

Kiia Koivula

**ERILAISTEN AJOTILANTEIDEN VAIKUTUS
DIESELMOOTTORIN PAKOKAASUN
HIUKKASKOKOJAKAUMAAN**

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Prof. Topi Rönkkö
Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Kiia Koivula: Erilaisten ajotilanteiden vaikutus dieselmoottorin pakokaasun hiukkaskokojakaumaan
The effect of driving parameters on the particle size distribution of diesel engine exhaust
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja Luonnontieteiden kandidaattiohjelma
Toukokuu 2023

Dieselmoottorit ovat merkittävä hiukkaspäästöjen lähde ja niiden tuottamat hiukaspäästöt ollaan liitetty haitallisiin terveys- ja ympäristövaikutuksiin. Siihen, millaisia ympäristövaikutuksia pakokaasun hiukkasilla on, vaikuttaa niiden koko ja rakenne. Dieselmoottoreiden päästöjä rajoitetaan säädöksillä. Modernit jälkikäsitteilyjärjestelmät vähentävät dieselmoottorin tuottamien päästöjen määrää.

Dieselmoottorin pakokaasun hiukkaskokojakaumassa on kaksi moodia, nukleaatiomoodi, johon osuu lukumäärällisesti suurinosa hiukkasista ja nokimoodi, johon osuu massallisesti suurinosa hiukkasista. Dieselmoottorin pakokaasun koostumukseen vaikuttavat polttoaine, jälkikäsitteily, ajotapa sekä erilaiset ympäristötekijät. Mitattuun hiukkaskokojakaumaan vaikuttavat myös näytteenoton jälkeen näytteessä tapahtuvat prosessit. Kun näytettä laimennetaan ja viilennetään tapahtuu nukleaatiota ja koagulaatiota, ja uusia hiukkasia syntyy.

Tässä työssä tutkittiin RMC-syklin (engl. ramped-modal cycle) yhdeksän eri ajotilanteen hiukkaskokojakaumia. Syklin kesto oli 30 minuuttia. Mittauksissa käytettiin AGCO POWER 4.9 L HD dieselmoottoria. Näyte ilma otettiin pakoputken päästä jälkikäsitteilyyn läpi käyneestä pakokaasusta. Näyteilma laimennettiin ja viilennettiin paineilmalla, ja laimeennussuhdetta mitattiin mittauksien ajan. Laimennussuhteen arvot vaihtelivat välillä 10,1–18,3. mittausten aikana. Kokojakaumaa mitattiin sähköisellä alipaineimpaktorilla ELPI+ -lla. ELPI+ pystyy havaitsemaan 6–10000 Nm kokoiset hiukkaset.

Mittausdata käsiteltiin ja sen perusteella piirrettiin eri ajotilanteiden hiukkaskokojakaumat. Lisäksi eri ajotilanteille määritettiin geometriset keskihalkaisijat (GMD). GMD arvot vaihtelivat 23,1 nm ja 23,8 nm välillä. Lisäksi yli 200 N väännöllä 1950 rpm moottorin kierrosluvulla GMD:n arvo väheni kun väännön ja tehon arvo nousi.

Avainsanat: dieselmoottori, hiukkaskokojakauma, ajotilanne, pakokaasu

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämä työ tehtiin aerosolifysiikan yksikölle 2023. Kiitos mahdollisuudesta päästä osallistumaan mittauksien suunnitteluun ja suorittamiseen. Kiitokset Jussi Hoivalalle ja Petteri Marjaselle mittausten suunnittelusta sekä järjestämisestä ja datankäsittelyssä ohjaamisesta. Kiitos Topi Rönkölle ja Jussi Hoivalalle kandin ohjaamisesta. Kiitokset myös Leevi Partaselle leppoisasta mittausseurasta ja henkisestä tuesta.

Tampereella, 3. toukokuuta 2023

Kiia Koivula

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto	1
2.	Teoria	3
2.1	Dieselmoottori ja jälkikäsitely	3
2.2	Jakaumat	4
2.3	Hiukkasjakaumaan vaikuttavat prosessit	5
2.4	Ajotilanteiden vaikutus	6
2.5	Ympäristövaikutukset	6
3.	Tutkimusmenetelmät	7
3.1	Ajotilanteet	7
3.2	Sähköinen alipaineimpaktori ELPI+	8
3.3	Mittausjärjestely	9
4.	Tulosten analyysi.	11
4.1	Datankäsittely	11
4.2	Hiukkaskokojakaumat eri ajotilanteissa	12
5.	Yhteenveto	14
	Lähteet	15

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ATS	Pakokaasun käsittelyjärjestelmä, eng. After-Treatment system
CPC	Kondensaatiohiukkaslaskuri, eng. Condensation Particle Counter
DOC	Hapettava katalysaattori, eng. Diesel Oxidation Catalyst
ELPI+	Sähköinen alipaineimpaktori
EU	Euroopan Unioni
NO _x	Typen oksidi
RMC	Ramped modaalinen sykli eng. A ramped-modal cycle
SCR	Typen oksideja pelkistävä katalysaattori, eng. Selective Catalytic Reduction

1. JOHDANTO

Dieselmootorit ovat merkittävä hiukkaspäästöjen lähde. Hiukkaspäästöjen negatiivisten ympäristö- ja terveysvaikutusten takia dieselmootorin tuottamia päästöjä pyritään vähentämään säädöksillä. Dieselmootorin tuottamia päästöjä ollaan säädelty EU:ssa vuodesta 1999 lähtien. Auksi rajoitukset kohdistuivat pääosin moottoreiden hiukkasmassapäästöihin, mutta uudemmissa säädöksissä rajoitetaan myös hiukkaslukumääräpäästöjä. Dieselmootorin pakokaasun koostumukseen vaikuttavat moottorin parametrit, jälkikäsitteilyn teknologia, käytetty polttoaine, ajotapa ja erilaiset ympäristötekijät[14].

Ajotilanteiden vaikutusta dieselmootorin pakokaasun kokojakaumaan ollaan tutkittu niin tosielämän tilanteissa seuraamalla dieselautoa mobiililaboratoriolla [18] [16], kuin laboratorio olosuhteissa [16].

Dieselmootorien tuottamat hiukkaspäästöt on liitetty haitallisiin terveysvaikutuksiin ja liisänneen kuolleisuutta. Dieselmootorin pakokaasusta on löydetty myös karsinogeenisiä yhdisteitä. Siihen, millaiset ympäristövaikutukset pakokaasun hiukkasilla on, vaikuttaa niiden koko ja rakenne. [15]

Tässä työssä tutkittiin dieselmootorin pakokaasun hiukkaskokojakaumaa eri ajotilanteissa. Mittausdata kerättiin ajamalla työkoneen dieselmootorilla RMC-sykliä, joka koostui yhdeksästä moodista. Jokaisen moodin välillä joko moottorin kierrosluku, vääntö tai molemmat muutuivat. Syklin ensimmäinen ja viimeinen moodi olivat tyhjäkäyntejä. Tutkittava aerosolinäyte otettiin pakoputken päästä, joten se oli jo käynyt läpi jälkikäsitteilyn, joka poisti suurimman osan sen hiukkasista. Pakokaasunäyte laimennettiin paineilmalla. Laimennetun näytteen hiukkaskokojakauma mittattiin sähköisellä alipaineimpaktorilla ELPI+:lla, jolla voidaan mitata halkaisijaltaan 6–10000 nm kokoisten hiukkasten hiukkaskokojakauma [2]. Moodeille lasketaan geometrisetkeskihalkaisijat (GMD) ja niiden riippuvuutta ajotilanteista arvioidaan.

Tässä työssä käsitellään ensin kappaleessa 2 aiheeseen liittyvää teoriaa. Aluksi teoriasa perehdytään pakokaasun jälkikäsitteilyjärjestelmän toimintaan, ja merkitykseen päästöjen kannalta. Sitten perehdytään hiukkasjakaumiin ja erityisesti tässä työssä mitattavaan hiukkaskokojakaumaan. Sen jälkeen kerrotaan erilaisten prosessejen ja ajotilanteiden vaikutuksesta pakokaasun koostumukseen. Lopuksi perehdytään dieselmootoreiden päästöjen ympäristövaikutuksiin ja niitä koskeviin rajoituksiin. Luvussa 3 esitellään

tarkemmin mittauksen ajotilanteet, mittalaite ja mittausjärjestely. Lopuksi luvussa 4 analysoidaan tuloksia. Eri ajotilanteista saatuja hiukkaskokojakaumia vertaillaan toisiinsa ja aiempien tutkimusten tuloksiin.

2. TEORIA

Dieselmootorin pakokaasun koostumus riippuu monesta asiasta. Määrällisesti suurin osa hiukkasista poistuu pakokaasusta jälkikäsitteilyn yhteydessä. Jälkikäsitteilyn jälkeen, pakokaasua viilennettäessä ja laimennettaessa, pakokaasun aerosolien eri prosessit muuttavat pakokaasun hiukkaskokojakaumaa. Hiukkaskokojakaumaan vaikuttavat myös ympäristötekijät kuten lämpötila ja suhteellinen ilmankosteus. Myös moottorin ja jälkikäsitteilyn lämpötilalla on merkitystä.

2.1 Dieselmoottori ja jälkikäsitteily

Dieselmoottorien tuottamien päästöjen määrää vähentävät ajoneuvoihin asennettavat modernit pakokaasun käsitteilyjärjestelmät ATS (eng. After-Treatment system). Nämä järjestelmät poistavat tehokkaasti pakokaasusta moottorin tuottamia primäärihiukkasia kuten tuhkaa ja nokea, sekä kaasumaisia hiilivetyjä. [1]

Mittauksissa käytetyn dieselmootorin jälkikäsitteily järjestelmässä oli kolme osaa: Hapettava katalysaattori DOC (eng. Diesel Oxidation Catalyst), Hiukkassuodatin DPF (eng. Diesel Particulate Filter) ja typen oksideja pelkistävä katalysaattori SCR (eng. Selective Catalytic Reduction). [10]

Hapettava katalysaattori DOC hapettaa moottorissa syntyviä haitallisia kaasuja vaarattomampaan muotoon. Se hapettaa esimerkiksi typpimonoksidin typpidioksidiksi, hiilimonoksidin hiilidioksidiksi ja vesihöyryksi. Hapettava katalysaattori sijoitetaan mahdollisimman lähelle moottoria, koska se tarvitsee toimiakseen korkean lämpötilan. Rakenteeltaan hapettava katalysaattori on läpivirtaava keraaminen kenno, jonka sisäpinta on karhea suuremman pinta-alan saavuttamiseksi. Kenno ollaan päällystetty jalometallilla, joka hapen kanssa hapettaa pakokaasun myrkyllisiä yhdisteitä. [10]

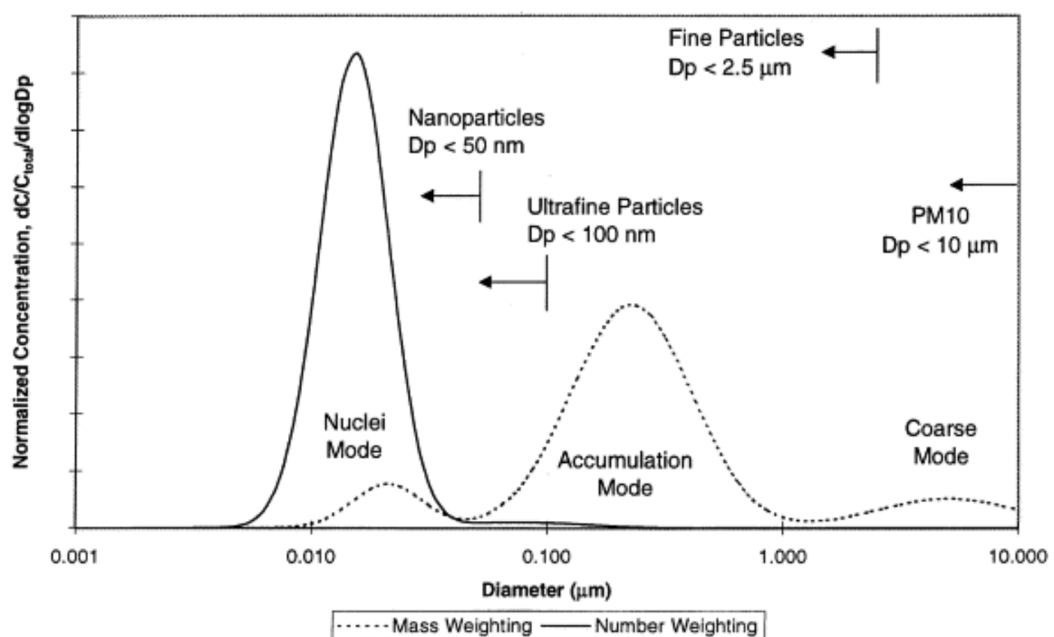
Hiukkassuodatin DPF vähentää nokihiukkasten pääsyä ilmaan ja mustaa savua. Nykyään hiukkassuodattimen suodatustehokkuus saattaa ylittää 90%. Rakenteeltaan hiukkassuodatin on keraaminen kenno, jonka kanavat ovat vastakkaisista päistä tulpatut. Hiukkassuodatin pakottaa pakokaasun kulkemaan huokoisen kennoston seinämien läpi, jolloin hiukkaspäästöjä poistuu pakokaasusta suodattimen sisään. Nokihiukkaset kasautuvat suodattimen rakenteisiin haitaten suodattimen ja moottorin toimintaa. Tästä syystä

suodatin tulee ajoittain joko puhdistaa tai regeneroida. [10]

Typenoksideja pelkistävä katalysaattori SCR ollaan kehitetty Euroopan päästösuositusten saavuttamiseksi. SCR-järjestelmä pelkistää typen oksideja typeksi ja vedeksi. SCR-järjestelmän toiminnan edellytyksenä ovat katalyytti ja pelkistin. Katalyyttinä voidaan käyttää metallien oksideja tai jalometalleja. Pelkistimenä taas voidaan käyttää ammoniakia sisältäviä liuoksia kuten ureavesiliuosta. Ensin SCR:ssä pakokaasua suihkutetaan urealiuoksella joka hajoaa ammoniakiksi. Sitten pakokaasu kuljetetaan katalyyttipinnoitteen suodattimen läpi. Ammoniakki ja katalyyttipinnoite pelkistävät yhdessä typpioksideja typeksi ja vedeksi. [10]

2.2 Jakaumat

Dieselmoottorin pakokaasun hiukkasten kokojakaumilla on kaksi moodia, joihin suurin osa hiukkasista sijoittuu lukumäärällisesti ja massallisesti. Lukumäärällisesti suurin osa pakokaasun hiukkasista sijoittuu nukleaatiomoodiin. Massallisesti suurin osa hiukkasista taas sijoittuu akkumulaatiomoodiin. [16]



Kuva 2.1. Kuvassa näkyy pakokaasulle tyypillinen hiukkasjakauma, jossa on nukleaatiomoodi tasaisella viivalla ja akkumulaatiomoodi katkoviivalla. Kuvan x-akselilla on hiukkasen halkaisija mikrometreinä ja y-akselilla normalisoitu konsentraatio[8]

Nukleaatiomoodin hiukkasten halkaisijat ovat kokoluokkaa 5–50 nm. Ne muodostavat tyypillisesti 1–20% koko dieselmoottorin pakokaasun hiukkasmassasta. Nukleaatiomoodin hiukkaset ovat tyypillisesti pakokaasun laimennuksen ja viilennyksen aikana muodostuneita haihtuvista orgaanisia- ja rikkiyhdisteitä, sekä joissain tapauksissa kiinteitä hiili- ja

metalliyhdisteitä. [8]

Rönkkö et al. 2006 tutkimuksen mukaan nukleaatiomoodin hiukkasia muodostui dieselmoottorin pakokaasuun eniten kun lämpötila oli matala ja suhteellinen ilmankosteus korkea. Nukleaatiomoodin hiukasten muodostumiseen vaikuttavat myös muut laimennemisen parametrit kuten laimennussuhde. [16]

Massallisesti suurin osa dieselmoottorin pakokaasun hiukkasista sijoittuu akkumulaatiomoodiin, jonka hiukasten halkaisijat on kokoluokkaa 100–300 nm. Akkumulaatiomoodi koostuu pitkälle agglomeroituneesta kiinteästä hiilipitoisesta materiaalista, tuhkasta, sekä haihtuvista orgaanisista yhdisteistä ja rikkiyhdisteistä. Pakokaasussa ilmenee myös haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, jotka ovat peräisin hapettumisen välttäneestä polttoaineesta ja voiteluöljystä. Erityisesti matalilla lämpötiloilla ja kevyellä kuormalla pakokaasussa ilmenee myös epäorgaanista tuhkaa. [8]

Akkumulaatiomoodista voidaan puhua myös kuvaavammin nokimoodina, kuten Pirjola et al. 2015 tutkimuksessa, jossa nokimoodin hiukkasia kuvaillaan hiukkasiksi, jotka ovat kokoluokaltaan 50–1000 nm ja muodostuvat moottorissa palamisprosessissa.

2.3 Hiukkasjakaumaan vaikuttavat prosessit

Erilaisilla prosesseilla on vaikutusta pakokaasun koostumukseen. Suurin osa mittauksien hiukkasmassasta syntyy jo moottorissa ja tyypillisesti säilyy näytteenoton ja laimennuksen ajan muuttumattomana. Sen sijaan laimennuksessa tapahtuvilla prosesseilla nukleaatiolla ja koagulaatiolla voi olla suuria vaikutuksia hiukkaslukumäärään. [8]

Agglomeraatio on prosessi, jossa kiinteät aerosolihiukkaset takertuvat toisiinsa ja muodostavat kahden tai useamman hiukkasen agglomeraatteja. Agglomeraatiota tapahtuu moottorissa palamisprosessin yhteydessä ja sen seurauksena muodostuvat pakokaasun noki hiukkaset. Ilmakehään päästessään hiilipartikkelit absorboivat Auringon säteilyä ja lämmittävät ilmakehää [17].

Nukleaatiolla tarkoitetaan prosessia, jossa muodostuu uusi hiukkanen. Nukleaatiota tapahtuu kun pakokaasu viilenee ja laajenee. Sen seurauksena pakokaasuun muodostuu nanopartikkeleita kuten hiilivetyjä ja sulfaatteja. [8]

Tosielämän tilanteissa uusien hiukasten muodostumista nukleaation kautta tapahtuu, kun pakokaasu kohtaa ulkoilman. Näihin prosesseihin vaikuttavat ympäröivät olosuhteet kuten lämpötila ja ilmankosteus [17]. Laboratorio-olosuhteissa nukleaatiota tapahtuu kun näytettä viilennetään ja laimennetaan.

Koagulaatio on prosessi, jossa aerosolihiukkaset takertuvat toisiinsa ja muodostavat uuden hiukkasen. Koagulaatio on merkittävä ilmiö erityisesti kun aerosoleilla on korkea hiukaspitoisuus. [3]

2.4 Ajotilanteiden vaikutus

Diesel moottorit tuottavat tyypillisesti 10—100 kertaa polttomoottoria suuremman määrän hiukkaspäästöjä [8]. Korkean nopeuden ja kuorman tapauksissa polttomoottori tuottaa kuitenkin lähes yhtä paljon päästöjä kuin diesel moottori [9].

Ajotilanteiden vaikutusta hiukkaskokojakaumaan voidaan määrittää esimerkiksi päästökertoimien avulla. Päästökertoimia voidaan laskea esimerkiksi hiukkasmassalle ja hiukkaslukumäärälle. Päästökertoimia kuorman suhteen ollaan tutkittu esimerkiksi Pirjola et al. 2017 tutkimuksessa, jossa tutkittiin maataloustraktorin dieselmoottorin tuottaman pakokaasun kokojakaumaa eri ajotilanteissa. Tutkimuksessaan he saivat pienempiä hiukkaskonsentraatioita 1500 rpm:ssa kuin 2200 rpm:ssa. Heidän tutkimansa pakokaasu kävi läpi DOC:n ja SCR:n sisältävän jälkikäsitelyn.

Rönkkö et al. 2006 tutkimuksen mukaan yli 200 Nm väännöllä, vääntöä kasvattaessa nukleaatio moodin hiukkasten määrä kasvaa. Tämän arvioidaan liittyvän korkealla väännöllä syntyviin korkeampiin rikkiptoisuuksiin. Alle 200 Nm väännöllä nukleaatio moodin hiukkasten määrä taas kasvoi, kun vääntöä vähennettiin. Tämän arvioitiin johtuvan alhaisen väännön korkeista hiilivetyptoisuuksista. Samoissa tutkimuksissa tutkittiin myös väännön vaikutusta pakokaasun hiukkaskokojakauman nukleaatiomoodin GMD:hen eli geometriseen keskihalkaisijaan (engl. Geometric Mean Diameter). Heidän tutkimuksessaan GMD:n arvo kasvoi kun vääntöä kasvatettiin kun vääntö oli yli 200 Nm. Alle 200 Nm väännöllä GMD:n arvo taas nousi kun vääntö laski.

2.5 Ympäristövaikutukset

Dieselmoottorit ovat merkittävä hiukkasten lähde. Hiukkaspäästöillä on negatiivisia vaikutuksia niin ilmastoon, ympäristöön ja terveyteen kuin moottorin suorituskykyyn [8]. Vuonna 1999 astuivat voimaan EU:n ensimmäiset päästörajoitukset eli stage I dieselmootto-reilla toimiville raskaille ajoneuvoille. Uusien moottoreiden hiukkasmassapäästöt vähenivät noin 96% vuoteen 2014 mennessä. Stage V rajoituksilla rajoitetaan vuodesta 2019 lähtien myös diesel käyttöisten raskaiden ajoneuvojen hiukkaslukumääräpäästöjä. [14]

Dieselmoottorit ovat merkittävä typen oksidien tuottaja. Typen oksideja eli typpimonoksidiä ja typpidioksidia nimitetään yhteisnimityksellä NOx. Typpimonoksidi on haitallista, koska se muuntuu ilmakehässä typpidioksidiksi, joka reagoi otsonikerroksen kanssa. Typpidioksidin korkeat pitoisuudet taas ovat haitallisia terveydelle. Typen oksidit ovat myös erittäin reaktiivisia ja osallistuvat esimerkiksi happosateen syntymiseen ja rehevöitymiseen. Typen oksidit osallistuvat myös terveydelle haitallisten pienhiukkasten muodostumiseen. Dieselmoottoreiden teknologian kehityksen ansiosta dieselmootto-reiden osuus NOx:ien tuottajana on vähentynyt merkittävästi. [12]

3. TUTKIMUSMENETELMÄT

Näissä mittauksissa tutkittiin dieselmoottorin hiukkaskokojakaumaa näytteestä, joka otettiin pakoputken päästä ja laimennettiin. Mittauksissa moottorilla ajettiin RMC sykliä, joka koostuu yhdeksästä moodista. Moodeihin sisältyy seitsemän erilaista ajotilannetta sekä tyhjäkäynti alussa ja lopussa. Sykli ajettiin yhteensä viisi kertaa. Kokojakauman mittaamiseen käytettiin sähköistä alipaineimpaktoria ELPI+:aa. Tavoitteena oli selvittää ajotilanteiden vaikutusta hiukkaskokojakaumaan.

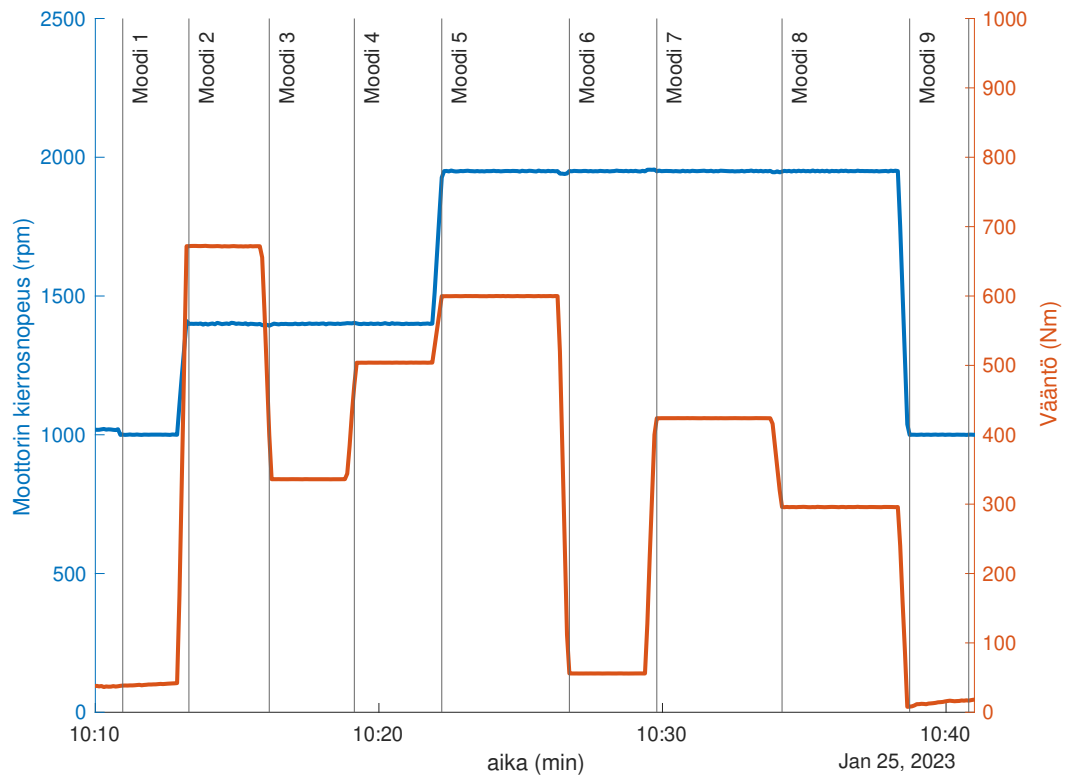
3.1 Ajotilanteet

Mittauksissa ajettiin viisi kertaa RMC-sykli, joka koostuu yhdeksästä moodista. Jokaisen moodin välillä joko moottorin kierrosnopeus, vääntö tai molemmat muuttuivat. Moodien moottorin kierrosnopeudet, väännöt, tehot ja kestot ollaan esitetty taulukossa 3.1. Syklin ensimmäinen ja viimeinen moodi olivat tyhjäkäyntejä.

Moodi	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Moottorin kierrosnopeus (rpm)	1000	1400	1400	1400	1950	1950	1950	1950	1000
Vääntö (Nm)	40	672	335	504	600	56	424	296	14
Teho (kW)	4,2	99	49	74	120	11	87	60	1,5
Moodin kesto (s)	126	159	160	162	246	164	248	247	128

Taulukko 3.1. Moodeja vastaavat moottorinkierrosluvut kierroksina minuutissa, vääntö newtoneina ja moodin kestot sekunteina.

Kuvassa 3.1 ollaan esitetty moottorin sykli vääntönä ja kierroslukuna ajan suhteen. RMC-sykli eli ramped modaalinen sykli (eng. ramped-modal cycle) on raskaan kaluston moottoreille suunniteltu testisykli, jota voidaan käyttää esimerkiksi maatalouslaitteiden ja metsäkoneiden moottoreille [7].



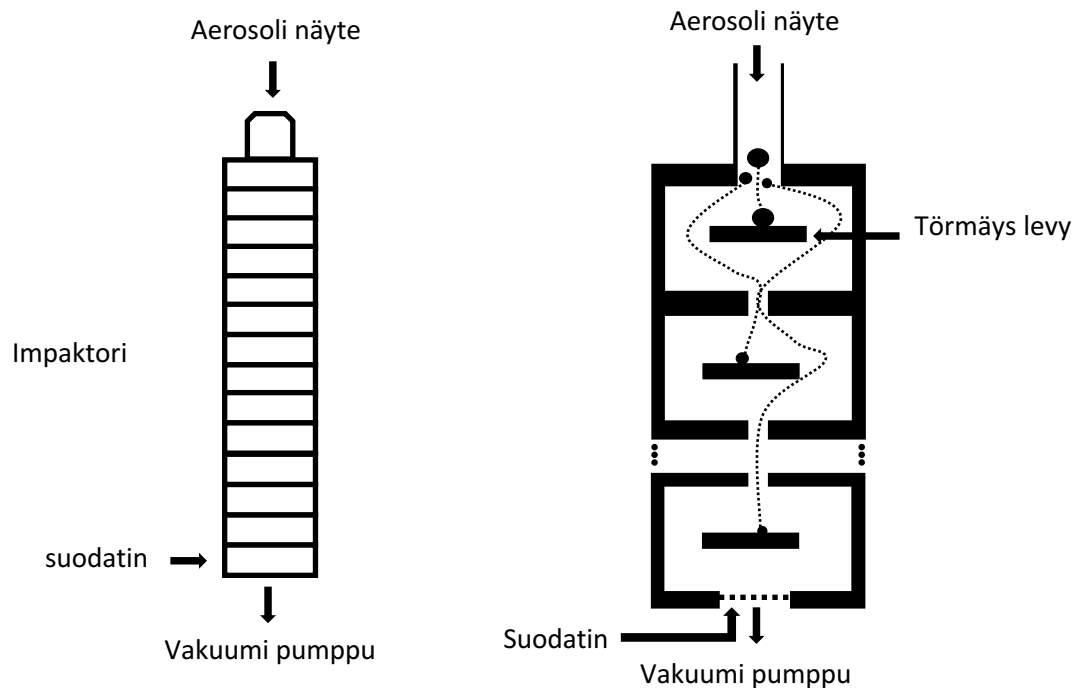
Kuva 3.1. Kuvassa on esimerkki RMC-syklistä. Kuvaajassa on x-akselilla aika minuutteina. Vasemmalla y-akselilla on moottorin kiertonopeus pyörähdyksinä minuutissa ja oikealla y-akselilla moottorin vääntö newtonmetreinä

RMC-syklin kesto kokonaisuudessaan on 30 minuuttia. Sykli ajettiin viisi kertaa ja syklien välissä pidettiin noin viiden minuutin tauko.

3.2 Sähköinen alipaineimpaktori ELPI+

Näissä mittauksissa hiukkaskokojakauman mittaamiseen käytettiin sähköistä alipaineimplikaattoria ELPI+ :aa, jolla voidaan mitata 6–10000 nm kokoisten hiukkasten hiukkaskokojakauma[2]. Tälle alueelle osuu osa nukleaatio moodin hiukkasista ja koko nokimoodi.

ELPI+ :lla on kolmevaiheinen toimintaperiaate. Ensimmäisessä vaiheessa hiukkaset varataan koronapurkauksella niiden kulkiessa varaajan läpi. Toisessa vaiheessa näyte johdetaan impaktoriin, joka ollaan esitetty kuvassa 3.2. Impaktorissa hiukkasille annetaan inertiaaluokitus. Cascade-impaktorissa hiukkaset törmäävät johonkin neljästätoista törmäyslevystä, jotka lajittelevat hiukkaset kokoluokkiin niiden aerodynaamisen koon mukaan. Kokoluokkiin jakaminen perustuu hiukkasten inerttien eroavaisuuteen. Suuremmat hiukkaset törmäävät ylempiin impaktoreihin, pienemmät alempiin. Lopuksi hiukkasvaraus tunnistetaan sähköisesti herkällä elektrometrillä. [2] [4]



Kuva 3.2. Kuvassa vasemmalla ELPI+, jossa aerosoli syötetään neljäntoista impaktorin torniin ja suodattimen kautta vakuumpumpulla ulos [6]. Oikealla puolella on lähikuva, jossa näkyy kuinka kevyemmät hiukkaset etenevät törmäyslevyjien ohi, ja painavammat törmäävät niihin[11]. Se osa näytteestä, joka ei törmää mihinkään impaktoreista joko suodattuu pois suodattimeen tai jatkaa matkaa vakuumpumppuun.

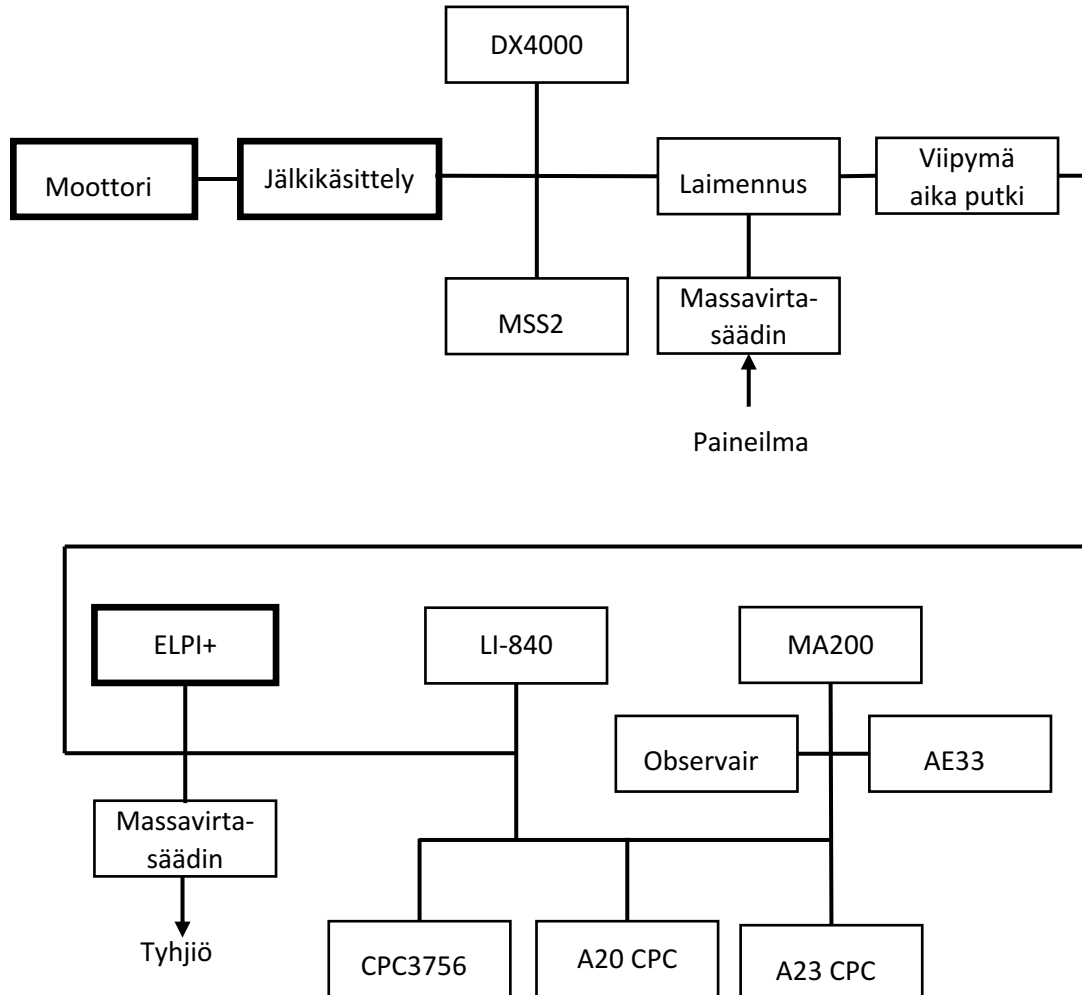
Impaktoritasot ovat toisistaan eristettyjä, ja ne ollaan jokainen liitetty elektrometriin. Kun hiukkaset törmäävät impaktoritasoihin elektrometri havaitsee niiden varauksen aiheuttaman sähkövirran, jonka perusteella voidaan määrittää jokaista hiukkaskokoa vastaava hiukkasmäärä. [2]

3.3 Mittausjärjestely

Näissä mittauksissa käytettiin AGCO POWER 4.9 L HD dieselmootoria. Mootoria käytetään tosielämässä työkoneen moottorina. Mittausjärjestely ollaan esitetty kuvassa 3.3. Ennen RMC-syklien ajamista ja moottorin käynnistämistä, mitattiin taustadataa. Sitten moottoria lämmitettiin puoli tuntia, jotta saavutettiin jälkikäsitteilyn toiminnan kannalta riittävän suuri lämpötila. RMC-sykli ajettiin viisi kertaa jonka jälkeen moottorilla ajettiin muutama tasaista ajoja ja se jäähdytettiin. Jäähdytyksen jälkeen mitattiin jälleen taustaa.

Mittauksissa tutkittava näyte otettiin jälkikäsitteilyn läpikäyneestä dieselmootorin pakokaasusta pakoputken päästä. Ensin näyteilma laimennettiin puhdistetulla paineilmailla massavirtasäätimen avulla. Sitten laimennettu näyte johdettiin viipymäikaputkeen. Viipymäikaputkesta laimennettu näyte johdettiin edelleen sähköiselle alipaineimpaktorille

ELPI+:lle, sekä massavirtasäätimelle, joka poisti näyteilmasta riittävän suuren osan, jotta se voitiin johtaa edelleen kolmelle kondensaatiohiukkaslaskurille ja kolmelle mustan hiilen mittalaitteelle.



Kuva 3.3. Aerosolinäyte vietiin laimennuksen ja viipymäaikaputken kautta sähköiselle alipaineimpaktorille ELPI+:lle. Näyte laimennettiin massavirtasäätimellä paineilmalla ja ylimääräinen näyte poistettiin toisella massavirtasäätimellä. Näytteen hiilidioksidipitoisuutta mitattiin DX400 ja Li-840 mittalaitteilla. Samoissa mittauksissa näytettä tutkittiin myös kolmella CPC:llä ja kolmella mustan hiilen mittalaitteella.

Näytteen laimentamiseen käytettiin puhdistettua paineilmaa. Laimennus vaikuttaa mitaustuloksiin, joten tulosten laskentaa varten oli olennaista selvittää laimennussuhde. Laimennussuhteen määrittämistä varten näytteen hiilidioksidipitoisuutta mitattiin ennen laimennusta DX4000:lla ja laimennuksen jälkeen Li-840:llä. Nämä laitteet mittasivat näytteen hiilidioksidipitoisuutta, jonka avulla pystytään laskemaan kuinka paljon näytteeseen lisättiin laimennusilmaa.

4. TULOSTEN ANALYYSI

Mittausdatasta hahmoteltiin hiukkaskokojakaumaa 6–10 000 nm kokoisille hiukkasille yhdeksässä eri ajotilanteessa. Tuloksia analysoitiin määrittämällä kullekin moodille GMD eli geometrinen keskiahkaisija. GMD arvoja vertailtiin väännön ja tehon funktiona.

4.1 Datankäsittely

Hiukkaskokojakaumien määrittämiseksi käsiteltiin viittä puolen tunnin RMC-sykliä, jotka ajettiin peräkkäin viiden minuutin välitauoilla. Tässä työssä tutkittiin tarkemmin päivän ensimmäistä RMC-sykliä ja sen moodeja.

Datankäsittelyn ensimmäisessä vaiheessa data tausta korjattiin. Taustakorjaus tehtiin, jotta tausta havainnot eivät aiheuttaisi virhettä mittaustuloksiin. Tämä tehtiin päivän alussa ja lopussa tehtyjen taustamittausten avulla. Päivän alun ja lopun taustadata yhdistettiin, ja siitä otettiin keskiarvo. Tämä keskiarvo vähennettiin syklin mittausdatasta.

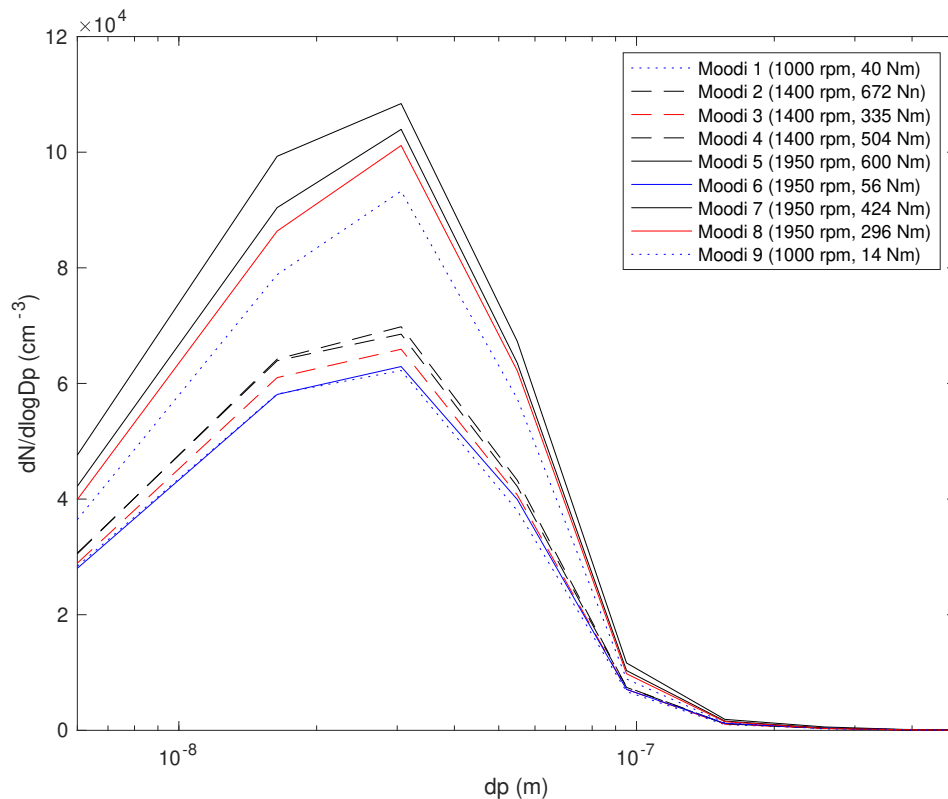
Toisessa vaiheessa taustakorjatusta datasta laskettiin lukumääräkokojakauma jokaiselle moodille jokaisella syklillä erikseen. Lukumääräkokojakaumaan otettu data pyrittiin rajamaan niin, että moodien vaihtamiseen kulunut aika jäisi tarkastelun ulkopuolelle.

Kolmannessa vaiheessa laskettiin laimennussuhde jokaiselle ensimmäisen RMC-syklin moodille. Laimennussuhde laskettiin jakamalla DX4000:n mittaama hiilidioksidipitoisuus LI-840 mittaamalla hiilidioksidipitoisuudella. Laimennussuhteet jokaiselle moodille saatiin kun laskettiin keskiarvo moodin aikana mitatulle laimennussuhteelle. Keskiarvoa laskettaessa jätettiin huomiotta laimennussuhteen suurimmat piikit, jotta moodin laimennussuhde ei olisi turhan korkea yksittäisen piikin takia. Laimennussuhteessa havaittuja piikkejä vastaavat aikavälit jätettiin pois myös ELPI+:n datan käsittelystä. Tästä syystä datankäsittelyssä käytetyt aikavälit ovat lyhempiä kuin moodin todellinen kesto. Laimennussuhteen vaihtelusta moodin sisällä voi aiheutua virhettä.

Lopuksi hiukkaskokojakaumat laimennuskorjattiin kertomalla kokojakaumat niiden moodia vastaavalla laimennussuhteella. Näissä mittauksissa laimennussuhde vaihteli moodeittain välillä 10,1-18,3.

4.2 Hiukkaskokojakaumat eri ajotilanteissa

Kuvassa 4.1 ollaan esitetty eri moodien hiukkaskokojakaumat. Suurinosa hiukkaskokojakauman hiukkasista osuu kuvassa näkyvälle 6 nm–500 nm välille. Osa pakokaasun hiukkasista on kuitenkin niin pieniä, ettei ELPI+ kykene havaitsemaan niitä. Mitattu hiukkaskokojakauma koostuu nokimoodin hiukkasistam. Kuvaajasta nähdään, että 1. ja 9. moodin hiukkaskokojakaumat ovat huomattavan erilaistett ottaen huomioon, että moodit 1 ja 9 ovat molemmat tyhjäkäyntejä. Kuvaajassa ylempi sininen pisteiviiva on moodin 9 hiukkaskokojakauma ja alempi sininen pisteiviiva on moodin 1 hiukkaskokojakauma. Kokojakaumien ero saattaa johtua moodien väännön suuruuden erosta, niitä edenneistä ajotavoista.

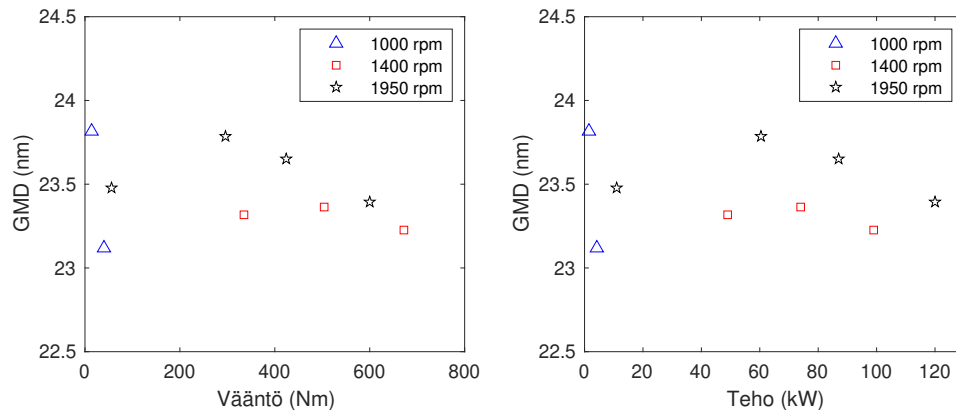


Kuva 4.1. Kuvassa on hiukkaskokojakaumat moodeille 1–9. Ne moodit, joilla oli suurin vääntö ollaan piirretty mustalla, vastaavasti pienimmän väännön moodit ovat sinisellä. Suoraa viivaa ollaan käytetty 1900 rpm moodeille, katkoviivaa 1400 rpm moodeille ja pisteiviivaa 1000 rpm tyhjäkäynneille.

Kuvassa 4.2 ollaan esitetty eri moodien GMD:t väännön ja tehon funktiona. GMD:n arvo on sen hiukkasen halkaisija, jota puolet jakauman hiukkasista ovat suurempia ja puolet pienempiä [5]. Moodien GMD arvot vaihtelivat välillä 23,1 nm–23,8 nm.

moottorin keirrosluvulla 1950 rpm GMD:n arvo näyttää laskevan, kun vääntö kasvaa yli 200 Nm vääntöalueella.

Ensimmäisen tyhjäkäynnin GMD on mittauksien pienin vain 23,1 nm. Syklin lopettavan tyhjäkäynnin GMD taas on mittausten suurin 23,8 nm. Tyhjäkäynnit olivat moottorin kierrosluvuiltaan samanlaiset, joten GMD:n arvon eron voi selittää moodien toisistaan eroavat väännöt tai aiempien ajotapojen vaikutus mitattavaan dataan. Voidaan myös huomata, että 1950 rpm moottorin kierrosluvuilla GMD arvot olivat suurempia kuin 1400 rpm. Eli korkeammilla moottorin kierrosluvuilla pakokaasun hiukkaset ovat keskimäärin suurempia.



Kuva 4.2. Kuvassa on esitetty vasemmalla GMD väännön funktiona ja oikealla GMD tehon funktiona. Moodit ollaa eroteltu kierroslukujen mukaan. 1000 rpm tyhjäkäynnit ovat siniset kolmiot, 1400 rpm moodit ovat punaiset neliöt ja 1950 rpm moodit ovat mustat tähdet. Sinisistä kolmioista ylempi on 9. moodi ja alempi 1. moodi.

On hyvä huomioida, että alle 6 nm kokoiset hiukkaset jäävät näiden mittausten mittalaitteiden kapasiteetin ulkopuolelle. Lasketut GMD arvot voivat siis olla todellista keskimääräistä halkaisijaa suurempia, koska pienimpiä hiukkasia ei olla voitu huomioida laskuissa. Tämän lisäksi virheitä tuloksiin on voinut aiheuttaa laimennussuhteen vaihtelu syklin ja yksittäisten moodien aikana. Vaikka data laimennuskorjattiin, laimennusolosuhteet ja niiden vaihtelu vaikuttavat jonkin verran saatuihin tuloksiin. Virhettä on voinut aiheutua myös putkissa olleesta kosteudesta.

5. YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin dieselmootorin pakokaasun hiukkaskokojakaumaa eri ajotilanteissa, ja pyrittiin määrittämään näiden ajotilanteiden vaikutusta kokojakaumaan. Lisäksi moodien kokojakaumia tarkasteltiin määrittelemällä niille GMD arvot.

GMD arvot vaihtelivat 23,1 nm ja 23,8 nm välillä. Pienin GMD:n arvo saatiin syklin ensimmäisellä moodilla, joka oli tyhjäkäynti ja jonka moottorinkierrosluku oli 1000 rpm ja vääntö 40 Nm. Suurin arvo saavutettiin 9. moodilla, joka oli myös tyhjäkäynti, ja tällöin moottorin kierrosluku oli 1000 rpm ja vääntö 14 Nm.

Tämän työn mittaustuloksiin vaikuttavat laboratorion laimennusolosuhteet sekä niiden vaihtelu. Lisäksi hiukkasten prosessien nukleation ja koagulaation vaikutuksesta näytteeseen syntyi uusia hiukkasia näytteen laimennusvaiheessa. Erityisesti GMD arvoihin vaikuttaa se, että kokojakaumaan saatiin mitattua vain yli 6 nm kokoisia hiukkasia.

Näissä mittauksissa perehdyttiin vain yksittäiseen RMC-sykliin. Syklejä ajettiin kuitenkin yhteensä viisi, ja olisi mielenkiintoista selvittää miten, ja kuinka paljon mittaustulokset vaihtelivat syklien välillä. Lisäksi tässä työssä alle 6 nm kokoiset hiukkaset jäivät kokonaan tarkastelun ulkopuolelle. Samoissa mittauksissa CPC:llä eli kondensaatiohiukkaslaskureilla mitattuja hiukkaslukumääriä voitaisiin analysoida, koska CPC datan avulla voitaisiin havaita pienemmätkin hiukkaset aina 3 nm asti. Lisäksi CPC dataa analysoimalla voitaisiin laskea eri kokoisten hiukkasten konsentraatioita näytteessä.

LÄHTEET

- [1] Arnold, F., Pirjola, L., Rönkkö, T., Reichl, U., Schlager, H., Lähde, T., Heikkilä, J. ja Keskinen, J. First Online Measurements of Sulfuric Acid Gas in Modern Heavy-Duty Diesel Engine Exhaust: Implications for Nanoparticle Formation. eng. *Environmental science & technology* 46.20 (2012), s. 11227–11234. ISSN: 0013-936X.
- [2] *ELPI+*. Dekati. 2022. URL: https://www.dekati.com/wp-content/uploads/dekati_elpi_brochure.pdf.
- [3] Fernández-Díaz, J., Muñiz, C.-P., Braña, M., García, B. ja Nieto, P. A modified semi-implicit method to obtain the evolution of an aerosol by coagulation. *Atmospheric environment (1994)* 34.25 (2000), s. 4301–4314. ISSN: 1352-2310.
- [4] Härkönen, V. *ELPI+:n automaattinen alipaineen säätö*. fin. Tampereen ammattikorkeakoulu, 2013.
- [5] Hinds, W. C. *Aerosol technology : properties, behavior, and measurement of airborne particles*. eng. 2nd ed. A Wiley-interscience publication. Wiley, 1999.
- [6] Järvinen, A., Aitomaa, M., Rostedt, A., Keskinen, J. ja Yli-Ojanperä, J. Calibration of the new Electrical Low Pressure Impactor (ELPI+). *Journal of Aerosol Science* 69 (tammikuu 2014).
- [7] Karppanen, M. Heavy-duty/non-road vehicle engine emissions - EU-TUBE-Project (2020).
- [8] Kittelson, D. B. Engines and nanoparticles: A review: Nanometer particles: a new frontier for multidisciplinary research. eng. *Journal of aerosol science* 29.5-6 (1998), s. 575–588. ISSN: 0021-8502.
- [9] Kittelson, D., Watts, W. ja Johnson, J. Nanoparticle emissions on Minnesota highways. eng. *Atmospheric environment (1994)* 38.1 (2004), s. 9–19. ISSN: 1352-2310.
- [10] Knihti, L. *Diesel-ajoneuvojen pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmä*. fin. 2018.
- [11] Lee, S., Kim, D., Cho, Y., Kim, E., Liu, P., Kwak, D.-B., Keum, S., Lim, H. ja Kim, T. Application of an Electrical Low Pressure Impactor (ELPI) for Residual Particle Measurement in an Epitaxial Growth Reactor. *Applied Sciences* 11.16 (2021). ISSN: 2076-3417. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/16/7680>.
- [12] Pearson, J. K. *Air pollution and climate change : the basics*. eng. First edition. The basics. London ; Routledge, Taylor & Francis Group, 2022. ISBN: 9781032275185.
- [13] Pirjola, L., Karl, M., Rönkkö, T. ja Arnold, F. Model studies of volatile diesel exhaust particle formation: Are organic vapours involved in nucleation and growth? eng. *Atmospheric chemistry and physics* 15.18 (2015), s. 10435–10452. ISSN: 1680-7316.

- [14] Pirjola, L., Rönkkö, T., Saukko, E., Parviainen, H., Malinen, A., Alanen, J. ja Saveljeff, H. Exhaust emissions of non-road mobile machine : Real-world and laboratory studies with diesel and HVO fuels. eng (2017).
- [15] Robert, M. A., Kleeman, M. J. ja Jakober, C. A. Size and Composition Distributions of Particulate Matter Emissions: Part 2-Heavy-Duty Diesel Vehicles. eng. *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)* 57.12 (2007), s. 1429–1438. ISSN: 1096-2247.
- [16] Rönkkö, T., Virtanen, A., Vaaraslahti, K., Keskinen, J., Pirjola, L. ja Lappi, M. Effect of dilution conditions and driving parameters on nucleation mode particles in diesel exhaust: Laboratory and on-road study. eng. *Atmospheric environment (1994)* 40.16 (2006), s. 2893–2901. ISSN: 1352-2310.
- [17] Virtanen, A. K. K., Ristimäki, J. M., Vaaraslahti, K. M. ja Keskinen, J. Effect of Engine Load on Diesel Soot Particles. eng. *Environmental science & technology* 38.9 (2004), s. 2551–2556. ISSN: 0013-936X.
- [18] Vogt, R., Scheer, V., Casati, R. ja Benter, T. On-Road Measurement of Particle Emission in the Exhaust Plume of a Diesel Passenger Car. eng. *Environmental science & technology* 37.18 (2003), s. 4070–4076. ISSN: 0013-936X.