

Roosa Valijärvi

HIUKKASTEN LUKUMÄÄRÄ- JA KEUHKODEPOSITIIVA PINTA-ALAPITOISUUS PÄIVÄKOTIEN SISÄILMASSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastajat: Topi Rönkkö ja Ville Silvonen
Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Roosa Valijärvi: Hiukkasten lukumäärä- ja keuhkodepositoiva pinta-alapitoisuus päiväkotien sisäilmassa

Particle number concentration and lung deposited surface area concentration of indoor air in kindergartens

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Tekniikan ja luonnontieteiden kandidaatinohjelma

Toukokuu 2023

Tässä työssä tutkittiinkin kahden päiväkodin sisäilman hiukkaslukumäärä- ja keuhkodepositoivaa pinta-alapitoisuutta Helsingissä. Keuhkodepositoivasta pinta-alapitoisuudesta ei ole kattavasti tutkimuksia eri sisäympäristöissä. Keuhkodepositoivan pinta-alapitoisuuden on havaittu olevan mahdollinen mittari hiukkasten ja niiden negatiivisten terveysvaikutusten välillä etenkin pienille hiukkasille. Ihmiset viettävät suurimman osan vuorokaudesta sisätiloissa ja erityisesti pienet lapset ovat alttiita pienhiukkassaasteelle, joten juuri päiväkotien sisäilman koostumus on mielenkiintoinen tutkimuskohde.

Tämän tutkimuksen teoriassa käsiteltiin aerosolihiukkasten merkitystä erityisesti ihmisympäristöissä ja niiden vaikutusta ihmisten terveyteen. Mittauksen toteutuksessa esiteltiin käytetyt mittalaitteen ja mittamenetelmät. Tulosten analyysissä vertailtiin mitattuja pitoisuuksia päiväkotien eri huoneiden kesken sekä vertailtiin sisäilman pitoisuuksia ulkoilman pitoisuuksiin. Lisäksi hiukkaslukumäärä- ja keuhkodepositoivaa pinta-alapitoisuuksia tarkasteltiin suhteessa toisiinsa päiväkotien huoneiden sisällä. Lopuksi saatuja tuloksia vertailtiin kirjallisuuteen.

Työn mittaukset suoritettiin kahtena peräkkäisenä päivänä, jolloin kummassakin päiväkodissa mitattiin neljästä eri huoneesta Partectorilla keuhkodepositoivaa pinta-alapitoisuutta ja hiukkaslukumääräpitoisuutta käsikantoisella kondensaatiohiukkaslaskurilla TSI CPC Model 3007. Sisäilman pitoisuuksien lisäksi tässä työssä käytettiin mittausdataa päiväkotien ulkoilman hiukkaslukumäärä- ja keuhkodepositoivasta pinta-alapitoisuuksista niiltä vuorokausilta, jolloin sisäilman mittaukset toteutettiin. Ulkoilman mittaukset tehtiin Tampereen yliopiston ATMo-lab mobiililaboratoriolla.

Päiväkotien hiukkaslukumääräpitoisuuksien keskiarvot olivat väliltä $0,21-1,8 \times 1/\text{cm}^3$ ja keuhkodepositoiva pinta-alapitoisuudet väliltä $1,1-5,2 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Vastaavat ulkoilman pitoisuudet olivat $1,7-29 \times 1/\text{cm}^3$ ja $6,8-59 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Eri huoneiden ulko- ja sisäilman I/O-suhteet vaihtelivat välillä $0,048-0,20$. Huoneiden hiukkaslukumäärä- ja keuhkodepositoivaan pinta-alapitoisuuksiin vaikutti kohottavasti pääsääntöisesti ulkoilman pitoisuuksien kohoaminen ja huoneiden sisällä tai lähihuoneissa ulko-ovien aukaisun seurauksena sisäilmaan virtaavat hiukkaset. Sisäilman keuhkodepositoiva pinta-alapitoisuudet olivat keskimäärin matalammat kuin mitatut taustapitoisuudet. Saadut tulokset olivat paljon matalammat kuin aikaisempien samanlaisten tutkimusten tulokset.

Avainsanat: LDSA, UFP, päiväkotien ilmanlaatu, päiväkotien sisäilman pienhiukkaset, ilmansaasteet

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Tampereen Yliopiston aerosolifysiikan yksikön tutkimusaiheesta keväällä 2023.

Ensiksi haluan kiittää kandiohjaajiani Topi Rönkköä ja Ville Silvosta mielenkiintoisesta tutkimusaiheesta sekä avusta ja viisauksista kandidaatintyön tekemisen aikana. Isot kiitokset kanssa perheelle ja kavereille, joilta irtosi paljon tsemppiä ja apua kandidaatin raapustamiseen.

Tampereella, 3. toukokuuta 2023

Roosa Valijärvi

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto	1
2.	Tutkimuksen teoria ja tausta	2
2.1	Yleistä teoriaa aerosoleista	2
2.2	Hiukkasten lukumäärä ja keuhkodepositoiva pinta-ala	3
2.3	Aerosolit sisäilmassa ja niiden suhde ulkoilmaan	4
2.3.1	Päiväkotien sisäilman erityispiirteitä.	5
2.4	Hiukkasten terveysvaikutukset ja yhteys infektioihin	6
3.	Käytetyt mittalaitteet ja mittauksen toteutus	8
3.1	Kondensaatiohiukkaslaskuri (CPC).	8
3.2	Partector	9
3.3	Mittauksen toteutus	11
4.	Tulosten analyysi.	13
4.1	Ulko- ja sisäilman tulosten esittely	13
4.2	Pitoisuuksien vertailu huoneiden ja päiväkotien välillä	16
4.3	LDSA- ja PN-pitoisuuksien suhteet	18
4.4	Vertailu kirjallisuuteen	20
5.	Yhteenveto	21
	Lähteet	23

1. JOHDANTO

Ilmakehän pienhiukkaset ovat yksi ilmansaasteiden osa-alue ja jokainen ihminen altistuu elämänsä aikana aerosolihiukkasille niin ulko- kuin sisätiloissakin. Kaupunkiympäristöissä, etenkin suurissa kaupungeissa, ilmansaasteet ovat suurin ihmisten terveyttä vaarantava ympäristötekijä, jonka arvioidaan aiheuttavan vuosittain noin seitsemän miljoona ennen aikaista kuolemaa. (World Health Organization 2021a) Halkaisijaltaan alle 2,5 µm pienhiukkaset ovat WHO:n mukaan kaikista vaarallisimpia, sillä ne pääsevät tunkeutumaan keuhkokudokseen ja leviämään elimistöön verenkierron mukana.

Ihmisten viettäessä suurimman osan vuorokaudesta sisätiloissa, on sisäilman aerosolihiukkasten tutkiminen oleellinen osa hiukkassaasteesta aiheutuvien terveyshaittojen ehkäisemisessä. Erilaisista sisätilaympäristöistä päiväkotien ja esikoulujen ilmanlaadusta on julkaistu monia tutkimuksia, mutta näiden sisäilman hiukkaslukumäärä- ja keuhkodepositivaa pinta-alapitoisuuksia tarkastelevia raportteja on hyvin vähän. Tässä kandityössä tutkitaan kahden helsinkiläisen päiväkodin sisäilman hiukkasten hiukkaslukumäärä- ja keuhkodepositivaa pinta-alapitoisuutta.

Tutkimuksen tarkoitus on tutkia päiväkotien sisäilman hiukkaslukumäärä- ja keuhkodepositivaa pinta-alapitoisuutta eri huoneissa sekä sisäilman suhdetta ulkoilmaan. Yhteyttä eri huonetyyppien välillä pyritään tarkastelemaan ja huoneiden pitoisuuksiin vaikuttavia tekijöitä erittelemään. Lisäksi saatuja tuloksia verrataan suhteessa aikaisempiin tutkimuksiin. Suomen suhteellisen hyvän ilmanlaatuilanteen nojalla päiväkotien sisäilman pitoisuuksien voidaan olettaa olevan matalat.

Luvussa 2 käydään läpi mittauksen taustalla olevaa teoriaa ja tutustaan samankaltaisista kokeista käsittelevään kirjallisuuteen. Mittalaitteiden fysikaaliseen taustaan ja mittauksen toteutukseen syvennytään luvussa 3, ja luvussa 4 analysoidaan saatuja tuloksia suhteessa muun muassa ulkoilman pitoisuuksiin ja kirjallisuudessa esiintyviin tuloksiin. Yhteenvedokappaleessa luvussa 5 kootaan vielä keskeisimmät tulokset ja johtopäätökset.

2. TUTKIMUKSEN TEORIA JA TAUSTA

2.1 Yleistä teoriaa aerosoleista

Tässä työssä termillä aerosoli tarkoitetaan nestemäisten tai kiinteiden hiukkasten ja niiden kantajakaasun heterogeenistä seosta. Aerosolihiukkasten halkaisija voi vaihdella muutamasta nanometristä yli 100 mikrometriin. Aerosolihiukkaset jakautuvat primäärisiin ja sekundäärisiin niiden syntyprosessin perusteella. Sekundääriset aerosolihiukkaset syntyvät ilmakehässä kaasukomponenteista kemiallisten reaktioiden seurauksena. Primääriset aerosolihiukkaset taas erittyvät suoraan ilmakehään hiukkaslähteestä. (Hinds 1982)

Aerosolihiukkaset on perinteisesti jaettu kolmeen kokoluokkaan. Pienimmän kokoluokan hiukkaset ovat ultrapienet hiukkaset ($d < 100$ nm) tai Aitkenin välin hiukkaset. Niillä on usein lyhyt elinikä ja ne kasvavat nopeasti suurempaan kokoluokkaan kiinnittymällä isompien hiukkasten pinnalle niiden suuren diffuusiokertoimen takia. Aitkenin välin hiukkaset toimivat myös tiivistymisytiminä kondensaatioreaktiossa, joissa hiukkasten pinnalle tiivistynyt höyry kasvattaa niiden halkaisijaa. Halkaisijaltaan yli 2 μm hiukkaset eli karkeat hiukkaset syntyvät yleensä mekaanisen kulumisen seurauksena ja poistuvat ilmakehästä suhteellisen nopeasti sedimentaation seurauksena. Hiukkasten kokoväliä, joka on ultrapienien ja karkeiden hiukkasten välissä (0,1–2,0 μm), kutsutaan akkumulaatioväliksi (eng. accumulation range). Tämän kokovälin hiukkasten poistuminen diffuusion tai sedimentoitumisen seurauksena on hidasta. Täten tämän kokovälin hiukkasten pitoisuudet akkumuloituvat ilmakehässä. Akkumulaatiovälin hiukkaset sisältävät yleensä orgaanisia ja liukenevia epäorgaanisia yhdisteitä, ja poistuvat ilmakehästä useimmiten sateen mukana. (Marley ja Gaffney 2005)

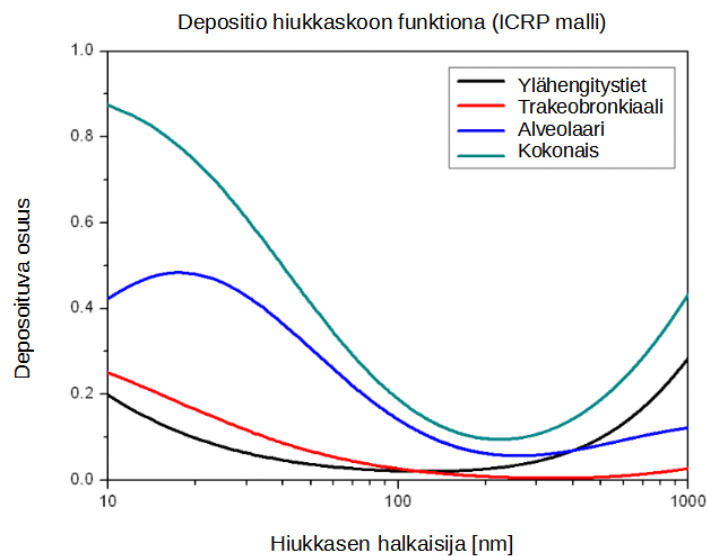
Koon ja muodostumisprosessin lisäksi ilmakehän aerosolihiukkaset jakautuvat luonnollisiin ja antropogeenisiin eli ihmisen toiminnasta aiheutuviin. Primäärisiä, luonnosta lähtöisin olevia hiukkasia ovat esimerkiksi metsäpaloissa muodostuva noki, merisuola ja pöly aavikoilta. Hiukkaset eivät leiju ilmassa pitkiä aikoja, yleensä vain muutaman viikon. (Hamilton 2015) Ihmisten toiminnasta aiheutuvia hiukkasia tulee esimerkiksi teollisuudesta ja liikenteestä. Moottoriajoneuvot tuottavat hiukkasia polttoaineiden palamisen sekä kulku-
neuvojen komponenttien, kuten jarrupäällysteiden, kytkimen ja renkaiden kulumisen yhteydessä. Nämä hiukkaset koostuvat muun muassa hiilestä ja erilaisista metalleista kuten raudasta Fe, kuparista Cu ja lyijystä Pb. (Belis et al. 2013)

Edellä mainittujen prosessien lisäksi ihmiset tuottavat ilmaan hengitystieaerosoleja (eng. respiratory aerosol) aina uloshengityksen yhteydessä. Näitä aerosolihiukkasia erittyy muun muassa ihmisen yskiessä, aivastaessa, puhuessa ja huutaessa. Suurin osa uloshengitetyistä hiukkasista on kooltaan alle $5\ \mu\text{m}$, ja näistä iso osa on alle $1\ \mu\text{m}$. Hengitystieaerosoleja erittyy sekä terveiltä ihmisiltä, että heiltä, jotka ovat sairastuneet hengitystieinfektioon. Hengittäminen tuottaa keskimäärin 7200 aerosolihiukkasta per litraan uloshengitettyä ilmaa, mutta taudinaiheuttajia sisältävien aerosolihiukkasten erityys riippuu monesta tekijästä, esimerkiksi ihmisen iästä, taudin vaiheesta ja kehonpainoindeksistä. (Wang et al. 2021)

2.2 Hiukkasten lukumäärä ja keuhkodepositoituva pinta-ala

Aerosolien ominaisuuksia tutkittaessa käytetään useita parametreja. Tärkeimpiä tutkimuksissa käytettyjä parametreja ovat esimerkiksi aerosolien hiukkaskoko, hiukkaspitoisuus ja massapitoisuus. Tässä työssä mitataan aerosolien keuhkodepositoivaa pinta-alapitoisuutta (eng. Lung deposited surface area, LDSA) ja hiukkaslukumääräpitoisuutta.

Hiukkaslukumääräpitoisuus tarkoittaa hiukkasten lukumäärää tilavuusyksikköä kohden, yleensä sen yksikkönä on käytetty $1/\text{cm}^3$ tai kpl/cm^3 . Cheung et al. tutkimuksessa (2013) havaittiin, että kaupunkiympäristössä hiukkaslukumäärää dominoivat ultrapienen kokovälin hiukkaset ($d < 0,1\ \mu\text{m}$) ja noin 91 % ilman hiukkasista oli ultrapieniä hiukkasia. Ultrapienillä hiukkasilla on kokoon nähden suuri pinta-ala, mutta pieni massapitoisuus. Täten hiukkaslukumäärä on massapitoisuutta parempi mittari pienimpien hiukkasten pitoisuuksia tutkittaessa etenkin kaupunkiympäristössä.



Kuva 2.1. Hiukkasten depositio ihmisen hengitysteihin hiukkaskokovälillä 10–1000 nm, kuva on muokattu Naneosin LDSA-dokumentista (Naneos particle solutions gmbh 2021)

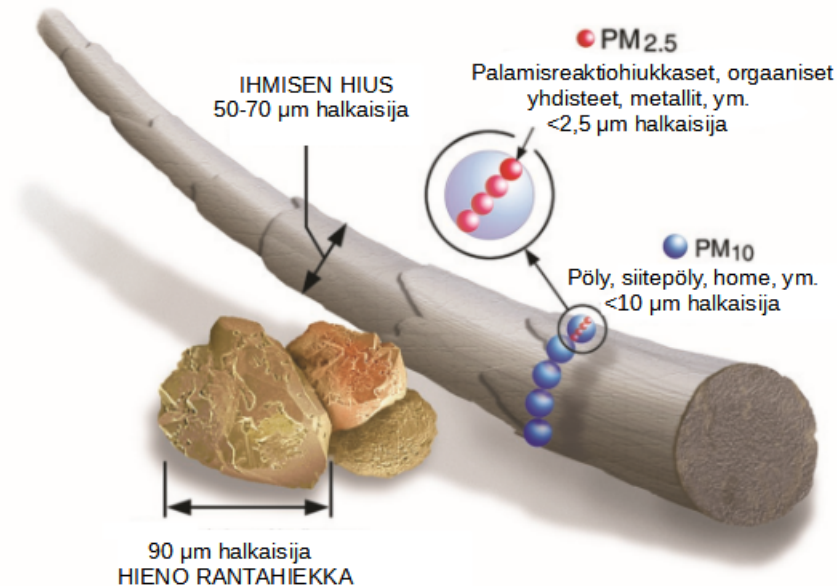
Hiukkasten LDSA-pitoisuus ilmassa kertoo keuhkojen syvimpiin osiin, esimerkiksi keuhkorakkuloihin, tunkeutuvan ja jäävän pienhiukkasaineksen pinta-alapitoisuutta. Kuvassa 2.1 on havainnollistettu hiukkasten depositio ihmisen hengitysteihin hiukkaskoon funktiona. Alveolaarisella alueella tarkoitetaan keuhkojen syvimpiä osia, esimerkiksi keuhkorakkuloita. Trakeobronkiaalisella alueella tarkoitetaan henkitorvea ja keuhkoputkia. Vastaaville alueille laskeutuvan hiukkasaineksen LDSA-pitoisuuksista käytetään lyhenteitä A-LDSA (eng. Alveolar lung deposited surface area) ja TB-LDSA (eng. Tracheobronchial lung deposited surface area). Kuvasta nähdään, että depositio keuhkojen syvimpiin osiin on suurinta halkaisijaltaan alle 100 nm hiukkasilla. LDSA:ta käytetään mittarina pienhiukkasten haitallisuutta tutkittaessa ja sen yksikkö on $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Tähän asti muutamassa tutkimuksessa on osoitettu LDSA-pitoisuuksien olevan keskeinen mittari joidenkin terveysvaikutusten arvioinnissa. Esimerkiksi Aguilera et al. (2016) löysi yhteyden LDSA-pitoisuuksien ja valtimonkovettumataudin välillä ja Henning et al. (2018) sydän- ja verisuonitautien aiheuttamaan kuolleisuuteen. Tällä hetkellä tutkimuksia LDSA-pitoisuuksista eri ympäristöissä on julkaistu hyvin rajallinen määrä, eikä kokonaisvaltaista ymmärrystä pitoisuuksien vaikutuksesta ihmisten terveyteen ole vielä saatu muodostettua (Salo et al. 2021).

2.3 Aerosolit sisäilmassa ja niiden suhde ulkoilmaan

Sisäilman aerosolihiuksat ovat sekoitus hiukkasia, jotka ovat päässeet kulkeutumaan sisätiloihin ulkoa ja hiukkasia, jotka ovat erittyneet sisätilan päästölähteistä tai muodostuneet sisäilmassa. Ulkoilman aerosoleja kulkeutuu sisätiloihin ikkunoiden, ovien ja ilmanvaihtojärjestelmien kautta sekä rakennusten seinien ja perustuksien halkeamista. Ulkoilman hiukkasista akkumulaatiokokovälin hiukkasia kulkeutuu eniten sisätiloihin. (Afshari et al. 2013) Sisätiloissa aerosolihiuksia syntyy muun muassa ruuanlaiton, tupakoinnin ja tulenteon, esimerkiksi kynttilänpolton, yhteydessä. Lisäksi erilaiset ihmisten toiminnat, kuten kävely ja imurointi, nostattavat mekaanisesti ilmaan hiukkasia, jotka ovat valmiiksi pinnoille depositeineita. Tämä aiheuttaa hetkellisesti kohonneen hiukkaskonsentraation sisäilmaan (Morawska et al. 2017), (Ferro et al. 2004).

Koska ulkoilma vaikuttaa osaltaan sisäilman aerosolikoostumukseen, on rakennusten sijainnilla olennainen merkitys niiden sisäilmanlaatuun. Esimerkiksi valtateiden ja muun liikenteen vieressä ajoneuvot tuottavat voimakkaita päästöjä. Ilmatieteen laitoksen mukaan (2021) Suomessa ilmanlaatu on pienhiukkasten osalta suurimmassa osassa maata hyvä tai tyydyttävä. Kaupungit ovat Suomessa pienempiä ja harvempaan rakennettuja eikä liikenne ei ole yhtä vilkasta, kuin esimerkiksi Keski-Euroopassa. Pienhiukaspäästöt jaetaan yleisesti kahteen kategoriaan: halkaisijaltaan alle 2,5 mikrometrin pienhiukkasiin ($\text{PM}_{2,5}$ = Particulate Matter smaller than 2,5 μm) ja alle 10 mikrometrin hengitettäviin hiukkasiin (PM_{10} = Particulate Matter smaller than 10 μm). WHO:n linjauksen

mukaan $PM_{2,5}$ -massapitoisuuksien vuosikeskiarvon ei tulisi ylittää $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eikä PM_{10} -massapitoisuuksien vuosikerkiarvon $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Suomessa $PM_{2,5}$ -massapitoisuudet ovat matalat ja ylittävät harvoin WHO:n suosituksia. Kuvassa 2.2 on havainnollistettu eri hiukkaskokoja.



Kuva 2.2. PM_{10} ja $PM_{2,5}$ suhteessa ihmisen hiukseen, kuva on muokattu Wikimedia Commons:n arkistokuvasta (Environmental Protection Agency 2010).

LDSA- tai hiukkaslukumääräpitoisuuksille ei ole olemassa samanlaisia suositusarvoja, kuin $PM_{2,5}$:n ja PM_{10} :n massapitoisuuksille. WHO (2021b) on kuitenkin julkaissut lausunnon hyvistä käytänteistä koskien ultrapieniä hiukkasia. Käytänteiden mukaan matalana hiukaspitoisuutena voidaan pitää alle $1000 \text{ 1}/\text{cm}^3$ vuorokausikeskiarvoa ja korkeana pitoisuutena voidaan pitää yli $10\,000 \text{ 1}/\text{cm}^3$ vuorokausikeskiarvoa tai $20\,000 \text{ 1}/\text{cm}^3$ tuntikeskiarvoa. Suomessa pääkaupunkiseudulla LDSA-pitoisuuksien vuosikeskiarvo on noin $20 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ vilkasliikenteisessä ympäristössä. Tiheään rakennetulla pientaloalueella pitoisuudet ovat keskimäärin väliltä $11\text{--}12 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja maaseutu-ympäristössä noin $8,0 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ (Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY 2023).

2.3.1 Päiväkotien sisäilman erityispiirteitä

Tutkimuksia juuri päiväkotien LDSA-pitoisuuksista on hyvin vähän. Pienhiukkastutkimuksessaan Rim et al. (2017) havaitsivat neljän päiväkodin LDSA-pitoisuuden vaihtelevan välillä $16,3\text{--}78,8 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja pitoisuudet olivat korkeammat kuin paikallinen taustapitoisuus ($11\text{--}19 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$). Taustapitoisuudella tarkoitetaan ilmakehän ilmansaasteiden pitoisuuksia sellaisessa paikassa, johon paikalliset päästölähteet eivät suoraan vaikuta. On kuitenkin huomioitava, että tutkimus suoritettiin Etelä-Korean pääkaupungissa Sou-

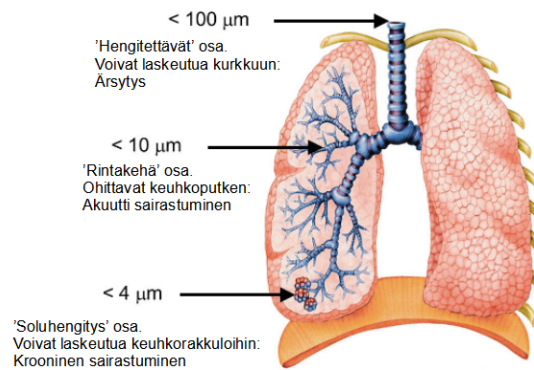
lissa, jonka ilmansaastetilanne huomattavasti on vakavampi, kuin Suomessa. Tulokset eivät siis täysin suoraan kelpaa vertaisaineistoksi, mutta korostavat lisätutkimuksien tarvetta päiväkotien ilmanlaadun suhteen. Toisessa tutkimuksessa Chen et al. (2016) mittaivat LDSA-pitoisuuksia kolmessa singaporelaisessa alakoulussa, ja LDSA-pitoisuuksien havaittiin olevan keskimäärin $115\text{--}118 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ sinä aikana, kun koulut olivat käytössä, ja $72\text{--}87 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ koulujen aukioloajan ulkopuolella. Tutkimuksessa sisäilman LDSA-pitoisuudet olivat matalammat kuin sisäilman mittauksen aikaiset ulkoilman pitoisuudet, mutta korkeammat kuin paikalliset taustapitoisuudet. Singaporen korkeat sisäilman pitoisuudet johtuvat todennäköisimmin luokahuoneiden tuuletinavusteisesta luonnollisesta ilmanvaihdosta, minkä takia ilmanvaihto ulko- ja sisäilman välillä oli korkeaa.

Rim et al. (2017) havaitsivat samassa tutkimuksessa päiväkotien hiukkaslukumääräpitoisuuksien vaihtelevan välillä $9650\text{--}23\,430 \text{ 1}/\text{cm}^3$. Pitoisuudet olivat yhteneväisesti koholla aina päiväkotien ollessa käytössä ja laskivat tyhjillään oloaikana. Tutkimuksessa mukana olleissa päiväkodeissa ei ollut mekaanista tuuletusjärjestelmää, vaan tuulettaminen hoidettiin avaamalla ikkunoita vähintään neljä kertaa päivässä puolesta tunnista tuntiin. Ikkunoiden aukiolonajan huomattiin aiheuttavan noin 30–54 % osuuden päivittäiseen hiukkasaltistumiseen. Rufo et al. (2015) tutkivat lasten altistumista ultrapienille hiukkasille yhteensä 35 huoneessa kymmenessä eri portugalilaisessa esikoulussa. Esikoulujen sisäilman pienhiukaspitoisuudet olivat keskimäärin $8700 \text{ 1}/\text{cm}^3$ ja vaihtelivat välillä $3800\text{--}16000 \text{ 1}/\text{cm}^3$ koulusta riippuen. Pitoisuudet eivät poikenneet merkittävästi tutkimuksessa samaan aikaan mitatuista ulkoilman pienhiukaspitoisuuksista ($9300 \text{ 1}/\text{cm}^3$).

2.4 Hiukkasten terveysvaikutukset ja yhteys infektioihin

Ympäristön hiukkaset ovat yksi ilmansaasteiden osa-alue ja niillä on löydetty yhteys monien negatiivisten terveysvaikutusten kanssa. Voidaan yleistää, että mitä pienempiä hiukkaset ovat, sitä syvemmälle ne pääsevät laskeutumaan hengitysteihin. Halkaisijaltaan alle 10 mikrometrin hiukkasilla on todettu olevan merkittävin vaikutus ihmisten terveyteen. Hiukkaset, jotka ovat halkaisijaltaan 5–10 μm , laskeutuvat suurimmaksi osaksi henkitorveen ja keuhkoputken alkuosiin. Tätä pienemmät hiukkaset, 1–5 μm , pystyvät tunkeutumaan hengitystiehyisiin ja keuhkorakkuloihin asti. Näin hiukkaset kykenevät vaikuttamaan kaasujen vaihtumiseen keuhkoissa ja voivat päätyä lopulta verenkiertoon. Kuvassa 2.3 on havainnollistettu hiukkasten laskeutumista keuhkojen eri osiin. Pienimmät hiukkaset ovat niin pieniä, että ne lähestyvät ominaisuuksiltaan kaasumolekyylejä. Ne kykenevät tunkeutumaan keuhkorakkuloista keuhkokudoksen soluihin tai voivat päätyä yhtä lailla verenkiertoon. Hiukkassaasteelle altistumisen on todettu oleva yhteydessä muun muassa sydän- ja verisuonitautien sekä kroonisten hengitystietautien pahentumiseen, astmaoireiden ilmenemiseen ja ennen aikaisiin kuolemiin. (Kim et al. 2015)

Sen lisäksi, että aerosolihiukkaset jo itsessään ovat terveystriski, toimivat ne erilaisten taudinaiheuttajien, esimerkiksi virusten, levittäjinä. Hengitystieinfektioon sairastuneen ihmisen tuottamat hengitystieaerosolit voivat sisältää esimerkiksi tarttuvia viruksia. Näiden aerosolien laskeutuminen terveeseen ihmiseen hengitysteihin voi aiheuttaa tartunnan (Wang et al. 2021). Gralton et al. 2013 tutkivat esimerkiksi influenssa, RVS -ja metapneumovirusen erittymistä hengitystieinfektioihin sairastuneilla ihmisillä, ja huomasivat alle 5 µm hiukkasten sisältävän enemmän virus-RNA:ta kuin tätä suurempien hiukkasten. Aerosolihiukkaset pysyvät ilmassa pitkään, ja voivat kerääntyä huonosti ilmastoituihin tiloihin ja ihmiset voivat hengittää niitä sekä lyhyiltä että pitkiltä välimatkoilta hiukkaslähteestä.



Kuva 2.3. Erikokoisten hiukkasten laskeutuminen keuhkon ero osiin, kuva on muokattu Wikimedia Commons:n arkistokuvasta (Horwell 2015).

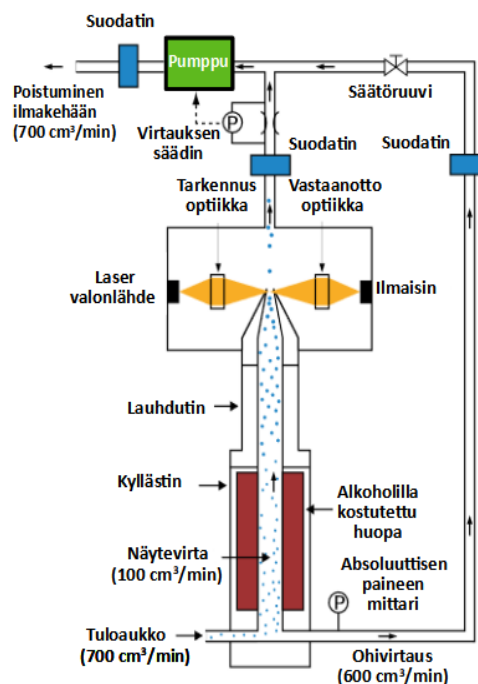
Lapset ovat erityisen alttiita hiukkasille, sillä heidän immuunijärjestelmänsä ja keuhkonsa eivät ole täysin kehittyneet, ja he hengittävät enemmän ilmaa suhteessa kehonpainoon kuin aikuiset. Lisäksi lapset ovat vielä kehitysvaiheessa, jossa heidän sisäelimensä ja kudoksensa kasvavat nopeasti. Kodin jälkeen päiväkotia on sisätila, jossa pienet lapset viettävät eniten aikaa. (Nunes et al. 2015) Siksi se on ympäristönä oleellinen tutkimuskohde, kun tarkastellaan lasten altistumista pienhiukkasille.

3. KÄYTETYT MITTALAITTEET JA MITTAUKSEN TOTEUTUS

Tässä luvussa perehdytään siihen, mitä mittalaitteita tutkimuksessa käytettiin ja mikä niiden toimintaperiaate oli. Lisäksi käydään läpi itse mittauksen käytännön toteutus.

3.1 Kondensaatiohiukkaslaskuri (CPC)

Osa aerosolien hiukkasista ovat niin kooltaan niin pieniä, että niiden havaitseminen optisilla menetelmillä ei ole mahdollista. Kondensaatiohiukkaslaskurin, eli CPC:n (engl. condensation particle counter) toiminta perustuu siihen, että hiukkasia kasvatetaan supersaturaatio ja kondensaatio -reaktioilla suuremmaksi niin, että ne voidaan havaita optisesti. Tämän työn kokeellisessa osiossa käytetty kondensaatiohiukkaslaskuri oli TSI CPC Model 3007, jota käytettiin hiukkaslukumääräpitoisuuksien mittaamiseen. Laitteen toimintaperiaate on havainnollistettu kuvassa 3.1.

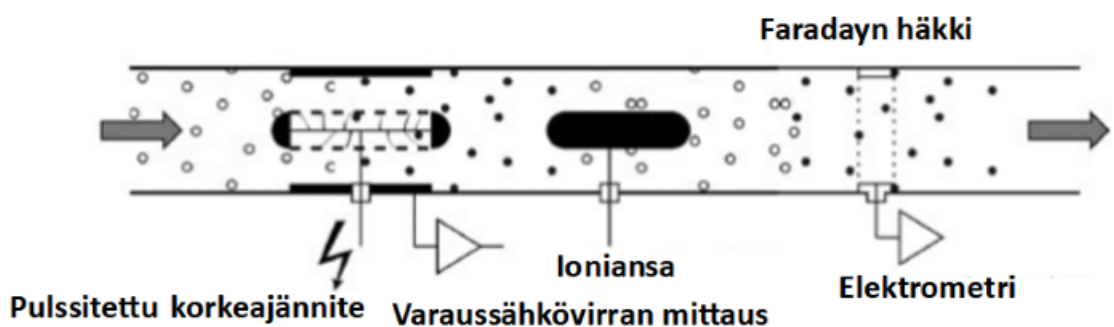


Kuva 3.1. CPC 3007 toimintaperiaate, kuva on muokattu laitteen käyttöohjeesta (TSI Incorporated 2022).

CPC koostuu pääpiirteissään kyllästimestä, lauhduttimesta ja optisesta ilmaisimesta. Ensiaksi aerosolinäyte liikkuu lämmitettyyn kyllästimeen, jossa höyrystynyttä alkoholia sekoituu hiukkasvirtaan. Tämän jälkeen aerosolinäyte ja alkoholi päätyvät lauhduttimeen, jossa alkoholi supersaturoituu. Aerosolinäytteen hiukkaset toimivat tiivistymisytiminä supersaturoituneelle alkoholihöyrylle ja alkoholi tiivistyy hiukkasten pinnalle. Näin hiukkasten halkaisija kasvaa ja ne voidaan havaita ilmaisimella laservalon avulla. Mallin 3007 CPC havaitsee pienimmillään 10 nm ja maksimissaan 1000 nm hiukkasia. Laite kykenee mittaamaan hiukkaspitoisuuksia väliltä $0 - 10^5$ $1/\text{cm}^3$ ja lukemien tarkkuus on $\pm 20\%$. (TSI Incorporated 2022)

3.2 Partector

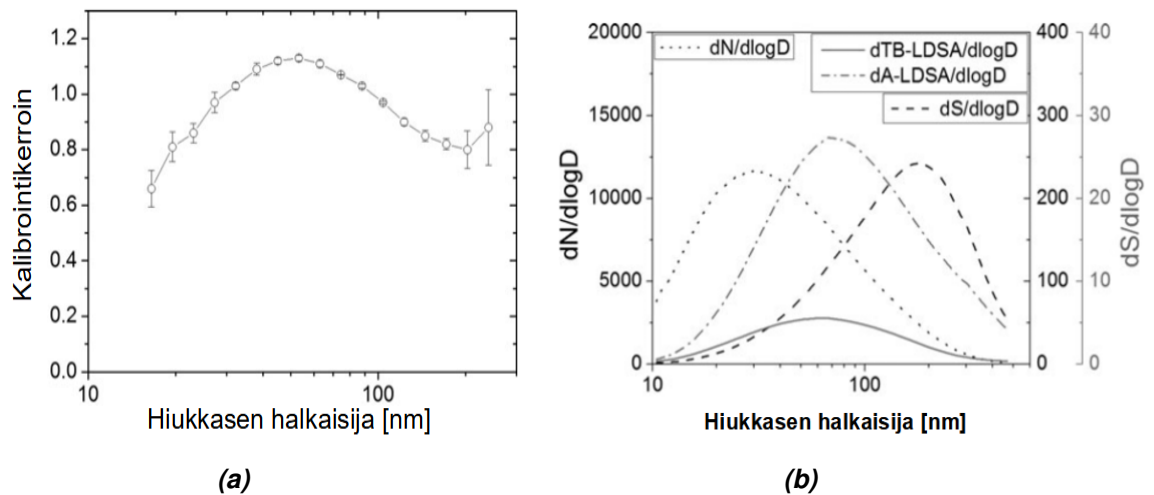
Keuhkocodeposituneen pinta-alan mittaamiseen käytettiin Partectoria, joka on yksinkertainen diffuusiovaraukseen perustuva aerosolimitari. Laitteen toimintaperiaatetta on esitelty kuvassa 3.2. Laitteen läpi kulkevat hiukkaset varataan yksinapaisella diffuusiovaraajalla. Varaaja käynnistyy ja sammuu jaksollisesti, jolloin syntyy jakson mukaisesti joko joukko ja varautuneita tai varauksettomia hiukkasia. Seuraavaksi hiukkaset liikkuvat Faradayn häkkiin, jolloin niiden muodostama sähkövaraus Q ei pääse vaikuttamaan häkin ulkopuolisiin sähkökenttiin. Faradayn häkille syntyy Gaussin lain nojalla vastakkaismerkkinen ja yhtä suuri sähkövaraus $Q' = -Q$. Häkin sähkövaraus on siis verrannollinen aerosolihukkasten sähkövaraukseen. Koska hiukkasten varaus muuttuu jaksollisesti, indusoituu Faradayn häkin ja sen maadoituksen välille sähkövirta I_I . Elektrometri mittaa tätä indusoitunutta sähkövirtaa, jonka avulla Partector laskee hiukkasten keuhkocodeposituneen pinta-alapitoisuuden. (Fierz et al. 2014)



Kuva 3.2. Kuva Partectorin toimintaperiaatteesta, kuva on muokattu laitteen käyttöohjeesta (Fierz et al. 2014)

Pieni osa Partectorin läpi kulkevista hiukkasista deponoituu elektrometrille diffuusion seurauksesta, eikä poistu laitteesta. Deposituneet hiukkaset aiheuttavat elektrometrille ylimääräisen sähkövirran I_D . Sähkövirta I_D on noin 1,2% indusoituneen sähkövirran I_I suuruudesta 20 nm hiukkasille, ja I_D laskee hiukkasen halkaisijan kasvaessa. Deposi-

tunutta sähkövirtaa voidaan siis pitää mittauksen kannalta merkitysemättömänä. Koska Partectorin toiminta perustuu aerosolihukkasiin siirretyn varauksen suuruuteen, jo valmiiksi negatiivisesti tai positiivisesti varatuille hiukkasille laite mittaa virheellisen LDSA – arvon. (Fierz et al. 2014). Partector mittaa LDSA-pitoisuuksia väliltä 2–20 000 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja havaitsee hiukkasia halkaisijaväliltä 0,01–10 μm . Laite ilmoittaa LDSA-pitoisuuden $\pm 30\%$ tarkkuudella. (Naneos particle solutions gmbh 2019) Partectorin valmistuttajan Naneosin mukaan (2019) mukaan laite mittaa LDSA-pitoisuuksia tarkasti vain 20–400 nm hiukkasille, mutta sillä voidaan mitata myös halkaisijaltaan yli mikrometrin kokoisia hiukkasia.



Kuva 3.3. (a) Kalibrointikerroin A-LDSA:lle hiukkasen halkaisijan funtiona ja (b) pinta-ala- ja hiukkaslukumääräjakauma Zürichissa 2008 sekä vastaavat LDSA-jakaumat. Kuvat on muokattu Partectorin käyttöohjeesta (Fierz et al. 2014).

Partector on kalibroitu mittaamaan alveolaarista keuhkocodepositoivaa pinta-alapitoisuutta (A-LDSA). Kalibrointia varten valmistuttajat ovat valinneet kalibrointikertoimen, joka on riippuvainen hiukkasen halkaisijasta. Kuvassa 3.3 on (a)-kohdassa havainnollistettu kyseinen hiukkaskoko-kerroin-riippuvuus, sekä kuvaaja hiukkaslukumääräjakaumasta ja hiukkasten pinta-alajakaumasta. (b)-kohdan kuvaajaan on lisäksi laskettu pinta-alajakauman pohjalta LDSA-jakauma, joka sisältää A-LDSA-jakauman ja TB-LDSA-jakauman. Hiukkaskokojakauma on laskettu Sveitsin ilmansaasteiden seurantaverkon (eng. National Air Pollution Monitoring Network, NABEL) Zürichin mitta-aseman datasta, joka sisälsi koko vuoden 2008 datasetin. (Fierz et al. 2014)

Kaavalla 3.1 lasketaan painotettu kalibrointikerroin \bar{c} . c on kalibrointikerroin halkaisijan kohdalla d_i 3.3 (a)-kuvaajasta. $\frac{dN}{d\log D}(d_i)$ on d_i -halkaisijaa vastaava hiukkaslukumäärällä painotetun hiukkaskokojakauman arvo (b)-kuvaajasta.

$$\bar{c} = \frac{\sum_i \frac{dN}{d\log D}(d_i) \cdot c(d_i)}{\sum_i \frac{dN}{d\log D}(d_i)} \quad (3.1)$$

Hiukkaskoon ja kalibrointikerroimen välinen riippuvuus on arvioitu tarpeeksi heikoksi, että jokaista laitteen mittamaa hiukkasta kohden voidaan käyttää yhtä kerrointa. A- ja TB-jakaumien maksimi on noin 70 nm kohdalla. Kun kalibrointikerroin lasketaan painotetusti kyseisellä hiukashalkaisijalla kaavan 3.1 mukaan, saatiin kalibrointikerroimen arvoksi 0,99, joka vastaa kalibrointikerrointa noin 95 nm hiukkaselle. Yksinkertaisuuden vuoksi valmistuttajat päättivät valita Partectorin käyttöä varten 100 nm vastaavan kalibrointikerroimen. (Fierz et al. 2014)

3.3 Mittauksen toteutus

Tämän kandidaatintyön mittaukset toteutettiin kahdessa helsinkiläisessä päiväkodissa 6.-7.3.2023. Molemmista päiväkodeista kerättiin dataa LDSA-pitoisuuksista noin yhden työpäivän ajalta (08:00-16:00) neljästä eri huoneesta, sekä mitattiin hiukkaslukumääräpitoisuuksia noin yhden tunnin ajan samoista huoneista. Huoneita oli yhteensä siis kahdeksan. Päiväkodeista puhuttaessa käytetään tekstissä lyhenteitä PA ja PB (Päiväkoti A ja Päiväkoti B).

Ensimmäiseksi suoritettiin mittaukset PA:ssa 6. päivänä. LDSA-mittauksia varten oli käyty asentamassa ja käynnistämässä Partectorit jo edellisen viikon perjantaina 3. päivänä. Huoneissa käytiin mittaamassa hiukkaslukumääräpitoisuuksia käsikantoisella CPC:llä. Mittauksien päätteeksi Partectorit purettiin pois ja käytiin asentamassa toiseen päiväkotiin. PB:ssä käytiin suorittamassa mittaukset 7. päivänä samalla kaavalla kuin PA:ssa. Molemmat päiväkodit sijaitsivat noin 400–500 metrin etäisyydellä vilkasliikenteisestä tiestä.

Huone	CPC-mittausaika	Huoneen tyyppi
PA1	08:53–09:53	Ryhmähuone
PA2	10:17–11:21	Eteinen
PA3	11:43–13:10	Ruokasali
PA4	13:16–14:18	Ryhmähuone
PB1	08:28–09:30	Ryhmähuone
PB2	10:06–11:08	Ryhmähuone
PB3	13:11–14:12	Ruokasali
PB4	14:19–15:20	Eteinen

Taulukko 3.1. Eri huoneiden CPC-mittauksien ajanjaksot sekä huoneiden tyypit

Mittauksia varten pyrittiin valitsemaan keskenään erilaisia huoneita päiväkodin sisällä. Molemmista päiväkodeissa Partectoreista asennettiin yksi ruokalaan ja eteiseen, sekä yhdet kappaleet kahteen eri ryhmähuoneeseen. Partectorit asennettiin noin 1,70–2,00 metrin korkeudelle lattian pinnasta ja CPC pyrittiin asettamaan noin 1,50 metrin korkeudelle. Taulukossa 3.1 on esitelty eri huoneiden CPC-mittauksien ajanjaksot sekä karkeas-

ti huoneiden tyyppi (eteinen, ruokala, ryhmähuone jne.). Huoneet on numeroitu yhdestä neljään ja niistä käytetään lyhenteitä PA1, PA2 jne. (Päiväkoti A huone 1, Päiväkoti A huone 2 jne.). Hiukkaslukumäärämittausten aikana mittaja oli koko ajan läsnä huoneissa ja teki muistiinpanoja huoneen olosuhteesta sekä niiden muutoksista. Poikkeus tähän oli PA3 suoritettu mittausta, jolloin CPC jätettiin yksin mittauksen ajaksi. PB1:een asennettun Partectorin käynnistys viivästyi 7. päivän aamuun teknisen vian vuoksi, joten sillä ei saatu kerättyä dataa yhtä pitkältä ajalta kuin muilla Partectoreilla.

Ulkoilman mittadataa kerättiin Tampereen yliopiston ATMo-Lab (Rönkkö et al. 2017) mobiililaboratoriolla. ATMo-Lab oli parkkeerattuna päiväkotien edustalle mittauspäivinä ja mittalaitteet mittasivat hiukkaslukumäärä- ja LDSA-pitoisuuksia koko päivän ajalta (08:00-16:00). Mobiililaboratoriossa LDSA-pitoisuuksia mittasi ELPI+ (Electrical Low Pressure Impactor) ja hiukkaslukumääräpitoisuuksia Airmodus A20 kondensaatiohiukkaslaskuri.



Kuva 3.4. Ilmanpuhdistin Päiväkoti A:n huoneessa 1.

Joka huoneessa, jossa mittauksia suoritettiin, oli asennettu ilmanpuhdistimia, jotka olivat olleet toiminnassa päiväkodin aukioloajan sisällä (06:00–18:00) noin kuuden kuukauden ajan. Päiväkodeista saatu mittaustiedosto ei ole siis verrattavissa normaaliin tilanteeseen. Ilmanpuhdistimet olivat osa laajempaa ilmanlaatu tutkimusta, jota suoritettiin päiväkodeissa samanaikaisesti kandidaatintutkimuksen kanssa. Kuvassa 3.4 on esimerkiksi päiväkotia A:n huoneessa 1 ollut ilmanpuhdistin.

4. TULOSTEN ANALYYSI

Tulosten analyysissä tarkastellaan päiväkotien huoneiden LDSA- ja hiukkaslukumääräpitoisuuksia. Pitoisuuksia vertaillaan huoneiden ja päiväkotien kesken, sekä tarkastellaan pitoisuuksia suhteessa toisiinsa. Lisäksi tarkastellaan LDSA- ja PN-pitoisuuksien sisä- ja ulkoilman suhteita, eli I/O-suhteita (eng. Indoor-to-Outdoor ratio) ja vertaillaan tuloksia suhteessa kirjallisuuteen. Hiukkaslukumäärään viitataan jatkossa lyhenteellä PN (eng. Particle Number, hiukkaslukumäärä) ja päiväkoteihin ja niiden huoneisiin taulukon 3.1 lyhenteillä.

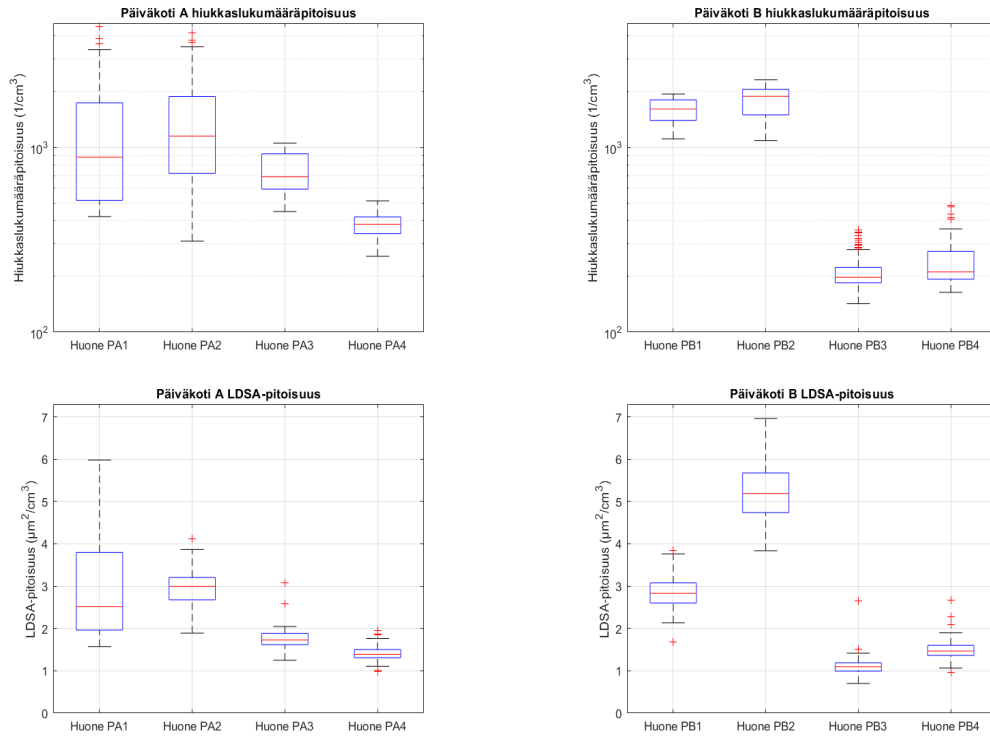
4.1 Ulko- ja sisäilman tulosten esittely

Kuvassa 4.1 on esitetty päiväkotien sisäilman hiukkaslukumäärä- ja LDSA-pitoisuudet. Saadusta datasta valittiin tasan tunnin mittaiset pätkät, jotka keskiarvotettiin 30 sekunnin ajanjaksolla. Laatikoiden keskellä oleva punainen viiva kuvaa otannan mediaania, laatikon alareuna merkkää pitoisuutta, jonka alapuolella on 25 % datapisteistä, ja laatikon yläraja kuvaa pitoisuutta, jonka alapuolelle osuu 75 % kaikista datapisteistä. Laatikosta lähtevät viikset merkaavat mittapisteiden ääriarvoja, joita ei tulkita poikkeamiksi ja itse poikkeamia kuvissa kuvastavat punaiset ristit. Tässä tapauksessa mittapistettä käsitellään poikkeamana, jos sen arvo on yli $q_3 + w \times (q_3 - q_1)$ tai on vähemmän kuin $q_1 - w \times (q_3 - q_1)$. w -kerroin on arvoltaan 1,5, ja q_1 on 25 % ja q_3 75 % rajan pitoisuusarvo.

PA:ssa PN-pitoisuuksien mediaanit vaihtelivat välillä $0,38\text{--}1,2 \times 10^3$ $1/\text{cm}^3$ ja LDSA-pitoisuudet väliltä $1,4\text{--}3,0 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. PA1:n ja PA2:n PN-pitoisuuksissa oli voimakkaampaa vaihtelua muihin huoneisiin verrattuna, esimerkiksi PA1:n viiksien ääriarvot olivat $3,4 \times 10^3$ $1/\text{cm}^3$ ylärajalla ja $0,42 \times 10^3$ $1/\text{cm}^3$ alarajalla. PA1:n LDSA-pitoisuuksissa oli PN-pitoisuuksien tapaan paljon hajontaa, mutta PA2:n LDSA-pitoisuudessa ei esiintynyt PN-pitoisuutta vastaavaa vaihtelua. PA3:n ja PA4:n PN- ja LDSA-pitoisuuksissa esiintyi vähemmän hajontaa ja olivat keskimäärin matalammat suhteessa muihin PA:n huoneisiin.

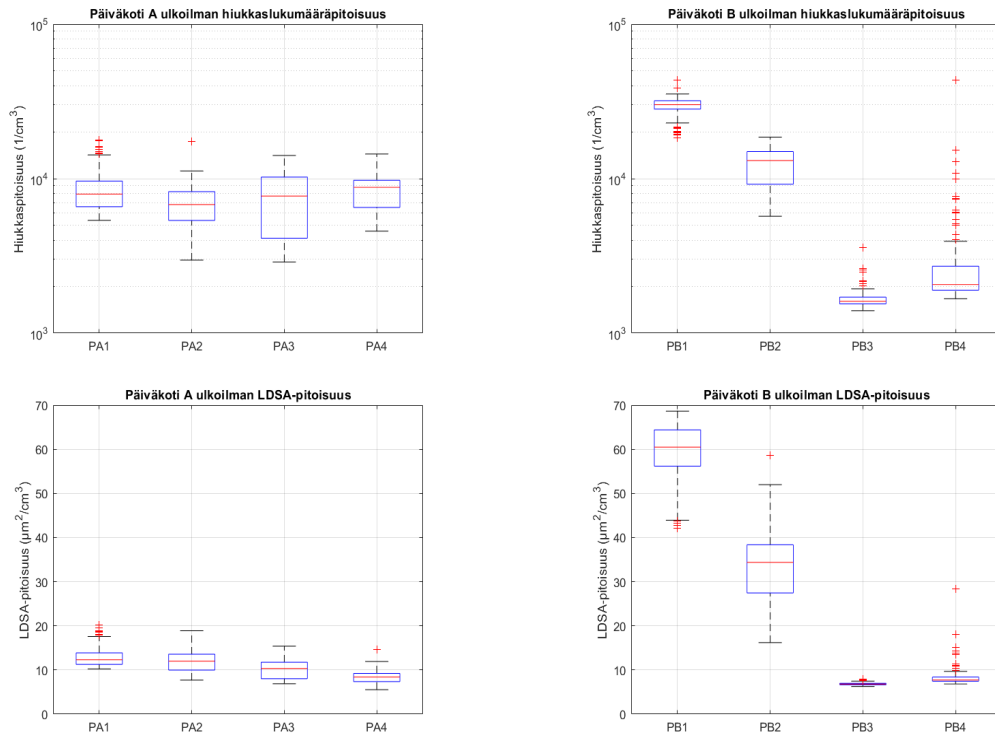
PB:ssä PN-pitoisuuksien mediaanit vaihtelivat välillä $0,20\text{--}1,9 \times 10^3$ $1/\text{cm}^3$ ja LDSA-pitoisuudet väliltä $1,1\text{--}5,2 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. PN- ja LDSA-pitoisuuksien välillä on huomattavissa voimakasta vaihtelua huoneiden välillä. PB1:n ja PB2: PN-pitoisuudet olivat keskimäärin yli kahdeksankertaiset verrattuna PB3:een ja PB4:een.

PB3:n ja PB4:n PN-pitoisuudet pysyivät keskimäärin alle $0,25 \times 10^3$ $1/\text{cm}^3$ ja LDSA-pitoisuudet alle $1,6 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. PB:ssä huoneiden sisällä pitoisuuksissa ei ollut voimakasta hajontaa.



Kuva 4.1. Päiväkoti A:n ja päiväkoti B:n hiukkaslukumäärä- ja LDSA-pitoisuudet huoneittain. Huomio hiukkaslukumääräpitoisuuskuvien logaritminen asteikko.

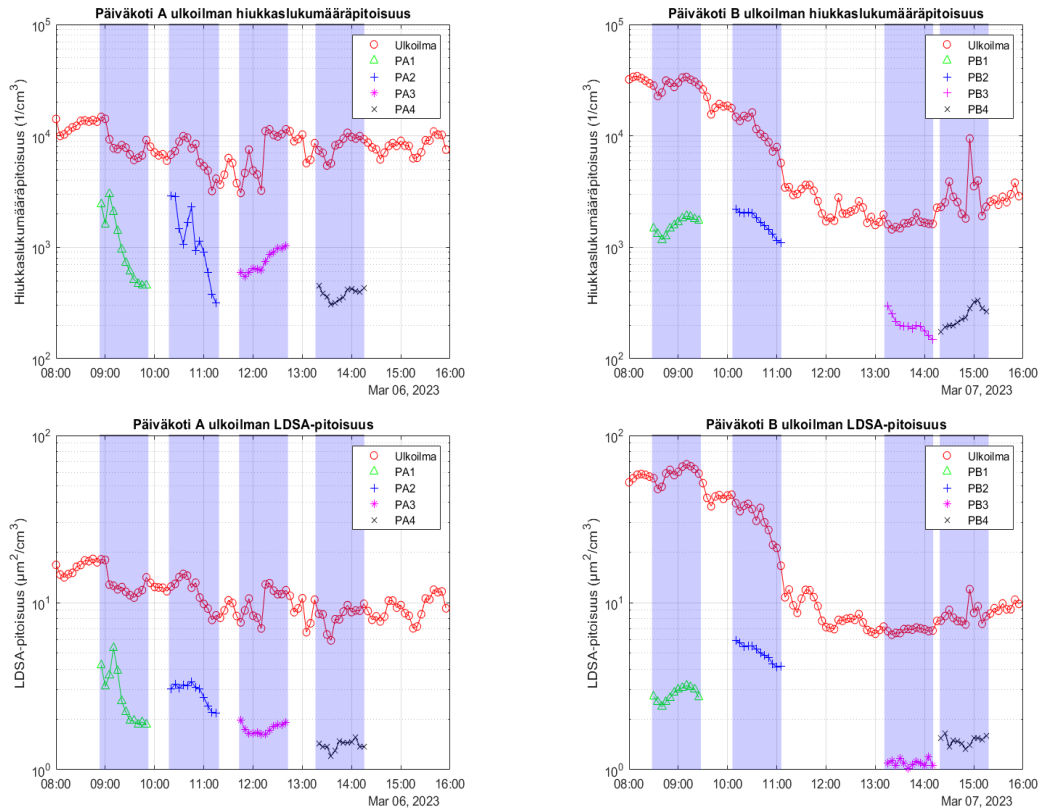
Kuvaan 4.2 on laskettu huonekohtaisesti ulkoilman PN- ja LDSA-pitoisuudet niiltä ajanjaksoilta, jolloin huoneissa suoritettiin hiukkaslukumäärämittauksia. Laatikkokuvaajien piirtämiseen käytetyt parametrit laatikoiden reunojen, ääriarvojen ja poikkeusarvojen kohdalla vastaavat kuvassa 4.1 käytettyjä arvoja. PA:ssa ulkoilman PN- ja LDSA-pitoisuuksien mediaanit vaihtelivat välillä $6,9\text{--}9,0 \times 10^3$ $1/\text{cm}^3$ ja $8,4\text{--}13 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. PB:ssä vastaavat pitoisuudet olivat $1,6\text{--}30 \times 10^3$ $1/\text{cm}^3$ ja $6,8\text{--}59 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. PA:ssa pitoisuudet ovat suhteellisen tasaiset koko mittausjakson aikana, PN:n keskiarvo oli $8,3 \times 10^3$ $1/\text{cm}^3$ ja LDSA:n keskiarvo oli $11 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. PB:ssä ulkoilman pitoisuudet vaihtelevat voimakkaasti päivän aikana; PB1:n ja PB2:n PN-pitoisuudet olivat yli kuusinkertaiset ja LDSA-pitoisuudet yli kolminkertaiset suhteessa PB3:en ja PB4:en.



Kuva 4.2. Päiväkoti A:n ja päiväkoti B:n ulkoilman hiukkaslukumäärä- ja LDSA-pitoisuudet huoneittain. Hiukkaslukumääräpitoisuuden kuvassa on käytetty logaritmistä asteikkoa

Kuvassa 4.3 on esitetty PA:n ja PB:n ulkoilmasta mitattu PN- ja LDSA-pitoisuus ajan funktiona. Sen lisäksi kuvaajiin on piirretty sisäilmasta mitatut LDSA- ja PN-pitoisuudet siltä ajanjaksolta, jolloin huoneissa mitattiin PN-pitoisuuksia. Kyseiset ajanjaksot on korostettu kuviin sinisellä taustavärillä. Kuvaajat on piirretty mittapisteistä, jotka on keskiarvotettu datasta 5 minuutin aikavälillä. Kuvasta nähdään, että PB:ssä PN- ja LDSA-pitoisuudet ovat koholla mittausjakson alkupuolella, noin aikavälillä 08:00–11:00. Kahden ensimmäisen mittausjakson aikana hiukkaspitoisuuksien mediaanit olivat 30×10^3 1/cm³ ja 13×10^3 1/cm³. Kohonneet ulkoilman pitoisuudet johtuvat päiväkodin vieressä, noin 50 metrin päässä, olleesta työmaasta, jonka työkoneen dieselmoottori toimi hiukkaslähteenä.

PB:n ulkoilman pitoisuuksien kohoaminen ajanjaksolla 08:00-11:00 on todennäköisin syy sille, että huoneissa PB1 ja PB2 pitoisuudet olivat suuremmat kuin huoneissa PB3 ja PB4. Vaikka ulkoilman LDSA-pitoisuus on PB2:n mittausjaksolla matalampi, kuin PB1:n mittausjaksolla, on se korkeampi huoneen PB2 sisäilmassa verrattuna PB1:een. PB2:ssa LDSA-pitoisuuden mediaani oli $5,2 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja PB1:ssa $2,8 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, ja niiden suhde on melkein kaksinkertainen. PN-pitoisuuksissa ero ei ole yhtä suuri, PB1:n mediaanin ollessa $1,6 \times 10^3$ 1/cm³ ja PB2:n $1,9 \times 10^3$ 1/cm³.



Kuva 4.3. Päiväkoti A:n ja päiväkoti B:n ulkoilman hiukkaslukumäärä- ja LDSA-pitoisuudet. Kuviin on piirretty ulkoilman lisäksi sisäilman pitoisuudet sekä korostettu ajanjaksot, jolloin huoneissa oltiin mittaamassa hiukkaslukumääräpitoisuuksia. Huomioi logaritminen asteikko.

4.2 Pitoisuuksien vertailu huoneiden ja päiväkotien välillä

Taulukkoon 4.1 on koottu päiväkotien ulko- ja sisäilmasta eri huoneiden LDSA- ja PN-pitoisuuksien mediaanit, keskiarvot, minimi- ja maksimi-arvot ja keskihajonta, sekä näiden keskiarvot päiväkotikohtaisesti. Ulkoilmasta arvot on laskettu niiltä ajanjaksoilta, jolloin huoneissa suoritettiin hiukkaslukumäärämittauksia. Sisäilman keskihajonnan keskiarvoon on sisällytetty mittalaitteiden epätarkkuudet, eli $\pm 20\%$ CPC:n kohdalla ja $\pm 30\%$ Partectorien kohdalla.

PA:ssa hiukkaslukumäärä- ja LDSA-pitoisuuksissa ei ollut huoneiden välillä yhtä paljon hajontaa kuin PB:ssä, mutta toisaalta PB:ssä yksittäisten huoneiden sisällä pitoisuudet pysyivät suhteellisen keskittyneinä kapeammille vaihteluväleille. Esimerkiksi PA:ssa suurin yksittäisen huoneen PN-pitoisuuden maksimi- ja minimiarvon välinen ero oli korkeimmillaan yli kymmenenkertainen, mutta PB:ssä PN-pitoisuuksien minimin ja maksimin suhde oli vain kolminkertainen.

Taulukko 4.1. Koonti sisä- ja ulkoilman mittatuloksista. Sisäilman keskihajonnan keskivirheeseen on sisällytetty mittalaitteiden tarkkuudet (eng. Standard error of the mean, SEM)

Sisäilman pitoisuudet										
Huone	Hiukkaslukumäärä ($\times 10^3 \text{ l/cm}^3$)					LDSA-pitoisuus ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)				
	Mediaani	Keskiarvo	Maksimi	Minimi	SEM	Mediaani	Keskiarvo	Maksimi	Minimi	SEM
PA1	0,89	1,3	4,5	0,92	0,27	2,5	2,9	6,0	1,6	0,88
PA2	1,2	1,4	4,2	0,29	0,93	3,0	2,9	4,1	1,9	0,88
PA3	0,69	0,75	1,1	0,15	0,18	1,7	1,7	3,1	1,3	0,52
PA4	0,38	0,38	0,51	0,076	0,052	1,4	1,4	2,0	1,0	0,42
PB1	1,6	1,6	1,9	1,1	0,32	2,8	2,8	3,8	1,7	0,85
PB2	1,9	1,8	2,3	1,1	0,36	5,2	5,2	7,0	3,8	1,55
PB3	0,20	0,21	0,36	0,14	0,043	1,1	1,1	2,7	0,70	0,33
PB4	0,21	0,24	0,48	0,16	0,048	1,5	1,5	2,7	0,96	0,45
Päiväkoti	Mediaani	Keskiarvo	Maksimi	Minimi	SEM	Mediaani	Keskiarvo	Maksimi	Minimi	SEM
PA	0,79	0,96	2,6	0,36	0,20	2,2	2,3	3,8	1,4	0,68
PB	0,98	0,95	1,3	0,63	0,19	2,6	2,6	4,0	1,8	0,80
Ulkoilman pitoisuudet										
Päiväkoti	Hiukkaslukumäärä ($\times 10^3 \text{ l/cm}^3$)					LDSA-pitoisuus ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)				
	Mediaani	Keskiarvo	Maksimi	Minimi	SEM	Mediaani	Keskiarvo	Maksimi	Minimi	SEM
PA1	7,9	9,0	18	5,4	0,81	12	13	20	10	1,2
PA2	6,8	6,9	17	3,0	0,62	12	12	19	7,7	1,1
PA3	7,7	7,4	14	2,9	0,68	10	10	15	6,9	0,92
PA4	8,8	8,4	14	4,6	0,76	8,4	8,4	15	5,5	0,77
PB1	30	29	44	18	2,7	60	59	69	42	5,4
PB2	13	12	19	5,7	1,1	34	33	59	16	3,0
PB3	1,6	1,7	3,6	1,4	0,15	7,0	6,8	7,9	6,3	0,62
PB4	2,1	3,2	43	1,7	0,30	7,7	8,5	28	6,8	0,77
Päiväkoti	Mediaani	Keskiarvo	Maksimi	Minimi	SEM	Mediaani	Keskiarvo	Maksimi	Minimi	SEM
PA	8,2	8,3	18	2,9	0,72	11	11	20	5,6	1,0
PB	3,2	10	44	1,4	1,1	9,9	24	69	6,3	2,5

PA3 ja PB3 olivat molemmat ruokaloita ja PA3:ssa hiukkaslukumääräpitoisuus oli noin 3,5-kertainen PB3:n verrattuna ja LDSA-pitoisuus 1,5-kertainen. PA3:ssa oli mittauksen alussa noin 20 ihmistä. PB3 oli suurimman osan mittausajasta tyhjänä, lukuun ottamatta mittauksen viimeistä 10 minuuttia, jolloin tilaan saapui 15–20 ihmistä. PA3:n korkeammat pitoisuudet suhteessa PB3:een johtuvat ulkoilman korkeammista pitoisuuksista, sekä mahdollisesti ihmisten liikkeen nostattamista depositeista hiukkasista. Lisäksi PA3 oli seuraava tila tuulikaapin jälkeen, joten huoneeseen on saattanut päästä hiukkasia ulko-oven avauksesta. On kuitenkin huomioitava, että mittaja ei ollut läsnä huoneessa mittauksen aikana, joten tarkkaa tietoa huoneen tapahtumista ei ole.

Eteisten PA2 ja PB4 PN-pitoisuuksien suhde on melkein kuusinkertainen ja LDSA-pitoisuuksien noin kaksinkertainen. PA2:ssa oli mittauksien ajan vaihteleva määrä ihmisiä (noin 5–15), joiden läsnäolo huoneessa painottui mittauksen alkupuolelle. PA2:ssa ollutta ulko-ovea pidettiin auki pariin otteeseen, millä oli hiukkasipitoisuuksia kohottava vaikutus. PB4:ssä oli koko mittauksien ajan 10–15 henkeä. Sisäilman erot pitoisuuksissa johtuvat PA2:n korkeammista ulkoilman pitoisuuksista mittausajaksolla, sekä sisälle kulkeutuneista hiukkasista ulko-oven aukaisun seurauksena.

Eri ryhmähuoneissa (PA1, PA4, PB1 ja PB2) pitoisuudet vaihtelivat keskenään moninai-
sista syistä. Kaikki edellä mainitut huoneet olivat mittauksien aikana tyhjiällä. PB1:ssä ja
PB2:ssä oli korkeimmat PN- ja LDSA-pitoisuudet verrattuna muihin ryhmähuoneisiin joh-
tuen ulkoilman voimakkaammista pitoisuuksista mittausjaksolla. PA1:ssä pitoisuuksissa
oli ryhmähuoneista eniten hajontaa, mikä johtui avonaisesta ulko-ovesta kulkeutuneista
hiukkasista. Matalimmat pitoisuudet olivat PA4:ssä, johtuen todennäköisimmin matalam-
mista ulkoilman pitoisuuksista verrattaessa PB1:een ja PB2:een ja toisaalta huoneeseen
ei päässyt virtaamaan ylimääräisiä hiukkasia, niin kuin huoneeseen PA1.

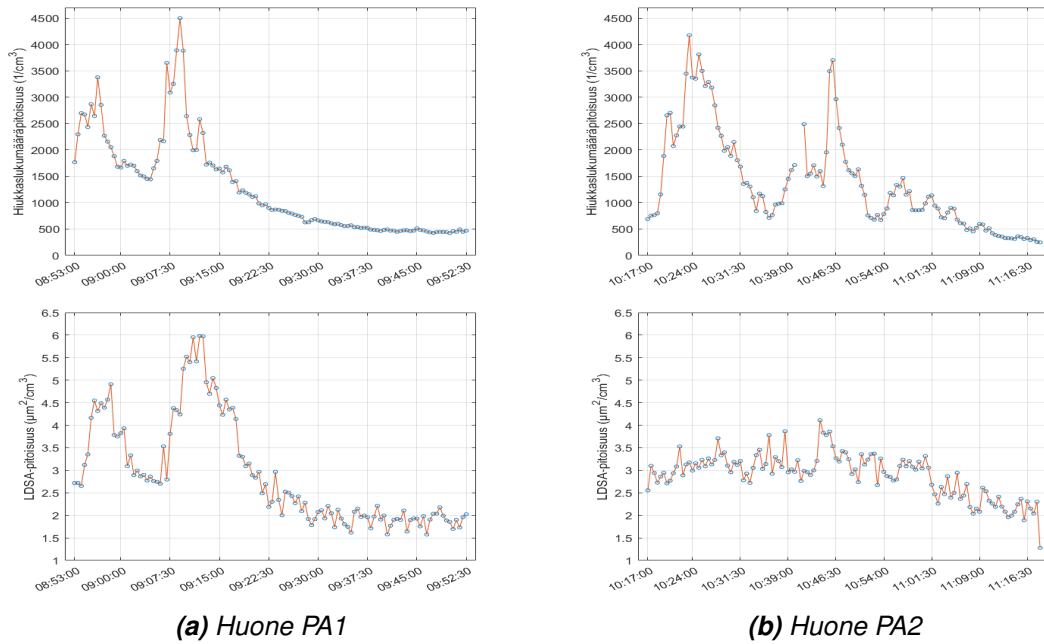
4.3 LDSA- ja PN-pitoisuuksien suhteet

Suurimmassa osassa huoneita PN- ja LDSA-pitoisuudet korreloivat keskenään suhteel-
lisen suoraviivaisesti. PN:n kohoaminen näkyi vastaavasti LDSA-pitoisuuksien kohoami-
sessa ja toisinpäin. Muutama erikoistilanne ilmeni mittauksissa, joita käsitellään tarkem-
min tässä aliluvussa.

Kuvassa 4.4 on esitetty tarkemmin PA1:n ja PA2:n PN- ja LDSA-pitoisuuksia niiden mit-
tausajanjaksolta. Tunnin mittaiselta mittausjaksolta kerätty data on keskiarvotettu 30 se-
kunnin intervalleilla. Molempien huoneiden PN-pitoisuuksissa voidaan havaita voimakkai-
ta piikkejä. PA1:ssä suoritettun mittauksen aikana oli ovi auki huoneen viereiseen etei-
seen, jossa ulko-ovea pidettiin auki jonkin aikaa. Piikit PN-pitoisuuksissa johtuvat ulkoa
tulleista hiukkasista ja pitoisuuksien voidaan nähdä laskevat nopeasti oven sulkemisen
jälkeen. PA2 oli eteinen, josta oli vain muutama metri ulko-ovelle. Huoneessa suoritettujen
mittauksien aikana ulko-ovi aukaistiin pari kertaa, mikä näkyy PN-pitoisuuksissa saman-
laisina piikkeinä kuin PA1:n datassa. Toisin kuin PA1:n kohdalla, PA2:n LDSA-pitoisuudet
ovat suhteellisen tasaiset huolimatta ulkoa kulkeutuneista hiukkasista.

Kuvan 3.3 mukaan hiukkasten LDSA-pitoisuuden suhde hiukkasen halkaisijaan on maksii-
missaan noin 70 nm kohdalla. Toisaalta hiukkaslukumäärän suhde halkaisijaan on maksii-
missaan noi 30 nm kohdalla. Huoneeseen PA2 on todennäköisimmin päässyt paljon pie-
niä hiukkasia mittauksen aikana, luultavasti lähemmäs 10 nm kokoisia. Tämä näkyy hiuk-
kaspitoisuuksien voimakkaassa vaihtelussa, mutta LDSA-pitoisuuksissa ei samanlaista
heiluntaa tapahdu.

PB1:ssä ja PB2:ssä LDSA-pitoisuudet olivat $2,8 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja $5,2 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja PN-pitoisuudet
 $1,6 \times 10^3 \text{ 1}/\text{cm}^3$ ja $1,8 \times 10^3 \text{ 1}/\text{cm}^3$. Nähdään, että LDSA-pitoisuuksien ero oli liki kak-
sinkertainen PN-pitoisuuksien eron ollessa vajaan viidesosan. Huoneissa ei ollut paikalla
ihmisiä mittauksien aikana, eikä niissä tai viereisissä huoneissa ollut avonaisia ulko-ovia
tai ikkunoita, joista olisi päässyt kulkeutumaan ulkoilmaa. PB2:een ulkoa sisään tulleet
hiukkaset ovat olleet halkaisijaltaan LDSA-pitoisuuksien maksimin alueella, mikä näkyy
korkeammassa LDSA-pitoisuuksissa verrattuna huoneeseen PB1, mutta PN-pitoisuuksien
ero on vähäinen.



Kuva 4.4. Huoneiden PA1 ja PA2 hiikkaslukumäärä- ja LDSA-pitoisuudet.

Taulukkoon 4.2 on laskettu huoneiden I/O-suhteet PN -ja LDSA-pitoisuuksille. I/O-suhde on keskiarvo joka mittapisteen I/O-suhteesta huonekohtaisesti 30 sekunnin ajanjaksolla keskiarvotetusta datasta. Lisäksi taulukkoon on laskettu I/O-suhteiden keskihajonnat.

Taulukko 4.2. Koonti huoneiden PN- ja LDSA-pitoisuuksien I/O-suhteiden keskiarvoista, sekä I/O-suhteiden keskihajonnat.

Huone	I/O-suhde PN	I/O-suhde LDSA	Huone	I/O-suhde PN	I/O-suhde LDSA
PA1	0,14 (0,092)	0,22 (0,086)	PB1	0,054 (0,0069)	0,048 (0,0062)
PA2	0,20 (0,12)	0,25 (0,037)	PB2	0,15 (0,023)	0,16 (0,029)
PA3	0,12 (0,046)	0,18 (0,044)	PB3	0,13 (0,031)	0,16 (0,031)
PA4	0,048 (0,012)	0,17 (0,031)	PB4	0,10 (0,042)	0,18 (0,037)

PA:ssa I/O-suhteet vaihtelivat välillä 0,048–0,20 ja PB:ssä 0,054–0,15, keskiarvoina 0,13 ja 0,11 vastaavasti. LDSA-pitoisuuksien I/O-suhteet ovat päiväkodeissa keskimäärin korkeammat kuin PN-pitoisuuksien. PA:ssa suurimmat I/O-suhteet olivat huoneissa PA1 ja PA2, joihin pääsi kulkeutumaan ulkoilmaa aukinaisten ulko-ovien kautta. Huoneen PA4 LDSA-pitoisuuksien I/O-suhde on yli 3,5 kertaa suurempi kuin huoneen PN-pitoisuuksien I/O-suhde. Ero on PA:n huoneista suurin. Tämä viittaisi siihen, että huoneeseen on kulkeutunut hiukkasia, joiden kokoluokka on noin 70–100 nm, jolla välillä LDSA:n suhde hiukkasen halkaisijaan on korkeimmillaan.

PB:n I/O-suhteet ovat matalimmat huoneessa PB1:ssä. PB1:n ja PB2:n hiikkaspitoisuudet ovat suhteellisen samansuuruiset, mutta I/O-suhteet olivat yli 3,5 kertaiset. PB1:n ulkoilman PN- ja LDSA-pitoisuudet olivat mittausjakson korkeimmat, mikä selittää matalan

I/O-suhteen. PB2:ssa hiukkasia kulkeutui sisätiloihin tehokkaammin ja sen I/O-suhteet ovat PB:n korkeimmat. Huoneissa PB1 ja PB2 ei ollut ihmisiä mittauksen aikana, eikä näkyviä sisätilan hiukkaslähteitä, joten on oletettavissa, että sisäilman pitoisuuksiin vaikutti pääasiallisesti ulkoa sisätiloihin kulkeutuneet hiukkaset.

4.4 Vertailu kirjallisuuteen

Päiväkodeissa mitatut PN- ja LDSA-pitoisuudet olivat huomattavasti matalammat, kuin kirjallisuudessa ilmoitetut arvot: Rim et al. tutkimuksessa Soulissa (2017) PN-pitoisuudet vaihtelivat välillä $9,6\text{--}23 \times 10^3 \text{ 1/cm}^3$ ja LDSA-pitoisuudet $16,3\text{--}78,8 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, Chen et al. tutkimuksessa Singaporessa (2016) LDSA-pitoisuus oli $115\text{--}118 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja Rufo et al. tutkimuksessa Portugalissa (2015) PN-pitoisuudet olivat väliltä $3,8\text{--}16 \times 10^3 \text{ 1/cm}^3$. PA:ssa PN-pitoisuuksien maksimit ylittivät hetkellisesti 4000 1/cm^3 rajapyykin, mutta olivat selkeästi poikkeustapauksia. Esimerkiksi maksimi mitattu LDSA-pitoisuus tässä tutkimuksessa oli $7,0 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ on alle puolet Soul:ssa mitatusta alimmasta pitoisuudesta ($16 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$).

Soulissa neljän päiväkodin PN-pitoisuuksien I/O-suhteiden keskiarvot vaihtelivat välillä $0,45\text{--}0,67$ ja Singaporessa PN-pitoisuuksien I/O-suhteet olivat väliltä $0,81\text{--}1,58$ hiukkaskokojakaumalle $0,3\text{--}10 \mu\text{m}$. Singaporessa LDSA-pitoisuuksien I/O-suhteet olivat kahdelle päiväkodille $0,84\text{--}0,94$ hiukkaskokojakaumalla $0,01\text{--}1,0 \mu\text{m}$. PA:n ja PB:n I/O-suhteet ovat näihin arvoihin verrattaessa paljon matalammat.

Mittauspäivinä 6.–7.3.2023 LDSA:n tautapitoisuuksien keskiarvo oli $4,4 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Tulos on keskiarvo HSY:n (2023) (Helsingin seudun ympäristöpalvelut) Luukin mitta-aseman tuntikeskiarvoista. Päiväkotien sisäilman LDSA-pitoisuudet olivat keskimäärin matalammat kuin taustapitoisuus, toisin kuin Singaporessa ja Soulissa. PN-pitoisuuksista ei ollut taustapitoisuustilastoja pääkaupunkiseudun alueelta. Sisäilman PN- ja LDSA-pitoisuudet olivat johdonmukaisesti moninkertaisesti matalammat kuin vastaavat ulkoilman pitoisuuksien keskiarvot ($11\text{--}24 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja $8,3\text{--}10 \text{ 1/cm}^3$). Rufo et al. (2015) tutkimuksessa PN-pitoisuudet sisä- ja ulkoilman välillä eivät poikenneet merkittävästi toisistaan, ja Soulissa sisäilman LDSA-pitoisuudet olivat matalammat kuin mitatut ulkoilman pitoisuudet.

On huomioitava, että kirjallisuuden tutkimukset suoritettiin tiheään asutuissa kaupungeissa ja maissa, joissa ilmanlaatu on keskimäärin huonompi kuin Suomessa. Soulin vuosikeskiarvo $\text{PM}_{2,5}$ pitoisuuksille oli vuonna 2021 $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja Singaporessa $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vuonna 2020, mitkä molemmat ylittävät WHO:n suositukset. Lisäksi Seoulissa päiväkotien huoneita tuuletettiin tiheään ikkunoita avaamalla ja Singaporessa luokkahuoneissa oli tuulettavusteinen luonnollinen tuuletus. Molemmissa tutkimuksissa näillä seikoilla todettiin olevan PN- ja LDSA-pitoisuuksia kohottava vaikutus. Yksi merkittävin sisäilman pitoisuuksiin vaikuttanut tekijä PA:ssa ja PB:ssä oli huoneisiin asennetut ilmanpuhdistimet, joten päiväkodeista saadut tulokset eivät vastaa niin sanottua normaalitilannetta.

5. YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin kahden päiväkodin LDSA- ja hiukkaslukumääräpitoisuuksia Helsingissä 6.–7.3.2023. LDSA-pitoisuuksia mitattiin kummassakin päiväkodissa neljästä eri huoneesta noin yhden työpäivän ajalta (08:00-16:00) ja PN-pitoisuuksia mitattiin tunnin ajan samoista huoneista. Lisäksi työssä käytettiin dataa ulkoilman LDSA- ja hiukkaslukumääräpitoisuuksista, joka oli kerätty kandidaatintyön kanssa samalta ajanjaksolta.

PA:ssa PN -ja LDSA-pitoisuuksien mediaanit vaihtelivat välillä $0,38-1,2 \times 10^3$ ja $1,4-3,0 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. PB:ssä pitoisuudet vaihtelivat välillä $0,20-1,9 \times 10^3$ ja $1,1-5,2 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. PA:ssa pitoisuuksissa oli enemmän hajontaa huoneiden sisällä, mutta pitoisuudet olivat tasaisemmat huoneiden välillä. PB:ssä taas huoneiden välillä pitoisuudet vaihtelivat voimakkaasti, mutta yksittäisten huoneiden pitoisuudet olivat PA:han verrattuna suhteellisen tasaiset. PA:ssa PN:n ja LDSA:n I/O-suhteet olivat väliltä $0,048-0,20$ ja $0,17-0,25$, ja PB:ssä välillä $0,054-0,15$ ja $0,048-0,18$. PA:ssa I/O-suhteisiin vaikutti eniten huoneiden ulkovieien aukaisu sekä ulkoilmasta kulkeutuneet hiukkaset. LDSA-pitoisuuksien I/O-suhteet olivat johdonmukaisesti hieman korkeammat kuin PN-pitoisuuksien.

Päiväkotien huoneiden LDSA-pitoisuuksien keskiarvot olivat keskimäärin matalammat kuin paikallinen taustapitoisuus ($4,4 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$). Ulkoilman LDSA-pitoisuudet vastasivat suurimmaksi osaksi tiheään asutun pientaloalueen tai puiston pitoisuuksia ($8-12 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$), mutta kertaluontoisesti pitoisuudet kohosivat jopa $60 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ asti.

Sisäilman PN -ja LDSA-pitoisuuksiin vaikuttavat tekijät olivat ulkoilmasta lähtöisiä: ulkovieien avaaminen ja sekä ulkoilman pitoisuuksien vaihtelu olivat päätekijät sisäilman pitoisuuksien vaihtelussa. PN- ja LDSA-pitoisuuksien korrelaatio oli suurimmaksi osaksi suoraviivainen, mutta parissa huoneessa pitoisuuksien välillä oli LDSA ja PN eivät vastanneet suoraan toisiaan. Huoneisiin kulkeutuneiden hiukkasten kokojakauma on vaihdellut eri huoneiden välillä, jolloin hiukkasten kontribuutio PN- ja LDSA-pitoisuuksiin on painottunut voimakkaammin toiselle suureista. Sisätilojen omia hiukkaslähteitä ei mittauksien aikana havaittu ja niiden vaikutus pitoisuuksiin oletetaan olevan merkityksettömät. Samanlaisten huonetyyppien välillä ei ollut havaittavissa trendiä PN- ja LDSA-pitoisuuksissa.

Sisäilman PN- ja LDSA-pitoisuudet sekä I/O-suhteet olivat matalammat, kuin kirjallisuudessa ilmoitetut arvot. Päiväkotien sisäilma oli siis kirjallisuuteen verrattuna erittäin puhdasta, mikä johtuu osin päiväkotien maantieteellisestä sijainnista, erilaisista ilmanvaihto-

ja tuuletusmenetelmistä, sekä tämän tutkimuksen päiväkodeissa olleista ilmanpuhdistimista.

Päiväkodin asukkaat altistuvat kirjallisuuteen verrattaessa pienille PN- ja LDSA-pitoisuuksille. Pienet I/O-suhteet viittaavat ulkoilman heikompaan kulkeutumiseen sisäilmaan tai ilmanpuhdistimien tehokkaaseen suodatustehoon pienhiukkasten osalta. Matalampi altistuminen merkitsee pienempää riskiä sairastua pienhiukkassaasteesta aiheutuviin tautteihin, kuten keuhko- ja verisuonitautteihin tai astmaan. Myöskin hengitysteitse tarttuvien tautien leviämiseen taudinaiheuttajia sisältävien aerosolien välityksellä on pienempi todennäköisyys.

LÄHTEET

- Afshari, A., Bae, G., Buonanno, G., Chao, C. Y. H., Hänninen, O., Hofmann, W., Isaxon, C., Jayaratne, E. R., Morawska, L., Pasanen, P. et al. (2013). Indoor aerosols: from personal exposure to risk assessment. *Indoor air* 23.6, s. 462–487.
- Aguilera, I., Dratva, J., Caviezel, S., Burdet, L., Groot, E. de, Ducret-Stich, R. E., Eeftens, M., Keidel, D., Meier, R., Perez, L., Rothe, T., Schaffner, E., Schmit-Trucksäss, A., Tsai, M.-Y., Schindler, C., Künzli, N. ja Probst-Hensch, N. (2016). Particulate Matter and Subclinical Atherosclerosis: Associations between Different Particle Sizes and Sources with Carotid Intima-Media Thickness in the SAPALDIA Study. eng. *Environmental health perspectives* 124.11, s. 1700–1706. ISSN: 0091-6765.
- Belis, C., Karagulian, F., Larsen, B. ja Hopke, P. (2013). Critical review and meta-analysis of ambient particulate matter source apportionment using receptor models in Europe. *Atmospheric Environment* 69, s. 94–108. ISSN: 1352-2310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.009>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231012010540>.
- Chen, A., Gall, E. T. ja Chang, V. W. C. (2016). Indoor and outdoor particulate matter in primary school classrooms with fan-assisted natural ventilation in Singapore. eng. *Environmental science and pollution research international* 23.17. ISSN: 0944-1344.
- Cheung, H., Chou, C.-K., Huang, W.-R. ja Tsai, C.-Y. (2013). Characterization of ultrafine particle number concentration and new particle formation in an urban environment of Taipei, Taiwan. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13.17, s. 8935–8946.
- Environmental Protection Agency (2010). *PM and a human hair*. (viitattu: 17.4.2023). URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PM_and_a_human_hair.jpg.
- Ferro, A. R., Kopperud, R. J. ja Hildemann, L. M. (2004). Source Strengths for Indoor Human Activities that Resuspend Particulate Matter. *Environmental Science & Technology* 38.6. PMID: 15074686, s. 1759–1764. DOI: 10.1021/es0263893. eprint: <https://doi.org/10.1021/es0263893>. URL: <https://doi.org/10.1021/es0263893>.
- Fierz, M., Meier, D., Steigmeier, P. ja Burtscher, H. (2014). Aerosol Measurement by Induced Currents. *Aerosol Science and Technology* 48.4, s. 350–357. DOI: 10.1080/02786826.2013.875981. eprint: <https://doi.org/10.1080/02786826.2013.875981>. URL: <https://doi.org/10.1080/02786826.2013.875981>.
- Gralton, J., Tovey, E. R., McLaws, M.-L. ja Rawlinson, W. D. (2013). Respiratory virus RNA is detectable in airborne and droplet particles. eng. *Journal of medical virology* 85.12, s. 2151–2159. ISSN: 0146-6615.

- Hamilton, D. S. (2015). Natural aerosols and climate: Understanding the unpolluted atmosphere to better understand the impacts of pollution. *Weather* 70.9, s. 264–268. DOI: <https://doi.org/10.1002/wea.2540>. eprint: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/wea.2540>. URL: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wea.2540>.
- Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY (2023). *Hiukkasten LDSA*. (viitattu: 24.4.2023). URL: <https://www.hsy.fi/ilmanlaatu-ja-ilmasto/ilmanlaatu-nyt/hiukkasten-ldsa/>.
- Hennig, F., Quass, U., Hellack, B., Küpper, M., Kuhlbusch, T. A. J., Stafoggia, M. ja Hoffmann, B. (2018). Ultrafine and Fine Particle Number and Surface Area Concentrations and Daily Cause-Specific Mortality in the Ruhr Area, Germany, 2009-2014. eng. *Environmental health perspectives* 126.2, s. 027008–027008. ISSN: 0091-6765.
- Hinds, W. C. (1982). *Aerosol technology : properties, behavior, and measurement of airborne particles*. eng. New York: Wiley. ISBN: 0-471-08726-2.
- Horwell, D. C. (2015). *Grain size dependence of penetration of airborne particulate matter*. (viitattu: 19.4.2023). URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Grain_size_dependence_of_penetration_of_airborne_particulate_matter.jpg.
- Ilmatieteen laitos (2021). *Hengitettävien hiukkasten vuositilasto 2021*. URL: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmansaasteet#tilasto>.
- Kim, K.-H., Kabir, E. ja Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International* 74, s. 136–143. ISSN: 0160-4120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412014002992>.
- Marley, N. A. ja Gaffney, J. S. (2005). Introduction to urban aerosols and their impacts. ACS Publications.
- Morawska, L., Ayoko, G., Bae, G., Buonanno, G., Chao, C., Clifford, S., Fu, S., Häneninen, O., He, C., Isaxon, C., Mazaheri, M., Salthammer, T., Waring, M. ja Wierzbicka, A. (2017). Airborne particles in indoor environment of homes, schools, offices and aged care facilities: The main routes of exposure. *Environment International* 108, s. 75–83. ISSN: 0160-4120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.07.025>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412017306840>.
- Naneos particle solutions gmbh (2019). *Partector Manual*. (viitattu: 13.2.2023). URL: https://www.naneos.ch/pdf/naneos_partector_operation_manual.pdf.
- (2021). *LDSA in depth*. (viitattu: 19.4.2023). URL: <https://www.naneos.ch/pdf/LDSA.pdf>.
- Nunes, R., Branco, P., Alvim-Ferraz, M., Martins, F. ja Sousa, S. (2015). Particulate matter in rural and urban nursery schools in Portugal. *Environmental Pollution* 202, s. 7–16. ISSN: 0269-7491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015>.

- 03.009. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749115001311>.
- Rim, D., Gall, E. T., Kim, J. B. ja Bae, G.-N. (2017). Particulate matter in urban nursery schools: A case study of Seoul, Korea during winter months. *Building and Environment* 119, s. 1–10. ISSN: 0360-1323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.04.002>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132317301531>.
- Rönkkö, T., Kuuluvainen, H., Karjalainen, P., Keskinen, J., Hillamo, R., Niemi, J. V., Pirjola, L., Timonen, H. J., Saarikoski, S., Saukko, E., Järvinen, A., Silvennoinen, H., Rostedt, A., Olin, M., Yli-Ojanperä, J., Nousiainen, P., Kousa, A. ja Maso, M. D. (2017). Traffic is a major source of atmospheric nanocluster aerosol. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114.29, s. 7549–7554. DOI: 10.1073/pnas.1700830114. eprint: <https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1700830114>. URL: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1700830114>.
- Rufo, J. C., Madureira, J., Paciência, I., Slezakova, K., Pereira, M. d. C., Pereira, C., Teixeira, J. P., Pinto, M., Moreira, A. ja Fernandes, E. d. O. (2015). Exposure of Children to Ultrafine Particles in Primary Schools in Portugal. eng. *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A: Current Issues* 78.13-14, s. 904–914. ISSN: 1528-7394.
- Salo, L., Hyvärinen, A., Jalava, P., Teinilä, K., Hooda, R. K., Datta, A., Saarikoski, S., Lintusaari, H., Lepistö, T., Martikainen, S., Rostedt, A., Sharma, V. P., Rahman, M. H., Subudhi, S., Asmi, E., Niemi, J. V., Lihavainen, H., Lal, B., Keskinen, J., Kuuluvainen, H., Timonen, H. ja Rönkkö, T. (2021). The characteristics and size of lung-depositing particles vary significantly between high and low pollution traffic environments. eng. *Atmospheric environment (1994)* 255, s. 118421–. ISSN: 1352-2310.
- TSI Incorporated (2022). *Condensation Particle Counter Model 3007 Spec Sheet A4*. (viitattu: 13.2.2023). URL: https://tsi.com/getmedia/8c0677b4-6cda-43b6-9a74-1c96acc30d4e/3007_5001117_A4?ext=.pdf.
- Wang, C. C., Prather, K. A., Sznitman, J., Jimenez, J. L., Lakdawala, S. S., Tufekci, Z. ja Marr, L. C. (2021). Airborne transmission of respiratory viruses. *Science* 373.6558, eabd9149. DOI: 10.1126/science.abd9149. eprint: <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.abd9149>. URL: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.abd9149>.
- World Health Organization (2021a). *WHO Air Quality Guidelines*. URL: https://www.c40knowledgehub.org/s/article/WHO-Air-Quality-Guidelines?language=en_US. (accessed: 15.3.2023).
- (2021b). *WHO global air quality guidelines, Executive summary*. (viitattu: 2.5.2023). URL: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345334/9789240034433-eng.pdf>.