prototoüübi I ja prototoüübi II CADR sõltuvus ventilatori tasemest 0,56 μm jaoks.



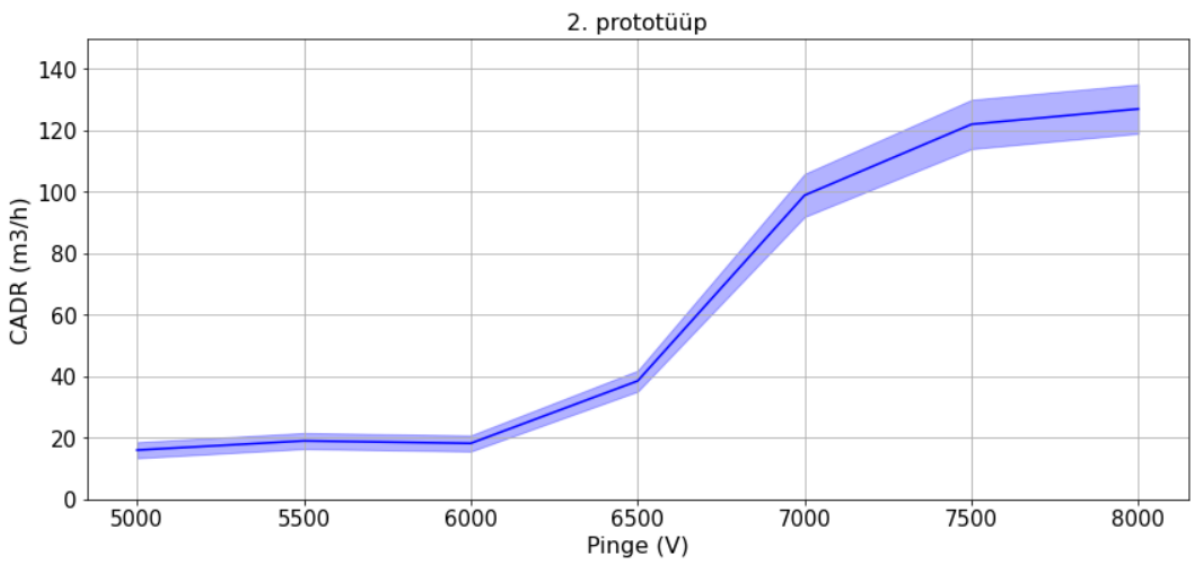
Joonis 23. HEPA filtri, prototoüübi I ja prototoüübi II CADR sõltuvus ventilaatori tasemest 0,83 µm jaoks.



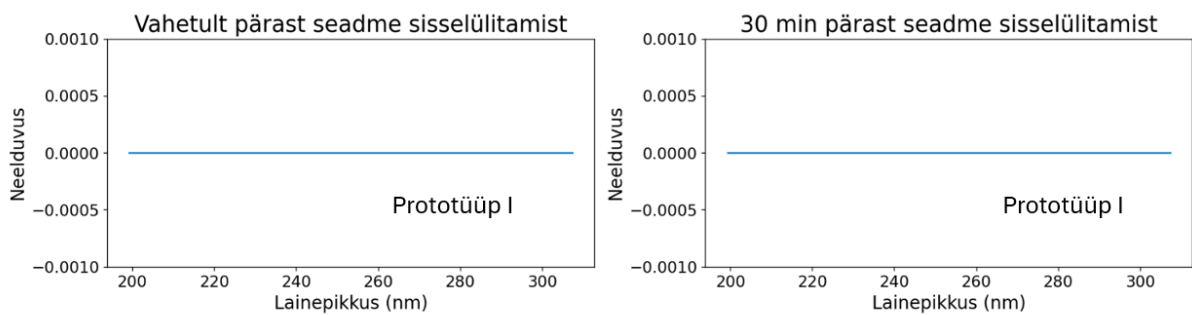
Joonis 24. HEPA filtri, prototoüübi I ja prototoüübi II CADR sõltuvus ventilaatori tasemest 1,15 µm jaoks.



Joonis 25. Laaduri pinge ja CADR sõltuvus prototüübi I puhul.



Joonis 26. Laaduri pinge ja CADR sõltuvus prototüübi II puhul.



Joonis 27. Osooni UV neelduvus vahetult pärast seadme sisselülitamist ja 30 min pärast seadme sisselülitamist (prototüüp I).