Sisällys

[1. Johdanto 2](#_Toc463196722)

[2. Häviömekanismit 3](#_Toc463196723)

[2.1 Kokonaistehokkuus 3](#_Toc463196724)

[2.2 Sisäänmenotehokkuus 4](#_Toc463196725)

[2.2.1 Aspiraatiotehokkuus 6](#_Toc463196726)

[2.2.2 Transmissiotehokkuus 6](#_Toc463196727)

[2.2.3 Näytteenotto pysähtyneestä ilmasta 8](#_Toc463196728)

[2.3 Kuljetustehokkuus 9](#_Toc463196729)

[2.3.1 Diffuusio 10](#_Toc463196730)

[2.3.2 Gravitaatiodepositio 11](#_Toc463196731)

[2.3.3 Termoforeesi 12](#_Toc463196732)

[2.3.4 Turbulentti inertiaalinen asettuminen 13](#_Toc463196733)

[2.3.5 Häviöt mutkissa 13](#_Toc463196734)

[2.3.6 Häviöt kuristuksessa 14](#_Toc463196735)

[2.3.7 Elektrostaattinen asettuminen 15](#_Toc463196736)

[2.3.8 Muita häviömekanismeja 15](#_Toc463196737)

[2.4 Teoreettiset häviöt 16](#_Toc463196738)

[3. Mittausjärjestelyt 20](#_Toc463196739)

[3.1 Mobiililaboratorio 20](#_Toc463196740)

[3.2 Mittauksissa käytetyt laitteet 22](#_Toc463196741)

[3.2.1 ELPI ja ELPI+ 22](#_Toc463196742)

[3.2.2 UV-APS 23](#_Toc463196743)

[3.2.3 SMPS 23](#_Toc463196744)

[3.2.4 Hiukkaskoonkasvattaja (PSM) 24](#_Toc463196745)

[3.3 Isojen hiukkasten mittaaminen 25](#_Toc463196746)

[3.4 Pienten hiukkasten mittaaminen 28](#_Toc463196747)

[4. Tulokset 30](#_Toc463196748)

[4.1 Isot hiukkaset 30](#_Toc463196749)

[4.2 Pienet hiukkaset 35](#_Toc463196750)

[4.3 Mittausjärjestelyjen toimivuus 43](#_Toc463196751)

[3. Yhteenveto 44](#_Toc463196752)

[Lähdeluettelo 45](#_Toc463196753)

# 1. Johdanto

Aerosoli koostuu kaasumaisesta väliaineesta ja siinä leijuvista nestemäisistä tai kiinteistä hiukkasista. Aerosolissa olevia hiukkasia kutsutaan aerosolihiukkasiksi ja väliainetta kantokaasuksi. Aerosolihiukkasten koko vaihtelee suuresti, tyypillinen hiukkasen halkaisijakoko on väliltä 1 nm - 100 µm (Willeke & Baron, 2005). Osa näistä aerosolihiukkasista on lähtöisin ihmisen toiminnasta (esimerkiksi liikenteen päästöistä) ja osa on lähtöisin luonnollisista lähteistä (esimerkiksi puiden siitepöly). Näillä aerosolihiukkasilla on merkittävä vaikutus maapallon ilmastoon ja ihmisten terveyteen. Ilmakehässä olevat pienhiukkaset ovat välttämätön edellytys pilvien muodostumiseen toimimalla tiivistymisytiminä ja täten vaikuttavat maapallon säteilytasapainoon. Aerosolihiukkasilla on myös suuri merkitys ilman näkyvyyteen (Hinds, 1998). Ilmastovaikutusten lisäksi aerosolihiukkasilla on havaittu terveysvaikutuksia. Korkean hiukkaspitoisuuden ja sydän- ja verisuonitautien, hengityselinsairauksien ja kuolleisuuden välillä on havaittu yhteys (Pöschl, 2005).

Ilmanlaatua tarkkaillaan useissa maissa kiinteällä mittausasemien verkostolla. Tämä on hyvä keino tarkkailla yleistä ilmanlaadun tasoa pitkällä aikavälillä, mutta on kuitenkin huono tapa tarkastella paikallisesti lyhyen aikavälin muutoksia (Wilson, et al., 2005). Kiinteiden asemien lisäksi tarvitaankin myös muita mittausmenetelmiä, joista mobiililaboratoriot ovat nousseet suosioon. Maailmanlaajuisesti on tehty useita erilaisia mobiililaboratoriomittauksia erilaisia tarkoitusperiä varten, joista yhtenä esimerkkinä ovat jahtausmittaukset. (Kittelson, et al. 2000, Canagaratna, et al. 2004, Wang, et al. 2009)

Myös TTY:n Aerosolifysiikan laboratoriolla on oma mobiililaboratorionsa, jota on esimerkiksi käytetty Tampereen kaupunki-ilman mittaamiseen (Potila, 2015). Jotta mobiililaboratoriolla mitatut mittaukset olisivat mahdollisimmat luotettavat, täytyy mobiililaboratorio karakterisoida mahdollisimman hyvin. Yksi osa mobiililaboratorion karakterisointia on määrittää sen linjastoissa tapahtuvat hiukkashäviöt. Tämän työn tarkoitus onkin määrittää hiukkashäviöt TTY:n Aerosolifysiikan laboratorion mobiililaboratoriolle.

Hiukkashäviöitä tapahtuu aina mitatessa aerosolihiukkasia. Varsinkin pienillä (alle 10 nm) ja isoilla (yli 10 µm) hiukkasilla häviöt ovat merkittäviä. Tavoitteena mittauksessa on saada edustava näytteenotto, eli lukumäärä- ja kokojakauma sekä massajakauma ei muuttuisi merkittävästi näytteenotossa. Jos näytteenotto ei ole edustavaa, voi tämä vääristää mittaustuloksia. Tämän takia onkin tärkeä tietää hiukkashäviöiden suuruus ja mekanismit, jolla ne tapahtuvat. Kirjallisuudessa hiukkashäviöitä on tutkittu runsaasti ja lähes kaikille häviömekanismeille löytyy malleja (Willeke & Baron, 2005).

Aluksi tässä työssä tutustutaan hiukkashäviöitä aiheuttaviin mekanismeihin ja niihin liittyviin malleihin. Tämän jälkeen perehdytään itse mobiililaboratorioon, mittauksessa käytettäviin laitteisiin ja itse mittausjärjestelyihin. Lopuksi esitellään tulokset ja pohditaan niiden luotettavuutta.

# 2. Häviömekanismit

Aerosolien mittaamiseen tarkoitettu mittausjärjestely sisältää usein inletin, eri määrän eri pituisia ja kokoisia näyteputkia ja vähintään yhden mittauslaitteen. Näissä kaikissa systeemeissä tapahtuu hiukkashäviöitä monilla eri mekanismilla. Inletissä häviöt johtuvat ei-isoaksiaalisesta näytteenotosta, ei-isokineettisestä näytteenotosta ja transmissiotehokkuudesta. Näitä häviöitä kuvataan sisäänmenotehokkuudella (kappale 2.2). Näyteputkissa tapahtuvia häviöitä kuvataan kuljetustehokkuudella . Näitä häviöitä aiheuttavat useat erilaiset mekanismit. Näistä tärkeimmät ovat diffuusio, gravitaatiodepositio, termoforeesi, asettuminen mutkissa, turbulenttinen inertiaali asettumien, asettuminen kuristuskohdissa, elektrostaattinen asettuminen, diffuusioforeesi ja koagulaatio (Hinds, 1998). Näiden mekanismien vaikutus hiukkashäviöihin riippuu vahvasti näyteputkessa vallitsevasta virtauksesta ja olosuhteista. Joidenkin mekanismien aiheuttamat hiukkashäviöt ovatkin monta kokoluokkaa pienempiä normaalisti näytteenotossa vallitsevasta tilanteesta. Tässä työssä käsitelläänkin vain tärkeimmät häviömekanismit.

* Diffuusio (2.3.1)
* Gravitaatiodepositio (2.3.2)
* Termoforeesi (2.3.3)
* Turbulenttinen inertiaali asettuminen (2.3.4)
* Häviöt mutkissa (2.3.5)
* Häviöt kuristuksessa (2.3.6)
* Elektrostaattinen asettuminen (2.3.7)

Osiossa 2.3.8 käsitellään lyhyesti muita hiukkashäviöitä aiheuttavia mekanismeja.

## 2.1 Kokonaistehokkuus

Mittauksessa tapahtuvia häviöitä kuvataan läpäisytehokkuudella ), joka on määritelty näyteilman aerosolikonsentraation ja mittalaitteistoon päätyvän aerosolikonsentraation suhteena. Läpäisytehokkuus kuvaa siis sitä osaa hiukkasista, mikä päätyy mittalaitteistoon. Häviöistä puhuttaessa käytetäänkin termiä läpäisytehokkuus, itse häviöt pystytään laskemaan läpäisytehokkuudesta. Häviöt ovat siis yksi miinus läpäisytehokkuus.

Läpäisytehokkuus on aerodynamisen koon funktio. Aerodynaaminen halkaisija tietylle hiukkaselle on määritelty halkaisijana, joka olisi hiukkasella jonka tiheys on 1000 ja sillä olisi sama asettumisnopeus kuin alkuperäisellä hiukkasella. Aerodynaaminen koko pystytään laskemaan

, (2.1)

missä ja ovat liukukorjauskertoimet hiukkaskoille ja . (Hinds, 1998)

Kokonaisläpäisytehokkuus riippuu kahdesta muuttujasta, näytteenoton sisäänmenotehokkuudesta ja kuljetustehokkuudesta . Kokonaisläpäisytehokkuus voidaankin esittää näiden kahden tulona (Willeke & Baron, 2005).

(2.2)

Sisäänmenotehokkuus riippuu taas sisäänoton tehokkuudesta ja transmissiotehokkuudesta Kuljetustehokkuus koostuu kaikkien näyteputkien jokaisen häviömekanismin tulona. Seuraavissa kappaleissa näitä mekanismeja käydään läpi yksityiskohtaisesti.

## 2.2 Sisäänmenotehokkuus

Sisäänmenotehokkuudella kuvataan sitä osuutta aerosolista, joka päätyy inlettiin ja onnistuneesti tavoittaa näyteputken. Sisäänmenotehokkuus riippuu kahdesta mekanismista, sisäänoton tehokkuudesta (aspiraatio) ja inletin läpäisystä (transmissio) . Sisäänmenotehokkuus voidaan esittää näiden kahden mekanismin tulona (Willeke & Baron, 2005)

. (2.3)

Jotta näytteenotto olisi mahdollisimman tehokasta, täytyy kaksi ehtoa täyttyä. Toinen näistä on inertia-ehto. Tällä tarkoitetaan sitä, että näyteputkessa kulkevan virtauksen täytyy olla tarpeeksi pieni, jotta hiukkanen ehtii sopeutua virtaukseen etäisyydellä, joka on samaa kokoluokkaa näyteputken halkaisijan kanssa. Toisaalta virtauksen näyteputkessa täytyy olla tarpeeksi suuri, jotta hiukkaset eivät ehdi gravitaation vaikutuksesta laskeutua liian alas. Tätä kutsutaan gravitaatioehdoksi. (Davies, 1968).

Toiset kaksi tärkeää sisäänmenotehokkuuteen liittyvää termiä ovat isokineettisyys ja isoaksiaalisuus. Mittauksissa kannattaa aina pyrkiä siihen, että näytteenotto on isokineettistä ja isoaksiaalista, sillä tällöin näytteenotto on ideaalisinta.

Isoaksiaalista näytteenotto on silloin, jos inletissä oleva virtaus on ympäröivän ilman virtauksen suunnassa. Jos inletin virtauksen ja kaasun virtauksen välillä on keräyskulma θ, sanotaan näytteenoton olevan ei-isoaksiaalista.

Isokineettisyys liittyy nopeussuhteeseen *R*, mikä on määritelty ympäröivän ilman virtauksen nopeuden ja inletissä olevan virtauksen suhteena (Willeke & Baron, 2005)

(2.4)

Jos ympäröivän ilman virtaus on suurempaa (R>1), sanotaan näytteenoton olevan sub-isokineettistä. Jos taas virtaus inletissä on suurempaa, näytteenotto on super-isokineettistä. Jos nopeudet ovat yhtä suuria (R = 1) on näytteenotto isokineettistä ja tällöin saadaan edustavin kuva aerosolipopulaatiosta.

Kuvassa 2.1 esitetään kaaviokuva isokineettiselle, sub-isokineettiselle (U>) ja super-isokineettiselle (U <) tapauksille isoaksiaalisessa näytteenotossa. Rajoittavat virtaukset edustavat kaasussa sitä rajaa, mikä pääsee inlettiin sisälle ja mikä ei. Hiukkasista, joilla on tarpeeksi inertiaa poiketakseen rajoittavista virtauksista, ei saada näytteenotossa edustavaa otosta.



**Kuva 2.1.** Kaaviokuva isoaksiaalisesta näytteenotosta a) isokineettisessä tapauksessa (U = ) sub-isokineettisessä tapauksessa ( U < ) c) super-isokineeettisessä tapauksessa (U > ) (mukaillen Willeke & Baron 2005)

Kuvassa 2.1a on isokineettinen tapaus. Tällöin rajoittavat virtaukset ovat suoria ja aspiraatiotehokkuus on 1. Häviöitä tapahtuu vain inletin sisällä gravitaation vaikutuksesta.

Kuvassa 2.1b on sub-isokineettinen tapaus, jolloin rajoittava virtaus laajenee kohti inlettiä. Tällöin hiukkaset, joilla on tarpeeksi inertiaa ja jotka ovat alun perin rajoittavien virtausten ulkopuolella, voivat päätyä sisälle inlettiin. Tässä tapauksessa kaikkien hiukkasten aspiraatiotehokkuus on suurempaa kuin yksi. Isoilla hiukkasilla aspiraatiotehokkuus lähestyy arvoa . (Willeke & Baron, 2005).

Kuvassa 2.1c on super-isokineettinen tapaus. Rajoittava virtaus suppenee kohti inlettiä. Tällöin hiukkaset, joilla on tarpeeksi inertiaa, voivat ylittävät rajoittavan virtauksen eivätkä ne päädy inlettiin. Aspiraatiotehokkuus on pienempää kuin yksi lähestyen arvoa isoilla hiukkasilla. (Willeke & Baron, 2005).

### 2.2.1 Aspiraatiotehokkuus

Aspiraatiotehokkuus eli hiukkasten imuteho kuvaa sitä, miten hyvin hiukkasia päätyy ympäröivästä ilmasta inletin sisälle. Se on määritelty ympäröivän ilman aerosolikonsentraation ja inlettiin sisälle päätyvien aerosolien konsentraation suhteena. Jos ilma liikkuu ja näytteenotto on isoaksiaalista, Belyaev & Levin (1972) antavat aspiraatiotehokkuudeksi

, (2.5)

missä

, (2.6)

, (2.7)

missä on hiukkasen relaksaatioaika ja *d* on putken sisähalkaisija. Kaava toimii alueella 0.18 ja 0.17. Näytteenoton ollessa isokineettistä aspiraatiotehokkuus on yksi eli tällöin ei tapahdu hiukkashäviöitä. Aspiraatiohäviöitä tapahtuu vain sub-isokineettisessä ja super-isokineettisessä näytteenotossa, kuten edellä todettiin.

Ei-isoaksiaaliselle näytteenotolle täytyy ottaa huomioon keräyskulma. Tällöin hiukkashäviöitä tapahtuu myös silloin, kun hiukkaset törmäävät inletin seinämiin jotka ovat ilman virtauksen edessä. Durham & Lundgren (1980) antavat yhtälön aspiraatiotehokkuudelle ei-isoaksiaalisessa tapauksessa.

(2.8)

(2.9)

alueelle 0.02, 0.5 ja

Kulmille välille Hangal & Willeke (1990b) kehittivät kirjallisuudessa esitettyjä malleja, jotka oli alun perin tarkoitettu laskemaan aspiraatiotehokkuutta kulman ollessa 90°. Yhtälö on muotoa

, (2.10)

alueelle 0.02, 0.5 ja

### 2.2.2 Transmissiotehokkuus

Transmissiotehokkuus kuvaa sitä osaa aerosolista mikä selviää inletin suuaukosta näyteputkeen asti. Inletin sisällä tapahtuu häviöitä lähinnä kahden mekanismin seurauksena; gravitaatiovoimien ja inertian takia. Näitä hiukkashäviöitä kuvataan transmissiotehokkuuksilla ja Kokonaistransmissiotehokkuus voidaan esittää näiden kahden tulona (Willeke & Baron, 2005)

(2.11)

Kaikkiin hiukkasiin vaikuttaa gravitaatiovoima alaspäin. Gravitaatiohäviöitä tapahtuu inletissä, kun osa hiukkasista ylittää virtauksen rajapinnan gravitaatiovoiman vaikutuksesta, jolloin ne voivat asettua inletin seinämille. Tätä asettumista seinille karakterisoi gravitaatiodepositioparametri (Willeke & Baron, 2005)

(2.12)

missä L on inletin pituus ja on hiukkasen asettumisnopeus. Gravitaatioon liittyvälle transmissiotehokkuudelle Okazaki et al. (1987) antaa kaavan isoaksiaaliselle näytteenotolle

(2.13)

, (2.14)

missä on virtauksen Reynoldsin luku.

Näytteenoton ollessa ei-isoaksiaalista täytyy ottaa huomioon keräyskulma. Hangal & Willeke (1990a) antavat kaavan ei-isoaksiaaliselle transmissiolle

(2.15)

(2.16)

missä on keräyskulma. Jos keräyskulma on nolla (eli näytteenotto on isoaksiaalista), kaava (2.15) redusoituu muotoon (2.13). Keräyskulman ollessa 90°, eli näytteenotto on pystysuoraa, ei tapahdu ollenkaan gravitaatiohäviöitä. Tällöin hiukkasilla ei ole mitään pintaa mihin asettua.

Inertiaalisia häviöitä inletissä tapahtuu, kun hiukkaset eivät pysty seuramaan sisällä olevaa virtausta, vaan inertian takia törmäävät inletin seiniin. Sub-isokineettisessä tapauksessa joidenkin hiukkasten nopeusvektorit osoittavat kohti inletin seinämiä, jolloin osa hiukkasista törmää niihin. Liu et al. (1989) antaa inertiaan liittyvälle transmissiotehokkuudelle sub-isokineettisessa näytteenotossa arvon

, (2.17)

alueelle 0.01 ja 1. Super-isokineettisessä näytteenotossa hiukkasten nopeusvektorit eivät osoita seiniä kohti. Kuitenkin häviöitä tapahtuu, koska inlettiin muodostuu vena contracta. Inletti toimii kuristuksena, jonka seurauksena kaasun nopeus kasvaa ja pakottaa sen kohti putken keskustaa. Näin muodostuu vena contracta (kuva 2.1c). Vena contractan jälkeen kaasu täyttää taas koko putken (Willeke & Baron, 2005) ja osa hiukkasista törmää seiniin. Hangal & Willeke (1990b) antavat transmissiotehokkuudeksi super-isokineettisessä tapauksessa.

(2.18)

(2.19)

alueella 0.02 ja 0.25. Parametri kuvaa vena contractassa tapahtuvia häviöitä.

Ei-isoaksiaalisessa tapauksessa Hangal ja Willeke (1990b) antavat inertiaan liittyvän transmissiotehokkuudelle lausekkeen, joka ottaa huomioon vena contractassa tapahtuvat häviöt ja häviöt, joita tapahtuu hiukkasten törmätessä inletin seiniin. Heidän lausekkeensa on muotoa

, (2.20)

alueella 0.02 ja 0.25.

Vena contractassa tapahtuviin häviöihin liittyvä parametri on määritelty

(2.21)

0.25. Muulloin , eli vena contracta muodostuu vain super-isokineettisessä näytteenotossa.

Hiukkashäviöt seinätörmäyksissä riippuu vahvasti inletin asennosta. Jos inlet osoittaa ylöspäin, gravitaation vaikutuksesta hiukkaset ajautuvat kauemmas seinistä ja häviöt ovat pienempiä. Inletin osoittaessa alaspäin hiukkashäviöt ovat suurempia, sillä gravitaation vaikutuksesta hiukkaset ajautuvat kohti inletin seinämiä. Parametri on määritelty

, (2.22)

jos inlet osoittaa alaspäin ja

, (2.23)

jos inlet osoittaa ylöspäin.

Parametri on määritelty

(2.24)

### 2.2.3 Näytteenotto pysähtyneestä ilmasta

Jos näytteenotto tapahtuu pysähtyneestä ilmasta (eli ), ei voida käyttää aspiraatiotehokkuutta laskettaessa kaavoja (2.5), (2.8) tai (2.10). Kirjallisuudessa Davies (1968) ja Agarwal & Liu (1980) antavat erilaiset kriteerit, milloin näytteenotto on edustavaa paikallaan olevan ilman tapauksessa. Davies (1968) antaa kaksi eri ehtoa, jotka täytyy täyttyä edustavan näytteenoton saavuttamiseksi. Ensimmäinen ehto on inertiaehto, mikä varmistaa, että inletti pystyy imemään aerosolihiukkaset sisäänsä

(2.25)

Kaavassa esiintyvä Stokesin numero perustuu inletissä vallitsevaan virtaukseen *U* ja inletin halkaisijaan *d*. Toinen on hiukkasten asettumisnopeus- ehto, mikä varmistaa, että inletin asennolla ei ole väliä näytteenottoon. Tämä voidaan ilmaista asettumisnopeuden ja inletin virtauksen suhteena

(2.26)

Jos nämä kaksi kriteeriä täytyvät, on näytteenotto edustavaa. Agarwal & Liu (1980) määrittävät näytteenotolle toisenlaiset, hiukan väljemmät, ehdot. He muodostivat teoreettisen mallin Navier-Stokesin yhtälön ratkaisun perusteella ja laskivat hiukkasten liikeratoja ja näytteenoton tehokkuuksia. Heidän kriteerinsä tarkalle näytteenotolle (aspiraatiotehokkus yli 90 %) ylöspäin osoittavalle inletille

(2.27)

Heidän tulostaan tukee useiden tutkijoiden kokeellinen data (Willeke & Baron, 2005).

Grinsphun (1993,1994) antaa empiirisen yhtälön aspiraatiotehokkuudelle pyöreälle inletille

, (2.28)

missä on Stokesin luku laskettuna inletin virtauksella *U,* on inletin kulma gravitaation suhteen (0° inletti osoittaa ylöspäin, 90° horisontaalinen). Kaava toimii alueella , ja .

Ensimmäinen termi kuvaa hiukkasten gravitaatioasettumista suoraan inletin pinnalle. Toinen termi kuvaa muita inertiaalisia ja gravitationaalisia häviöitä. Tämä termi ei riipu ollenkaan inletin asennosta.

## 2.3 Kuljetustehokkuus

Aerosolihiukkasten häviöiden kuvaamiseen näyteputkissa käytetään kuljetustehokkuutta . Se on määritelty aerosolikonsentraation, joka menee näyteputkesta sisään suhteena aerosolikonsentraatioon, mikä tulee näyteputkesta ulos. Kuljetushäviöitä tapahtuu jokaisessa mittausjärjestelyn osassa ja monilla eri mekanismeilla. Kokonaiskuljetushäviöt voidaan laskea näiden tulona (Willeke & Baron (2005))

(2.29)

Eräs tärkeä suure mitatessa kuljetuksessa tapahtuvia häviöitä on Reynoldsin luku *Re*. Reynoldsin luku kuvaa minkälainen virtaus putkessa kulkee ja se on määritelty (Hinds, 1998)

, (2.30)

missä kaasun tiheys, putken sisähalkaisija ja on kaasun viskositeetti.

Virtaus voi olla joko turbulenttista *(Re* > 4000) tai laminaarista *(Re* < 2000). Näiden välissä olevaa aluetta (2000 < *Re* < 4000) kutsutaan välialueeksi, jolloin ei voida sanoa onko virtaus turbulenttista vai laminaarista. Lähes jokaiselle häviömekanismille on eri mallinsa turbulenttiselle ja laminaariselle virtaukselle. Useimmiten välialueelle ei ole minkäänlaista kunnon mallia.

### 2.3.1 Diffuusio

Brownin liike aiheuttaa hiukkasvuon korkeasta konsentraatiosta matalampaan konsentraation. Koska hiukkaset jäävät kiinni putken seinämiin törmätessä niihin, on aina seinän hiukkaskonsentraatio nolla. Tällöin putken seinä toimii nieluna hiukkasille. Seinän lähelle muodostuu tällöin konsentraatiogradientti. Tämän seurauksena diffuusio aiheuttaa hiukkasten liikkeen kohti seinää. Varsinkin pienillä hiukkasilla diffuusiohäviöt ovat tärkeitä.

Laminaariselle virtaukselle Willeke & Baron (2005) antavat diffuusion liittyvän läpäisytehokkuuden suuruudeksi

(2.31)

(2.32)

missä *D* on hiukkasen diffuusiokerroin, *L* on putken pituus ja *Q* on tilavuusvirtaus.

Sherwoodin luvulle Holman (1972) antaa kaavan

(2.33)

(2.34)

(2.35)

missä on ilman (tai virtauksen aineen) tiheys, U on virtausnopeus putkessa, d on putken sisähalkaisija ja on virtausaineen viskositeetti.

Jos virtaus putkessa on turbulenttista, voidaan käyttää kaavaa (2.31), mutta Sherwoodin luvuksi käytetään Friendlanderin & Johnstonen (1997) antamaa muotoa

(2.36)

Diffuusiohäviöitä laskettaessa voidaan käyttää myös Gormleyn & Kennedyn (1949) yhtälöä, olettaen että virtaus on laminaarista ja näyteputki on pyöreä.

(2.37)

kun

(2.38)

kun > 0.02.

Gormleyn & Kennedyn yhtälö laminaariselle virtaukselle poikkeaa vain muutamia prosentteja kaavasta (2.31) tarkoituksenmukaisilla arvoilla (Willeke & Baron, 2005).

On huomattavaa, että virtauksen ollessa laminaarista, läpäisy ei riipu ollenkaan putken halkaisijasta, pelkästään termistä . Jotta kuljetus tehokkuus olisi mahdollisimman suuri, kuljetusmatka L kannattaa pitää mahdollisimman pienenä ja virtaus Q mahdollisimman suurena.

### 2.3.2 Gravitaatiodepositio

Putkissa hiukkasiin vaikuttaa gravitaatiovoima. Hiukkaset laskeutuvat painonsa takia alaspäin ja jäävät kiinni putken alapintaan. Gravitaatiovoima aiheuttaa häviöitä hiukkaskoilla, jotka ovat suurempia kuin 0.5 μm (Weiden et al., 2009).

Horisontaaliselle ympyräputkelle, jossa virtaus on laminaarista, Fuchs (1964) antaa gravitaatiodeposition kuljetustehokkuudeksi muodon

) (2.39)

(2.40)

Jos putki on vinossa horisontaalisesti tasosta kulman θ verran, täytyy tämä ottaa huomioon laskettaessa kuljetustehokkuutta. Tällöin hiukkasten seiniin suuntautuva nopeusvektori on muotoa θ. Ympyräputkelle, missä virtaus on laminaarista ja näyteputki on vinossa horisontaalisesta tasosta kulman θ verran, Heyder and Gebhart (1977) muokkasivat kaavaa (2.39). Kaava on vastannut hyvin kokeellisia tuloksia, ja sitä voidaankin käyttää laskemaan gravitaatiohäviöitä kallistuneessa ympyräputkessa. (2.41)

(2.42)

olettaen, että kriteeri

, (2.43)

on voimassa.

Kriteerillä (2.43) tarkoitetaan sitä, että partikkeleiden aksiaalinen asettumisnopeus täytyy olla pieni verrattuna virtausnopeuteen. Muuten virtaus ei ole tarpeeksi suuri kuljettamaan kaikkia hiukkasia kallistuneen näyteputken läpi. Tämä kriteeri täytyy ottaa myös huomioon horisontaalisessa putkessa.

Jos näyteputki on vaakasuorassa, eli kallistuskulma on 90, kaava (2.41) antaa kuljetustehokkuudeksi 1. Tällöin hiukkasilla ei ole mitään pintaa mihin ne voisivat gravitaation vaikutuksesta asettua.

Virtauksen ollessa turbulenttista läpäsytehokkuus on (Willeke & Baron, 2005)

(2.44)

missä Q on näyteputken läpi kulkevan tilavuusvirtauksen suuruus. Putken ollessa vinossa horisontaalisesta tasosta, täytyy myös kallistumiskulma ottaa huomioon. Muokkaamalla hiukan yhtälöä (2.44) saadaan gravitaatiodeposition kuljetustehokkuudeksi (Hinds 1998)

(2.45)

Kriteeri (2.43) täytyy ottaa huomioon myös virtauksen ollessa turbulenttista.

### 2.3.3 Termoforeesi

Näyteputken lämpötilan ollessa erilainen verrattuna putkessa kulkevan kaasun lämpötilaan, muodostuu putken sisälle lämpötilagradientti. Lämpötilagradientti aiheuttaa voiman aerosolihiukkasiin, joka suuntautuu lämpimämmästä lämpötilasta kylmempään lämpötilaan. Näin hiukkaset voivat ajautua kohti näyteputken seinämiä ja jäädä niihin kiinni.

Termoforeesista aiheutuvia häviöitä on usein huomattavan vaikeaa arvioida. Pelkästään lämpötilagradientin laskeminen voi olla useissa tapauksissa hankalaa, sillä lämpötilagradientti muuttua mittausten aikana hiukkasten deposition takia.

Virtauksen ollessa turbulenttista, termoforeesiin liittyvä kuljetustehokkuus voidaan esittää kaavalla (Willeke & Baron, 2005)

(2.46)

Virtauksen ollessa laminaarista, virtauksen ja lämpötilagradientin ehdot ja fysiikka menevät erittäin monimutkaista, eikä kaavaa kuljetustehokkuudelle laminaarisessa virtauksessa ole annettu (Willeke & Baron, 2005).

Kaavassa (2.46) esiintyvä , on termoforeettinen nopeus, joka saavutetaan kun termoforeettinen voima ja liikettä vastustavat voimat ovat tasapainossa. Termoforeettinen nopeus ei ole riippuvainen hiukkaskoosta, kun hiukkasen koko on paljon suurempi kuin keskimääräinen vapaamatka (jatkumoalue) ja hiukkasen koon ollessa paljon pienempi kuin keskimääräinen vapaamatka (vapaa molekyylialue).

Friedlander (1977) antaa termoforeettiselle nopeudelle kaavan jatkumoalueella

(2.47)

missä on kaasun lämmönjohtavuus, on hiukkasen lämmönjohtavuus, on paine ja on kaasun lämpötilagradientti.

Hiukkasille vapaalla molekyylialueella kaava on muotoa (Friendlander, 1977)

(2.48)

missä on kaasun kinemaattinen viskositeetti.

Termoforeesista johtuvia häviöitä voidaan välttää pitämällä näyteputki samassa lämpötilassa näytteen kanssa. Lämpötilagradientin putken ja aerosolin välissä ollessa vähemmän kuin 40 K, ovat termoforeettiset häviöt hyvin pieniä ja ne voidaan jättää huomiotta (Weiden 2009).

### 2.3.4 Turbulentti inertiaalinen asettuminen

Virtauksen ollessa näyteputkessa turbulenttista, virtauslinjat eivät kulje virtaviivaisesti vaan virtaukseen syntyy pyörteitä. Kaikki hiukkaset eivät pysty seuraamaan täydellisesti pyörteitä inertiansa takia vaan lopulta törmäävät putken seiniin. Varsinkin isot hiukkaset asettuvat seinille, koska niillä on enemmän inertiaa kuin pienemmillä hiukkasilla.

Hiukkasten kuljetustehokkuus voidaan esittää muodossa (Willeke & Baron, 2005)

, (2.49)

missä

(2.50)

on kokeelliseti määritelty turbulenttisen inertiaalisen asettumisen nopeus. Kaava toimii aina Re > 15 600 asti (Lee & Gieseke, 1994)

### 2.3.5 Häviöt mutkissa

Mutkissa putkessa oleva virtaus muuttaa suuntaa, eivätkä isot hiukkaset pysty seuraamaan virtausta niiden suuren inertian takia. Riippuen hiukkasen pysähtymismatkasta, hiukkanen saattaa asettua putken seinille aiheuttaen hiukkashäviöitä. Koska isoilla hiukkasilla on usein iso pysähtymismatka, mutkissa tapahtuu paljon häviöitä erityisesti isoille hiukkasille.

Virtaus mutkassa on paljon vakaampaa kuin suorassa putkessa. Tämän takia mutkassa virtaus voi säilyä laminaarisena jopa Reynoldsin lukuun 5000 asti. (Pui, et al., 1987)

Crane & Evans (1977) antavat yksinkertaisen empiirisesti todetun yhtälön mutkaläpäisylle 90° asteen mutkalle laminaariselle virtaukselle. Yhtälö voidaan myös laajentaa koskettamaan muita kulmia

(2.51)

missä on putken kulma radiaaneina.

Cheng & Wang (1981) tutkivat numeerisesti putkessa tapahtuvia häviöitä. He antoivat numeerisesti lasketut tuloksensa vain Reynoldsin luvuille 100 ja 1000. Pui et al. (1987) vertasivat Cheng & Wangin (1981) numeerisia tuloksia kokeelliseen dataan. He huomasivat, että Reynoldsin luvulla 1000 Chengin & Wangin (1981) numeeriset tulokset vastasivat hyvin mittaustuloksia, mutta Reynoldsin luvulla 100 ei. Heidän mukaansa Chengin & Wangin mallia kannattaakin käyttää vain Reynoldsin luvulla 1000 ja kun mutkan kaarevuussäde on 4 ja 30 välillä. Mitään korrelaatiota ei läpäisylle ole kuitenkaan annettu.

Willeke & Baron (2005) muodostivat relaation läpäisytehokkuudelle Pui et al. (1987) datasta.

(2.52)

missä on putken mutkan kulma asteissa. Pui et al. (1987) mittaukset oltiin tehty Reynoldsin luvulle 1000, kaarevuussäteelle 5.6 ja 5.7 ja putken sisähalkaisijoille neljästä 8.5 mm. Näille parametreille kaava (2.52) antaa parempia tuloksia kuin kaava (2.51), kuitenkin mitä kauempana näistä parametreista ollaan sitä suurempaa virhettä kaava antaa. Pienillä Reynoldsin luvuilla kaava 2.52 aliarvoi läpäisyä. (Willeke & Baron, 2005)

Pui et al. (1987) havaitsi myös, että turbulenttisessa virtauksessa Reynoldsin luku ei vaikuta mutkan läpäisyyn ollenkaan. He esittivät empiirisesti määritetyn yhtälön läpäisytehokkuudelle turbulenttisessa virtauksessa.

(2.52)

Mutkissa tapahtuvat häviöt ovat usein merkittäviä varsinkin isoille hiukkasille, joten mutkia kannattaa mahdollisimman vähän. Kuitenkin käytännössä tämä on usein mahdotonta. Jos mutkia on mittausjärjestelyssä pakko käyttää, kannattaa mutkan kaarevuussäde, olla neljä tai suurempi, eli jyrkkiä käännöksiä kannattaa välttää. on määritelty mutkan säde jaettuna putken säteellä. (Willeke & Baron, 2005) .

Lisäksi kannattaa yrittää pitää Stokesin luku mahdollisimman pienenä. Stokesin luvun ollessa pienempi kuin 0.05 ja virtaus on turbulenttista, häviöt mutkissa ovat minimaalisia (Willeke & Baron, 2005).

### 2.3.6 Häviöt kuristuksessa

Usein mittauslinjastot sisältävä erilaisia kuristuksia näytelinjan muuttuessa paksummasta ohuempaan. Näissä kuristuskohdissa tapahtuu häviöitä, joten kuristuskohtia kannattaa välttää näytelinjoissa, jos on vain mahdollista. Esimerkiksi näytelinjan muuttuessa paksummasta putkesta ohuempaan, virtauksen suunta muuttuu kuristuskohdassa. Osa isoista hiukkasista ei pysty seuraamaan näitä muuttuneita virtauslinjoja ja asettuvat linjaston seinille.

Muyshondt et al. (1996) määrittää empiirisesti todetun yhtälön kuljetustehokkuudelle liittyen kuristuksissa tapahtuviin häviöihin

(2.53)

Kaava toimii arvoilla 0.01< )< 100 ja 12<90.

Jotta häviöt ovat mahdollisimman pieniä, Stokesin luku kannattaa pitää mahdollisimman pienenä näytelinjoissa.

### 2.3.7 Elektrostaattinen asettuminen

Aerosolinäytteessä on aina varautuneita hiukkasia johtuen ioneiden diffuusiosta hiukkasiin. Koska usein on vaikeaa tietää varauksen jakautumista aeorosoliin tai hiukkasiin vaikuttavaa sähkökenttää, on elektrostaattisia häviöitä erittäin vaikeaa selvittää.

Elektrostaattiset voimat voidaan jättää huomiotta, jos hiukkaset ovat varauksettomia tai näytelinjassa ei ole sähkökenttää. Kuitenkin elektrostaattiset voimat ovat erittäin suuria, kun kuljetetaan varauksellisia hiukkasia eristeputkessa.

Elektrostaattisia häviöitä on helppo välttää. Näytelinjoja kannattaa käyttää metallia tai johtavaa materiaalia, jolloin näytelinjan sisällä ei ole sähkökenttää. Putken sisälle muodostuu siis Faradayn häkki. Jos metalliputkia ei voi käyttää, Tygonia voi käyttää sen sijaan. Teflon ja Polyflo:n käyttöä sen sijaan kannattaa välttää. (Liu, et al., 1985)

### 2.3.8 Muita häviömekanismeja

*Diffuusioforeesi:* Diffuusioforeesista aiheutuva voima johtuu konsentraatiogradienteista kaasun sisällä. Molekyylit liikkuvat diffuusion vaikutuksesta kaasussa ja aiheuttavat voiman kaasussa oleviin hiukkasiin. Konsentraatiogradientit ovat pieniä, jos kaasu on hyvin sekoittunutta ja putken ja kaasun lämpötilaero ei ole suuri. Tällöin diffuusioforeesista aiheutuvat häviöt ovat merkityksettömiä. (Willeke & Baron, 2005)

*Koagulaatio:* Koagulaatiossa pienet hiukkaset törmäävät toisiinsa ja takertuvat toisiinsa kiinni. Tällöin muodostuu yksi uusi isompi hiukkanen ja kaksi pienempää hiukkasta katoaa. Tämä prosessi hävittää nopeasti pienten hiukkasten määrää samalla kasvattaen hitaammin isojen hiukkasten määrää. Tästä johtuvat hiukkashäviöt ovat merkityksettömiä, kun konsentraatio on pienempää kuin 100 000 #/cm3 ja aika, jonka hiukkaset viettävät putkessa on muutamia sekunteja. (Weiden, et al., 2009)

*Törmäys:* Törmäyksessä hiukkaset, jotka kulkevat lähellä linjojen seinämiä, voivat törmätä seinämiin ja jäädä niihin kiinni. Tästä syystä häviävien hiukkasten osuus on pieni verrattuna muihin mekanismeihin olettaen, että hiukkasten halkaisija on paljon pienempi kuin näyteputken halkaisija. Näin ollen törmäyksistä aiheutuvat häviöt ovat lähes aina mitättömiä. (Willeke & Baron, 2005)

*Depositoituneiden hiukkasten uudelleen palaaminen virtaukseen:* Osa näyteputkiin jo deposoituneista hiukkasista voivat palata takaisin virtaukseen, jos olosuhteet ovat sopivat. Tasainen virtaus ei tuota paljon palanneita hiukkasia, mutta epätasaiset olosuhteet aiheuttavat niiden palaamista. Esimerkiksi turbulenttinen virtaus ja virtauksen käynnistäminen ja lopettaminen aiheuttavat hiukkasten palaamista virtaukseen (Wen & Kesper, 1989). Ylipäätänsä tämä mekanismi on erittäin huonosti tunnettu. Jo deposoituneiden hiukkasten palaamista virtaukseen voidaan välttää puhdistamalla näytelinjat ja välttämällä linjaston tärähdyksiä ja muuta mekaanista liikettä. (Willeke & Baron, 2005)

## 2.4 Teoreettiset häviöt

Työtä varten toteutettiin Matlab-ohjelmalla häviölaskuri, jolla pystytään laskemaan mittauksissa tapahtuvia häviöitä. Ohjelman avulla pystytään laskemaan kuljetushäviöitä ja näytteenotossa tapahtuvia häviöitä. Ohjelma toteutettiin käyttämällä kaavoja kappaleesta 2.2 ja 2.3. Ohjelma toimii kahden erilaisen pääfunktion kautta, particleLossesCar tai particleLosses. Funktio particleLossesCar laskee häviöt TTY:n Aerosolifysiikan laboratorion mobiililaboratoriolle. Funktiolla particleLosses pystytään laskemaan vapaammin häviöitä erilaisissa tilanteissa. Liittessä () näkyy funktioiden toimintaperiaatteet.

Tässä kappaleessa on laskettu teoreettinen läpäisy putkelle, jonka pituus on yksi metri, halkaisija 10 mm ja putkessa kulkee 30 lpm virtaus. Putkessa ei ole mutkia tai kallistuskulmaa, ja lämpötilaero on pieni kaasun ja putken välillä, joten termoforeesista johtuvia häviöitä ei ole. Teoreettiset läpäisyt on laskettu työtä varten toteutetulla funktiolla particleLossesCar.

Näillä parametreilla virtaus on turbulenttista kaavan (2.30) mukaan, joten läpäisyssä on käytetty turbulenttisen alueen kaavoja. Diffuusion laskemiseen on käytetty kaavaa (2.31), gravitaatiodeposition (2.44) ja turbulenttisen deposition laskemiseen (2.49). Kokonaiskuljetustehokkuus on laskettu kaavalla (2.29).

**Kuva 2.2**: Kuljetustehokkuus hiukkaskoon funktiona. Kuvassa on esitettynä kokonaiskuljetustehokkuuden lisäksi diffuusion läpäisytehokkuus, gravitaatioon läpäisytehokkuus ja turbulenttisen inertaali asettumisen läpäisytehokkuus. Putken pituus yksi metri, putken halkaisija 0.01 m ja virtaus 10 lpm.

Pienillä hiukkasilla diffuusio dominoi selvästi häviöitä, isoilla hiukkasilla taas merkittävät mekanismit ovat gravitaatiodepositio ja turbulenttidepositio. Noin 0.3 mm kokoiset hiukkaset eivät enää läpäise ollenkaan putkea. Vähiten häviöitä on alueella 0.1-1 µm, jolloin läpäisy on 1, eli häviöitä ei ole käytännössä ollenkaan.

Tarkastellaan sisäänmenotehokkuutta samalle putkelle. Kuvaan 2.3 on piirretty aspiraatiotehokkuus ja transmissiotehokkuus samaan kuvaajaan. Ulkona olevan kaasun nopeutena () on käytetty arvoa 50 km/h. Näytteenotto on oletettu olevan isoaksiaalista. Tällöin aspiraatiotehokuuden laskemiseen on käytetty kaavaa (2.5). Näillä parametreillä näytteenotto on sub-isokineettistä, joten transmissiotehokkuuteen on käytetty kaavaa (2.17).



**Kuva 2.3**: Sisäänmenotehokkuus hiukkaskoon funktiona. Kuvassa on esitettynä aspiraatio-, transmissio- ja kokonaistehokkuus. Ulkona olevan kaasun nopeus () 50 km/h.

Alle 1 µm kokoisilla aspiraatio tai transmissio eivät vaikuta ollenkaan läpäisyyn. Häviöitä aiheuttaa vain transmissio, mutta hyvin vähän ja vain yli 1 µm kokoisille hiukkasille. Aspiraatiotehokkuus on kaikilla hiukkasilla suurempaa kuin yksi, kasvaen isoilla hiukkasilla. Tämä oli odotettavaa kappaleen 2.2 perusteella, sillä näytteenotto oli näillä parametreilla sub-isokineettistä. Sisäänmenotehokkuus on aspiraation vaikutuksesta suurempaa kuin yksi kaikilla hiukkaskoilla. Tämä tarkoittaa, että varsinaisia häviöitä ei näytteenotossa tapahdu, mutta varsinkin isot hiukkaset ovat yliedustettuina. Näytteenotto ei ole tällöin edustavaa.

Tarkastellaan vielä samalle putkelle kokonaisläpäisyä. Kuvaan 2.4 on koottu sisäänmenotehokkuus, kuljetustehokkuus ja kokonaistehokkuus. 

**Kuva 2.4**: Kokonaistehokkuus hiukkaskoon funktiona. Kuvassa on lisäksi esitettynä sisäänmenotehokkuus ja kuljetustehokkuus. Putken pituutena on käytetty yhtä metriä, putken halkaisijana 0.01 m, virtauksena 10 lpm ja ulkona olevan virtauksen nopeutena 50 km/h

Pienillä hiukkasilla (< 10 nm) kuljetustehokkuus selvästi dominoi kokonaistehokkuutta, eli häviöt ovat käytännössä pelkkiä diffuusiohäviöitä. Välillä 1 µm – 20 µm kokonaistehokkuus on suurempaa kuin 1, eli tältä väliltä olevat hiukkaset ovat yliedustettuina. Lopulta kuljetustehokkuudesta johtuvat häviöt ovat niin suuria, että yli 100 µm hiukkaset eivät enää pääse näyteputken läpi ollenkaan. Kokonaistehokkuus on yksi hiukkasille väliltä 10 nm - 1µm. Näille hiukkasille ei tapahdu siis ollenkaan häviöitä näyteputkessa ja niistä saadaan edustava otos näytteenotossa.

# 3. Mittausjärjestelyt

Edellisessä kappaleessa käsiteltiin teoreettisesti häviöt, joita aerosolien mittaamisessa tapahtuu. Tämän työn tarkoituksena on teoreettisen tarkastelun lisäksi mitata TTY:n Aerosolifysiikan laboratorion mobiililaboratorion linjastoissa tapahtuvat häviöt. Näytteenotossa tapahtuvia häviöitä ei mitattu tässä työssä ollenkaan, vaan keskityttiin auton näyteputkissa tapahtuviin häviöihin. Työtä varten tehtiin kaksi erillistä mittausta. Mittaukset suoritettiin pienille ja isoille hiukkasille erikseen. Molemmissa tapauksissa käytetiin eri laitteita ja hiukkasten tuotto tapahtui eri menetelmin. Tässä kappaleessa esitellään mobiililaboratorio, mittauksissa käytetyt laitteet ja mittausjärjestelyt.

## 3.1 Mobiililaboratorio

TTY:n Aerosolifysiikan laboratoriolla on käytössään suuri Mercedez-Benz Sprinter A3 319 – mallinen pakettiauto. Mobiililaboratoriolla pystyy helposti kuljettamaan erilaisia mittalaitteita ja mittaamaan myös ajon aikana. Auto soveltuu erityisen hyvin reaaliaikaisiin jahtaus- ja tienvarsinmittauksiin hyvän liikkuvuutensa ansiosta, mutta autoa käytetään myös monissa muissa erilaisissa mittauksissa ja mittauskamppanjoissa. Auton sisätilat jakautuva kahteen osaan. Edessä on kuskin, apukuskin ja mittaajan tuolit ja yksi pöytä. Takaosassa on taitettavia hyllyjä, jotka sopivat mittauslaitteiden asettamiseen ja kuljettamiseen. Mobiililaboratoriossa on viisi erillistä näytteenottolinjaa happoteräsputkesta hiukkasille ja viisi erillistä näytteenottolinjaa teflonista kaasuille. Nämä linjat lähtevät auton ulkopuolelta ja niiden toinen pää on auton takaosassa.

Tässä työssä määritettiin häviöt auton keulassa tuulilasin yläpuolella olevasta mittauslinjasta, sillä tämä on selvästi suurimmassa käytössä kaikista linjoista. Kuvassa 3.1 on esitettynä periaatteellinen kaaviokuva autosta ja mitattavasta linjastosta.



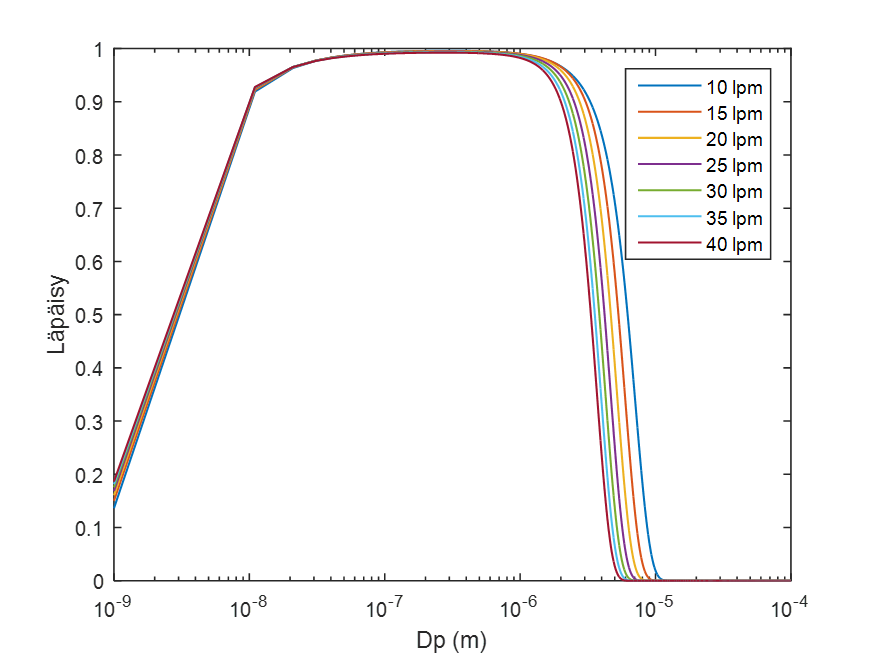
**Kuva 3.1**: Kaaviokuva TTY:n Aerosolifysiikan laboratorion käytössä olevasta mobiilaboratoriosta a) sivulta b) ylhäältä. Kuvassa b) on esitettynä näytelinjan muoto auton sisällä.

Kuten kuvasta 3.1a näkee, mitattava linja on 2.1 metrin korkeudella maasta. Sen pituus on 2.5 m ja sisähalkaisija 12 mm. Kuvasta 3.1 b näkee tarkemmin, miten linja menee auton sisällä. Näytelinja tekee kaksi 90° mutkaa. Näyteputki on tehty happoteräsputkesta, eli johtavasta materiaalista, joten elektrostaattisesta asettumisesta johtuvia häviöitä ei putkessa tapahdu.

Kuvaan 3.2 on määritetty auton linjastossa tapahtuvat teoreettiset kuljetushäviöt 30 lpm virtauksella. Lisäksi kuvassa 3.3 on esitettynä kokonaisläpäisy eri virtauksilla.



**Kuva 3.2.** Auton linjaston teoreettinen läpäisy. Näyteputken pituus 2.5 m, sisähalkaisija 12 mm. Käytetty virtaus on30 lpm. Putkessa on kaksi 90° asteen kulmaa.



**Kuva 3.3**: Auton linjaston teoreettinen läpäisy eri virtauksilla. Näyteputken pituus 2.5 m, sisähalkaisija 12 mm. Käytetty virtaus on30 lpm. Putkessa on kaksi 90° asteen kulmaa.

Kuvan 3.2 mukaan mutkahäviöt dominoivat verrattuna muihin häviömekanismeihin. Jo yhden mikrometrin kokoisilla hiukkasilla alkaa olla häviöitä eikä 10 mikrometrin hiukkaset enää pääse ollenkaan läpi. Myös pienille (muutaman nanometrin kokoisille) hiukkasille diffuusioista aiheutuvat häviöt ovat suuria.

Kuvasta 3.3 huomataan, että pienillä hiukkasilla (< 10 nm) virtauksen muuttaminen ei vaikuta juurikaan häviöihin. Häviöt ovat hyvin lähellä toisiaan, mutta kuitenkin suurilla virtauksilla läpäisy on suurempi eli häviöt ovat hiukan pienempiä. Isoilla hiukkasilla (> 10 µm) taas tilanne on päinvastainen. Isoilla virtauksilla häviöt ovat suurempia, eli läpäisy on pienempi.

## 3.2 Mittauksissa käytetyt laitteet

Tässä työssä mittaukset jaettiin kahteen osaan; pieniin ja isoihin hiukkasiin. Molempiin mittauksiin valittiin tarkoituksenmukaiset laitteet, jotka pystyvät mittaamaan haluttua kokoaluetta. Tässä kappaleessa esitellään mittauksissa käytetyt laitteet.

### 3.2.1 ELPI ja ELPI+

*ELPI* (Electrical Low Pressure Impactor, Keskinen. et al 1992) on sähköinen alipaineimpaktori, joka pystyy mittaamaan lukumääräpitoisuutta reaaliaikasesti aerodynaamisen koon funktiona. Hiukkaset varataan ensin unipolaarisesti eli siten, että kaikilla hiukkasilla on saman merkkinen varaus. Varaamisen jälkeen hiukkaset johdetaan alipaineimpaktoriin, jossa on peräkkäin useita impaktorilevyjä. Kuvassa 3.3 on yksinkertaistettu kuva ELPI:n impaktorista.



***Kuva 3.3****: Yksinkertaistettu kuva ELPI:n impaktorista. Hiukkaset tulevat läpi suuttimesta jonka läpimitta on impaktoriin. Osa hiukkasista pystyvät seuraamaan virtauslinjoja ja eivät törmää impaktiolevyyn (musta nuoli). Tarpeeksi suuret hiukkaset eivät pysty seuraamaan virtauslinjoja ja törmäävät impaktiolevyyn. (mukaillen Hinds, 1998)*

Aerosoli tuodaan sisään suuttimesta, jonka läpimitta on . Kohdattuaan impaktiolevyn, virtaus kääntyy. Osa hiukkasista eivät pysty seuraamaan ilman virtaus, sillä ne ovat liian suuria. Nämä hiukkaset törmäävät impaktiolevyyn ja tarttuvat siihen kiinni.

ELPI:llä voidaan siis mitata aerosolin luovuttama varaus aikayksikköä kohti jokaiselle impaktoriasteelle. Tästä voidaan lopulta muodostaa aerosolihiukkasten kokojakauma.

Tavalllisessa ELPI:ssä on 12 impaktoriastetta ja sen alimman asteen katkaisukoko on 28.9 nm. ELPI+ on ELPI:n uudempi versio, jossa on 14 impaktoriastetta. Sen alimman asteen katkaisukoko on 15,7 nm (Järvinen et al. 2014). ELPI ja ELPI+ pystyvät molemmat mittaamaan hiukkasia 10 um asti, joten molmmat ELPI:t soveltuvat hyvin mittaamaan myös isoja hiukkasia. Tämän takia ELPI ja ELPI+ valittiin instrumenteiksi mittaamaan isoja hiukkasia.

### 3.2.2 UV-APS

*UV-APS* (Ultaviolet Aerodynamic Particle Sizer) on toinen laite, joka pystyy mittaamaan isojen hiukkasten kokojakaumaa. UV-APS pystyy mittaamaan hiukkasia väliltä 0.5 um – 15 um, joten laite sopii hyvin tähän työhön mittamaan isojen hiukkasten häviöitä.

UV-APS havaitsee hiukkaset optisesti kahden laserin avulla. Laite imee näytteen (noin 1 lpm) ja suojavirtauksen (4 lpm). Suojavirtaus voi olla näyteilmaa tai huoneilmaa. Näytevirtaus menee kahden suodattimen ja yhden kriittisen aukon läpi, kunnes se yhdistyy näytevirtaukseen. Tämän jälkeen yhdistetty virtaus kiihdytetään kriittisellä aukolla. Pienemmät hiukkaset kiihdyttävät samaa tahtia virtauksen kanssa ja isommat hiukkaset jäävät jälkeen. Tämän jälkeen kahden punaisen laserin avulla mitataan hiukkasten nopeus suhteessa kaasun nopeuteen. Vertaamalla tätä kalibraatiodataan, voidaan määrittää hiukkasten aerodynaaminen koko ja lopulta aerosolin kokojakauma. (Baron, et al., 2005)

### 3.2.3 SMPS

CPC (engl. Condensation Particle Counters) on laite, jota käytetään hiukkaspitoisuuden mittaamiseen. Laitteessa hiukkaspitoisuus mitataan optisesti laserin avulla. Koska kaikista pienimpiä hiukkasia ei voida havaita optisesti, kasvatetaan ne CPC:ssä riittävän isoiksi. Hiukkaskasvu saadaan aikaan tiivistämällä hiukkasten pinnoille vesi- tai alkoholihöyryä. Jotta tiivistymistä tapahtuisi, täytyy saavuttaa ylikyllästystila. Ylikyllästystila saavutetaan CPC:stä riippuen joko lämpötilaerojen, aerosolin adiabaattisen laajenemisen tai kylmän ja kuuman virtauksen sekoittamisen avulla.

Työssä käytetetyissä CPC:eissä ylikyllästystila saavutetaan lämpötilaerojen avulla. Tälläisen CPC:n toimintaperiaate on esitelty kuvassa 3.4.



***Kuva 3.4****: Kaaviokuva lämpötilaeroihin perustuvasta CPC:stä. Saturaattori on lämitetty ja siellä vallitsee ylikyllästystila. Hiukkasten mennessä viilennettyy kondensaattoriin butanolihöyry tiivistyy hiukkasten pinnoille ja hiukkaset kasvavat. (Mukaillen jotain Hinds, 1998)*

Aerosolinäyte johdetaan lämpimään saturaattoriin, joka on kyllästetty kasvatusaineen höyryllä, joka on tyypillisesti butanolia. Tämän jälkeen hiukkaset menevät viileän kondensaatioputken läpi, jolloin höyry tiivistyy hiukkasen pinnoille. Näin hiukkaset kasvavat ja ne voidaan havaita optisesti. Pienimmät hiukkaset mitä CPC:llä voidaan havaita ovat normaalisti välillä 3 -10 nm, riippuen CPC:stä. (Cheng, 2005).

CPC voi mitata hiukkasia erikseen, mutta tässä työssä niitä käytettiin vain DMA:n ja SMPS:n yhteydessä.

DMA:n (engl. Differential Mobility analyzer) avulla pystytään valikoimaan tietyn kokoisia hiukkasia aerosolista. Tässä työssä DMA:ta käytettiin yhdessä CPC:n kanssa määrittämään hiukkasten kokojakauman selvittämiseen. DMA:n toiminta perustuu hiukkasten sähköiseen liikkuvuuteen. Aluksi hiukkaset jotka saapuvat DMA:han varataan, ja varatut hiukkaset viedään sylinteriin, jossa on sähkökenttä. Sylinterin päädyssä on ulostuloaukko, mihin päätyy vain tietynkokoiset hiukkaset, sillä erikokoiset varatut hiukkaset liikkuvat sähkökentässä eri tavalla. Aukkoon pääsevien hiukkasten koko voidaan muuttaa muuttamalla sylinterissä vallitsevaa sähkökenttää. (Flagan, 2005)

Yhdessä CPC ja DMA muodostavat SMPS:n (engl. Scanning Mobile Particle Sizer), jolla pysyttään mittaamaan aerosolin hiukkaskokojakaumaa. Ensin aerosoli johdetaan DMA:han jonka ulostuloaukosta tulee vain yhdenkokoisia hiukkasia. Hiukkasten koko riippuu DMA:n jännitteestä. Hiukkaset johdetaan CPC:n näytteenottoaukkoon ja CPC laskee tämän hiukkaskoon hiukkasten lukumäärän. DMA:n jännite muuttuu jatkuvasti, jolloin voidaan muodostaa aerosolin hiukkaskokojakauma. SMPS:llä pystytään havaitsemaan hyvin pieniä hiukkasia, minkä takia SMPS valittiin yhdeksi laitteeksi mittaamaan pieniä hiukkasia. (Flagan, 2005)

### 3.2.4 Hiukkaskoonkasvattaja (PSM)

Hiukkaskoonkasvattaja eli PSM (engl. Particle Size Magnifier) käytetään kasvattamaan liikkuvuushalkaisijaltaan 1 nm:n kokoiset aerosolihiukkaset noin 90 nm:n kokoisiksi. Näin pystytään havaitsemaan jopa alle 3 nm:n aerosolihiukkaset, kun kasvatetut hiukkaset johdetaan PSM:n jälkeen CPC:hen. Kuvassa 3.5 näkyy PSM:n toimintaperiaate.



**Kuva 3.5:** Kaaviokuva PSM:n toimintaperiaatteesta. (mukaillen Airmodus, 2015)

Puhdas ilma (yleensä paineilmaa) johdetaan saturaattoriin, missä se lämmitetään ja kyllästetään dietyleeniglykolilla (DEG). Tämän jälkeen lämmennyt ja kyllästetty ilma sekoitetaan turbulenttisesti viileämpään näyteilmaan, jolloin DEG alkaa tiivistyä hiukkasten pinnoille. Sekoittamisen jälkeen virtaus johdetaan kasvatuskammioon, missä hiukkaset jatkavat kasvuaan. Kasvatuskammion jälkeen osa virtauksesta johdetaan CPC:hen ja ylijäämä virtaus johdetaan poistoon.

Kasvatusaineen saavuttamaan kyllästysuhteeseen voidaan vaikuttaa säätämällä saturaattorin virtausta. Yleisesti sanoen kasvattamalla saturaatiovirtausta saavutetaan sekoitusalueella ja kasvatusputkessa suurempi ylikyllästystila, jolloin pystytään kasvattamaan isompia hiukkasia. (Airmodus, 2015).

PSM:n ja CPC:n yhdistelmää kutsutaan nimellä Nanokondensaatioydinlaskuri eli nCNC (engl. nano Condensation Particle Counter).

## 3.3 Isojen hiukkasten mittaaminen

Mittauksen tarkoituksena oli määrittää isojen hiukkasten (hiukkaskokoalue noin 0.1 µm – 10 µm) häviöt mobiililaboratorion näytelinjastossa. Laitteina käytettiin kahta ELPI:ä (ELPI ja ELPI+) ja yhtä UV-APS:aa. Hiukkasten tuottamiseen käytettiin pölygeneraattoria (RBG-1000). Kuvassa 3.6 näkyy mittausjärjestely, jota käytettiin isojen hiukkasten mittaamiseen.



***Kuva 3.6:*** *Isojen hiukkasten mittaamiseen tarkoitettu mittausjärjestely. Mittaukset suoritettiin seitsemällä eri virtauksella. Jokaiselle virtaukselle suoritettiin ns. automittaus, jolloin hiukkaset menivät auton linjojen läpi, ja ns. nollamittaus, jolloin auton linjasto ohitettiin. Laitteina toimivat UV-APS, ELPI ja ELPI+.*

Generaattorille syötettiin suodattimen ja hepan läpi paineilmaa. Generaattorin jälkeen oli kaksi ejektoria laimentamassa hiukkaspitoisuutta laitteille sopivaan konsentraatioon. Heti ejektorin jälkeen linjastossa oli kiinni ELPI+ (Dekati Ltd.), jolla pystyttiin tarkkailemaan generaattorin tuottamaa hiukkaspitoisuutta.

Mittauslinjastona käytettiin kahta kupariputkea (L1 ja L2). L1 oli 2.67 metriä pitkä kupariputki (sisähalkaisija 7 mm) joka oli kiinni joko auton linjastossa (ns. automittaus) tai kiinni suoraan laitteisiin menevässä linjastossa L2 (ns. nollamittaus). L2-linja oli lyhyempi 0.7 metriä pitkä kupariputki (sisähalkaisija 7 mm), josta lähti linjat mittauslaitteistoihin. L2-linja oli kiinni joko auton linjastossa (automittaus) tai suoraan kiinni L1-linjassa (nollamittaus). Linjat mittauslaitteistoihin pidettiin mahdollisimman lyhyinä.

Mittaukset suoritettiin seitsemällä eri virtauksella (10 - 40 lpm). Jokaiselle virtaukselle tehtiin ensiksi nollamittaus, eli linjat L1 ja L2 kiinnitettiin toisiinsa ja auton linjasto ohitettiin kokonaan. Nollamittauksen jälkeen suoritettiin automittaus, jolloin linjat L1 ja L2 kiinnitettiin auton linjastoon. Mittausten välillä pyrittiin pitämään linjastot mahdollisimman samassa asennossa, jotta linjastoissa L1 ja L2 tapahtuvat häviöt olisivat identtiset molemmissa tapauksissa. Näin pystytään määrittämään auton linjastossa tapahtuvat häviöt vertaamalla automittauksen ja nollamittauksen kokojakaumaa toisiinsa.

UV-APS (TSI, 3313) ja ELPI (Dekati Ltd.) sijaitsivat mobiililaboratorion takaosassa. Linjastossa oli vielä kiinni massavirtasäädin, jonka avulla pystyttiin muuttamaan linjastossa kulkevaa virtausta.

Aerosolien tuottoon käytettiin pölygeneraattori (RBG-1000). Laitteen sisälle laitettiin testipölyä, jonka hiukkaskoko on väliltä 0.5 µm -10 µm. Testipöly puserrettiin laitteen sisällä olevaan muottiin mahdollisimman tiiviisti. Hiukkasia tuotettiin paineilmaan harjalla, joka harjasi laitteen sisällä olevaa testipölyä. Tuotettujen hiukkasten määrään pystyttiin vaikuttamaan säätämällä harjan nopeutta tai säätämällä neulan nopeutta, joka nosti uutta pölyä harjan harjattavaksi. Nämä parametrit pidettiin mittausten aikana vakioina.

Kuvaan 3.7 on piirrettynä generaattorin tuottama hiukkasjakauma neljän eri mittauksen aikana ELPI+:n mittaamana. **Kuva 3.7**: *Generaattorin tuottama hiukkaskokojakauma neljässä erillisessä mittauksessa.*

Kuvasta nähdään, kuinka generaattori tuotti kahta eri moodia. Toinen, isompi moodi, on kokoalueelta 0.1 µm – 1 µm, toinen 1 µm – 10 µm. Kuvasta huomataan myös generaattorin käytön ongelma; hiukkaspitoisuus ei pysy täysin vakiona mittausten välillä, vaan hiukkaskokojakaumat muuttuvat mittausten välillä. Virtauksen ollessa 10 lpm, on generaattori tuottanut selvästi enemmän hiukkasia automittauksen aikana. Kuitenkin moodien huiput ovat pysyneet paikallaan.

## 3.4 Pienten hiukkasten mittaaminen

Pienten hiukkasten häviöiden määrittämiseen tarkoitetussa koejärjestelyssä pienet hiukkaset tuotettiin kammion avulla. Kammio on tilavuudeltaan 100 (TARKISATA) iso tefonpussi, jossa hiukkasia tuotetaan UV-valojen avulla. UV-valot ovat kammion alapuolella ja niiden aallonpituus on (JOTAIN MITÄ). Tässä työssä käytetiin vain yhtä UV-lamppua hiukkasten tuottamiseen. Kammio täytetään suodatetulla paineilmalla, joten alussa kammio on täysin tyhjä hiukkasista. Kun UV-valot laitetaan päälle, alkaa kammioon syntyä paljon pieniä hiukkasia. Kuvassa 3.8 näkyy UV-valojen vaikutuksen kammiossa PSM:n mittaamana.



***Kuva 3.8:*** *Hiukkaspitoisuus ajan funktiona kammiossa PSM:n mittaamana. Violetti pystyviiva kuvaa hetkeä jolloin UV-valot laitettiin kammiossa päälle ja punainen viiva kuvaa hetkeä jolloin valot sammutettiin kammiossa.*

Kuten kuvasta 3.8 nähdään, ei hiukkasia ala syntyä kammioon välittömästi, kun UV-valot laitetaan päälle (kuvassa violetti viiva). Noin viidessä minuutissa hiukkasia alkaa syntyä. Hiukkasia myös syntyy lisää senkin jälkeen, kun UV-valot sammutetaan (kuvassa punainen viiva). Ongelmana kammiossa hiukkasten tuoton kannalta, että pitoisuus ei pysynyt missään vaiheessa tasaisena, vaan se alkaa nopeasti laskemaan.

Laitteina mittauksessa toimivat SMPS eli CPC:n (TSI, 3775) ja DMA:n (TSI, 3085) yhdistelmä ja lisäksi nCPC eli PSM:n (Airmodus, A10) ja CPC:n (Airmodus, A20) yhdistelmä. Mittauslinjastoon oli myös kytkettynä massavirtasäädin (Alicat), jonka avulla pystyttiin muuntamaan linjastossa kulkevaa virtausta. Laitteet olivat sijoitettu mobiililaboratorion takatilaan. Kuvassa 3.9 näkyy mittausjärjestely.



***Kuva 3.9:*** *Pienten hiukkasten mittaamiseen tarkoitettu mittausjärjestely. Mittaukset suoritettiin seitsemällä eri virtauksella. Jokaiselle virtaukselle suoritettiin ns. automittaus, jolloin hiukkaset menivät auton linjojen läpi, ja ns. nollamittaus, jolloin auton linjasto ohitettiin. Laitteina toimivat tässä mittauksessa PSM ja SMPS (DMA + CPC).*

Mittauslinjasto koostui kahdesta kupariputkesta (L1 ja L2). L1 oli pituudeltaan PITUUS ja meni suoraan kammiosta auton linjastoon (ns. automittaus) tai suoraan toiseen mittauslinjaan L2 (ns. nollamittaus). L2 oli identtinen edelliseen mittaukseen verrattuna, eli 0.7 metriä pitkä kupariputki josta lähti linjat laitteisiin.

Kun hiukkasia oli muodostettu kammioon UV-valon avulla ja odotettu hiukkaspitoisuuden tasoittuvan kammiossa, aloitettiin mittaukset. Ensin suoritettiin yksi nollamittaus, eli linjat L1 ja L2 olivat suoraan kiinni toisissaan ja auton linjasto ohitettiin kokonaan. Tämän jälkeen suoritettiin automittaus, eli linjat L1 ja L2 kiinnitettiin auton linjastoon, jolloin hiukkaset menivät auton linjaston läpi. Tämän jälkeen tehtiin vielä kerran nollamittaus, jotta pystyttäisiin määrittämään kuinka paljon hiukkaspitoisuus kammiossa muuttui mittausten aikana. Tämä toistettiin seitsemällä eri virtauksella (10 – 40 lpm).

# 4. Tulokset

Tässä luvussa esitetään eriteltynä tulokset molemmille työhön suoritetulle mittaukselle. Lopuksi vielä pohditaan mittausjärjestelyjen toimivuutta ja miten niitä kannattaisi parantaa.

## 4.1 Isot hiukkaset

Nollamittauksen ja automittauksen ainoa ero oli se, että automittauksessa hiukkaset menivät linjojen L1 ja L2 lisäksi auton linjojen läpi. Automittauksessa ja nollamittauksessa pyrittiin pitämään kaikki linjastot samoissa asennoissa, jotta häviöt putkissa L1 ja L2 olisivat identtiset mittausten välillä. Näin ollen ero hiukkaspitoisuuksissa mittausten välillä johtui häviöistä auton linjastoissa ja hävinneiden hiukkasten lukumäärä pystytään laskemaan automittausten ja nollamittausten hiukkasten lukumäärän erotuksena. Tämä toimii kuitenkin ainoastaan, jos hiukkasten tuotto on tasaista. Kuitenkin generaattorin tuottama hiukkaspitoisuus ei pysynyt tasaisena kuten alikappaleessa 3.3 todettiin, joten tämä täyty ottaa huomioon laskettaessa häviöitä. Häviöt laskettiin kaavan (4.1) mukaisesti

. (4.1)

Normalisointi tehtiin ELPI+:n mittaamasta datasta. Koska ELPI+ oli kiinni mittauslinjastossa heti ejektorien jälkeen, ei sitä ennen tapahtunut ollenkaan mitään häviöitä. Laskemalla nollamittauksen ja automittauksen hiukkaspitoisuuden suhteen jokaiselle hiukkaskoolle, saadaan kerroin jolla pystytään normalisoimaan generaattorin tuottama hiukkaskokojakauman. Näin vaihtelut generaattorin tuottamassa hiukkaskokojakaumassa eivät vaikuta tulokseen.

UV-APS tuotti hiukkaskokojakauma 20 sekunnin välein ja ELPI tuotti hiukkaskokojakauman reaaliaikaisesti. Yhdestä mittauksesta tuli aina useita jakauma, joten datasta laskettiin mediaanit, joita sitten käytettiin laskemaan hiukkashäviöt.

Kuviin 4.1-4.7 on koottuna mitatut ja teoreettiset häviöt kullekin virtaukselle. Mustat tähdet ovat UV-APS:n datasta laskettuja häviöitä ja pinkit tähdet ovat ELPI:n datasta lasketut häviöt. Teoreettiset häviöt on laskettu työtä varten toteutetulla Matlab-funktiolla. Kuviin on lisäksi piirrettynä häviöiden keskihajonta. TARKISTA

***Kuva 4.1:*** *Teoreettinen ja mitatut häviöt 10 lpm virtaukselle*



***Kuva 4.2:*** *Teoreettinen ja mitatut häviöt 15 lpm virtaukselle.*



**Kuva 4.3:** *Teoreettinen ja mitatut häviöt 20 lpm virtaukselle.*



***Kuva 4.4:*** *Teoreettinen ja mitatut häviöt 25 lpm virtaukselle.*



***Kuva 4.5:*** *Teoreettinen ja mitatut häviöt 30 lpm virtaukselle.*



***Kuva 4.6:*** *Teoreettinen ja mitatut häviöt 35 lpm virtaukselle.*



***Kuva 4.7:*** *Teoreettinen ja mitatut 40 lpm virtaukselle.*

Kuvista huomataan, että varsinkin ELPI:istä lasketut häviöt noudattavat hyvin teoreettista mallia. Jokaisessa tapauksessa pienillä (alle 1 µm) häviöitä ei ole lainkaan. Hiukkaskokoalueella 1-3 µm ELPI:llä mitatut häviöt ovat hiukan suurempia kuin teoreettisesti ennustetut häviöt. Tästä isommilla hiukkasilla teoreettinen malli antaa hiukan isommat häviöt kuin mitatut häviöt. Varsinkin isomilla hiukkasilla kuin 5 µm teoreettinen malli antaa selvästi isompia häviöitä. Tämä voi johtua siitä, että generaattori ei ole välttämättä tuottanut paljon näin isoja hiukkasia, jolloin suhteellinen virhe laskiessa häviöitä on suuri. Kuitenkin yleisesti häviöt ovat hyvin linjassa teorian kanssa. Eniten mitatut häviöt poikkeavat teoreettisista häviöistä virtauksilla 10 ja 15 lpm (kuvat 4.1 ja 4.2). Mitä suurempi virtaus, sitä paremmin mitatut tulokset noudattavat teoriaa.

UV-APS:sista lasketut häviöt ovat huomattavasti sotkuisempia kuin ELPI:istä lasketut ja seuraavat huonommin teoreettista mallia. Pienillä virtauksilla (kuvat 4.1 ja 4.2) mittaus näyttää suuria häviöitä pienille hiukkasille. Molemmilla virtauksilla näkyy 1 µm kohdalla piikki häviöissä. Kaikilla virtauksilla näkyy häviöiden laskua mentäessä kohti isoja hiukkasia. Tämä kuitenkin johtuu siitä, että generaattori ei tuottanut tarpeeksi isoja hiukkasia (> 6 µm). Koska tämän kokoisia hiukkasia oli erittäin vähän, suhteellinen virhe kasvaa hyvin suureksi. Näitä pisteitä ei kannata ottaa ollenkaan huomioon.

Isoilla virtauksilla (kuvat 4.6-4.7) mitatut häviöt ovat hyvin suuria kaikilla hiukkaskoilla. Varsinkin alle 3 µm hiukkasille häviöt ovat huomattavasti suurempia kuin ELPI:n mittaamana tai teoreettisen mallin ennustamana. Näillä virtauksilla automittaus on epäonnistunut UV-APS:n kohdalla. Tällöin hiukkasia ei ole päätynyt juuri ollenkaan UV-APS:lle. Kuvassa 4.8 on piirrettynä nollamittauksen ja automittauksen hiukkaskokojakauma 40 lpm virtauksella. Kuten kuvasta huomataan, ei automittauksessa ole juuri tullut hiukkasia laitteelle. Sama ilmiö näkyy 35 lpm virtauksella. Näin ollen näillä virtauksilla ei kannatta huomioida ollenkaan UV-APS:sta saatua dataa.

***Kuva 4.8:*** *UV-APS:in kokojakauma 40 lpm virtauksella nollamittauksessa ja automittauksessa. Automittauksessa hiukkasia ei ole tuuri juuri ollenkaan mittalaitteelle.*

Mahdollisesti UV-APS:in inletti on irronnut mittauslinjastosta ja on mitannut mittauksen aikana huoneilmaa. Toinen mahdollisuus on, että linjaan ennen UV-APS:ia on tullut jonkinlainen ylimääräinen kuristus tai mutka, josta hiukkaset ole päässeet läpi.

## 4.2 Pienet hiukkaset

Pienten hiukkasten häviöiden mittaamisessa oli enemmän ongelmia kuin isojen hiukkasten häviöiden mittaamisessa, mutta mittauksista saatiin kuitenkin laskettua suuntaa antavia häviöitä. Suurimpana ongelmana oli se, että hiukkaspitoisuus ei pysynyt tasaisena mittauksen aikana, vaan pienet hiukkaset hävisivät nopeasti kammion seinämille ja koagulaation vaikutuksesta. Kuvassa 4.9 on esitettynä yhdellä virtauksella (20 lpm) tehdyt nollamittaukset ja automittaus.



***Kuva 4.9:*** *SMPS:n mittaamat hiukkaskokojakaumat virtaukselle 20 lpm. Hiukkaskokojakauma on siirtynyt ajan kuluessa kohti isompia hiukkasia, eli hiukkaset ovat kasvaneet kammiossa.*

Hiukkaskokojakauma on siirtynyt ajan myötä kohti isompia hiukkasia. Nollamittaus 1 suoritettiin ensimmäisenä, jolloin kammiossa oli eniten pieniä hiukkasia. Muissa mittauksissa hiukkaskokojakauma on siirtynyt kohti isompia hiukkasia, eli pieniä hiukkasia on hävinnyt kammiosta ja olemassa olevat hiukkaset ovat kasvaneet. Tämä on osittain johtunut koagulaatiosta kammion sisällä, eli isot hiukkaset ovat ”syöneet” pienet hiukkaset, jolloin isot hiukkaset ovat kasvaneet. Osa pienistä hiukkasista ovat hävinneet kammion seinille.

Kahden nollamittauksen avulla pystyttiin arvioimaan hiukkasten kasvunopeutta kammion sisällä. Vertaamalla nollamittauksen jakaumien huippujen paikkaa, laskettiin kasvunopeus hiukkasille kammiossa. Tämän kasvunopeuden avulla saatiin arvioitua hiukkaskokojakauma, mikä vallitsi kammiossa automittauksen aikana. Tämä arvioitu hiukkaskokojakauma on piirretty kuviin 4.10 – 4.17 automittauksessa mitatun hiukkaskokojakauman kanssa.



***Kuva 4.10:*** *SMPS:n mittaamat hiukkaskokojakaumat 10 lpm virtaukselle. Kuvaan on piirretty nollamittausten perusteella laskettu hiukkaskokojakauma, joka vallitsi kammiossa automittauksen aikana.*



***Kuva 4.11:*** *SMPS:n mittaamat hiukkaskokojakaumat 15 lpm virtaukselle. Kuvaan on piirretty nollamittausten perusteella laskettu hiukkaskokojakauma, joka vallitsi kammiossa automittauksen aikana.*



***Kuva 4.12:*** *SMPS:n mittaamat hiukkaskokojakaumat 20 lpm virtaukselle. Kuvaan on piirretty nollamittausten perusteella laskettu hiukkaskokojakauma, joka vallitsi kammiossa automittauksen aikana.*



***Kuva 4.13:*** *SMPS:n mittaamat hiukkaskokojakaumat 25 lpm virtaukselle. Kuvaan on piirretty nollamittausten perusteella laskettu hiukkaskokojakauma, joka vallitsi kammiossa automittauksen aikana.*



***Kuva 4.14:*** *SMPS:n mittaamat hiukkaskokojakaumat 30 lpm virtaukselle. Kuvaan on piirretty nollamittausten perusteella laskettu hiukkaskokojakauma, joka vallitsi kammiossa automittauksen aikana.*



***Kuva 4.15:*** *SMPS:n mittaamat hiukkaskokojakaumat 35 lpm virtaukselle. Kuvaan on piirretty nollamittausten perusteella laskettu hiukkaskokojakauma, joka vallitsi kammiossa automittauksen aikana.*

***Kuva 4.16:*** *SMPS:n mittaamat hiukkaskokojakaumat 40 lpm virtaukselle. Kuvaan on piirretty nollamittausten perusteella laskettu hiukkaskokojakauma, joka vallitsi kammiossa automittauksen aikana*

Virtauksilla 10 -25 lpm (KUVAT), nollamittauksista määritetty hiukkaskokojakauma ja automittauksessa mitattu hiukkaskokojakauma ovat lähes identtiset kaikilla hiukkaskoilla. Molemmissa mittauksissa sama määrä hiukkasia saavutti laitteet, eli merkittäviä häviöitä auton linjastossa ei ollut. Tämä sopii hyvin yhteen teorian kanssa. SMPS mittasi hiukkasia kokoalueella 10 -110 nm, ja teoreettisesti näiden häviöiden pitäisi olla vain muutamia prosentteja.

Virtauksilla 30 – 40 lpm (KUVAT) mitatutuissa hiukkaskokojakaumissa näkyy selvästi toinen moodi kokoalueella 80-110 nm. Tämä toinen moodi johtuu todennäköisimmin siitä, että kammiossa on laitettu UV-valot päälle liian nopeasti edellisten hiukkasten tuottamisen jälkeen. Tämä toinen moodi on saattanut syödä pieniä hiukkasia paljon nopeammin kuin muissa mittauksissa.

Virtauksilla 30 lpm ja 40 lpm (KUVAT) pieniä hiukkasia on ollut enemmän nollamittauksen aikana. Todennäköisimmin tämä johtuu siitä, että kammiossa on vielä syntynyt hetken aikaa uusia hiukkasia mittauksen aikana. Kokojakaumat eivät kuitenkaan poikkea toisistaan erityisen paljon, joten tässäkin tapauksessa voidaan arvioida, että häviöt ovat tällä kokoalueella erittäin pieniä.

Alle 10 nm kokoisille hiukkasille tapahtuvia häviöitä voidaan arvioida PSM:n datan avulla. PSM:n saturaattorivirtausta pidettiin mittausten aikana vakiona. Tämän saturaattorivirtauksen leikkausraja vastasi 1.2 nm kokoisia hiukkasia, joten PSM:n datasta saadaan siis selville niiden kaikkien hiukkasten lukumäärä, jotka ovat suurempia kuin 1.2 nm. SMPS:n datan perusteella voidaan olettaa että 10 – 110 nm kokoisille hiukkasille häviöitä ei tapahdu, joten kaikki häviöt ovat diffuusiohäviöitä, joita tapahtuu alle 10 nanometrin kokoisille hiukkasille.

Kuvissa (KUVAT) ovat esitettynä PSM:n datat. Kahden nollamittauksen perusteella laskettiin sovite hiukkasten lukumäärästä mittauksen aikana. Vertaamalla sovitetta ja automittauksessa mitattua hiukkaspitoisuutta voidaan arvioida hiukkashäviöitä. Sovite on piirrettynä punaisella kuvaajiin. Vain kolmen tapauksen (virtaukset 10, 35 ja 40 lpm) mittausdata on esitetty. Muissa tapauksissa mittaustuloksista ei voida määrittää minkäänlaista arvioita häviöille. Mitattu hiukkaspitoisuus automittauksessa on näissä tapauksissa hyvin lähellä sovitetta. Todennäköisesti näissä mittauksissa kammiossa ei ole ollut ollenkaan hyvin pieniä hiukkasia (< 10 nm) mittauksen alkaessa.



***Kuva 4.17:*** *PSM:n mittaamat hiukkaspitoisuudet 10 lpm virtaukselle.. Mustalla ja sinisellä piirretyt viivat ovat nollamittauksista saadut pitoisuudet. Näiden perusteella laskettiin sovite (punainen viiva), joka kuvaa hiukkaspitoisuuden käyttäytymistä koko mittauksen aikana. Kuvaan on myös merkittynä laskettu häviö.*



***Kuva 4.18:*** *PSM:n mittaamat hiukkaspitoisuudet 35 lpm virtaukselle.. Mustalla ja sinisellä piirretyt viivat ovat nollamittauksista saadut pitoisuudet. Näiden perusteella laskettiin sovite (punainen viiva), joka kuvaa hiukkaspitoisuuden käyttäytymistä koko mittauksen aikana. Kuvaan on myös merkittynä laskettu häviö.*



***Kuva 4.19:*** *PSM:n mittaamat hiukkaspitoisuudet 40 lpm virtaukselle.. Mustalla ja sinisellä piirretyt viivat ovat nollamittauksista saadut pitoisuudet. Näiden perusteella laskettiin sovite (punainen viiva), joka kuvaa hiukkaspitoisuuden käyttäytymistä koko mittauksen aikana. Kuvaan on myös merkittynä laskettu häviö.*

Kuvaajiin on merkittynä mittausdatasta lasketut häviöt. Häviöt on laskettu kaavalla ()

Kuvaajissa esitetty häviö on keskiarvo mittauksen aikavälillä lasketuista häviöistä ja virherajat ovat tämän keskihajonta. Mittausten perusteella häviöt ovat 12- 17 % alle 10 nanometrin hiukkasilla, kasvaen isommilla virtauksilla. Pienimmät häviöt olivat 10 lpm virtauksilla (12 %), kun taas isoimmat häviöt olivat isolla virtauksilla (40 lpm).

Teoreettisesti tämän suuruisia häviöitä tapahtuu hiukkasille kokoalueella 5-7 nm (KUVA). Virtaukselle 10 lpm 12% suuruisia häviötä tapahtuu noin 7 nm hiukkasille ja 40 lpm virtaukselle 17 % häviötä tapahtuu noin 5 nm hiukkasille. Jo SMPS:n datan kanssa havaittiin pienten hiukkasten häviävän nopeasti, joten on hyvin todennäköistä, että kammiossa ei ole ollut juurikaan alle 5 nm hiukkasia. Näin ollen pienimmät hiukkaset, joita on merkittävissä määrin päätynyt mittalaitteistolle ovat olleet kokoluokkaa 5 – 7 nm. Mittausdatasta lasketut häviöt ovat siis suhteellisen hyvin linjassa teorian kanssa.

## 4.3 Mittausjärjestelyjen toimivuus

Tässä kappaleessa tarkastellaan kahden työssä toteutetun mittausjärjestelyn toimivuutta ja kuinka niitä olisi voitu parantaa.

Isojen hiukkasten häviöiden mittaaminen sujui hyvin kahdesta työssä toteutetussa mittauksessa paremmin. Generaattori oli hyvä tapa tuottaa isoja hiukkasia, vaikka generaattorin tuottama hiukkaspitoisuus ei ollutkaan täysin tasaista. Tämä ongelma kuitenkin onnistuttiin kiertämään ELPI+:n avulla jolla pystyttiin normalisoimaan hiukkaspitoisuus.

Pienten hiukkasten häviöiden mittaaminen ei taas onnistunut erityisen hyvin. Kammio oli huono tapa tuottaa pieniä hiukkasia, sillä hiukkaspitoisuus ei pysynyt kammiossa pitkään tasaisena. Pienet hiukkaset (< 10 nm) hävisivät hyvin nopeasti pois kammiosta, eikä näiden hiukkasten häviöitä saatu mitattua erityisen luotettavasti. Pienet hiukkaset olisi kannattanut tuottaa jollain muulla tavalla, jolloin hiukkasia olisi syntynyt luotettavammin ja tasaisemmin.

Lisäksi molemmissa mittauksissa olisi voinut hyödyntää DMA:ta. Hiukkasten tuottamisen jälkeen mittauslinjastossa olisi voinut olla DMA, jolloin mittauslaitteille olisi aina päätynyt vain yhdenkokoisia hiukkasia. Mittauksia olisi tehty usealla eri DMA:n jännittellä, jolloin aina eri hiukkaskoko olisi päätynyt mittalaitteille. Näin hiukkaspitoisuus tietylle hiukkaskoolle olisi saatu laskettua vertaamalla vain kahden mittauksen

# 3. Yhteenveto

Työtä varten toteutettiin kaksi erillistä mittausta määrittämään hiukkashäviöt TTY:n Aerosolifysiikan mobiililaboratoriossa. Lisäksi työssä toteutettiin Matlab-ohjelma, jolla pystytään laskemaan mobiililaboratoriossa tai missä tahansa muussa mittausjärjestelyssä tapahtuvia häviöitä.

Isojen hiukkasten häviöiden määrittäminen onnistui hyvin ja mittaustulokset olivat suhteellisen hyvin linjassa teorian kanssa. Mittauksissa havaittiin, että hiukkaskokoalueella 0.1 – 1 µm häviöitä ei ole juuri lainkaan, mutta jo 10 µm kokoisilla hiukkasilla häviöt voivat olla jopa 80 %. UV-APS mitatut häviöt olivat sotkuisempia, mutta ELPI:llä lasketut häviöt seurasivat suhteellisen hyvin Matlab- ohjelmalla laskettuja teoreettisia häviötä. Isommilla hiukkasilla teoreettiset häviöt antoivat liian isoja häviöitä, muuten teoreettinen ja mitatut häviöt kohtasivat hyvin. Häviölaskuria voidaankin käyttää hyvin arvioimaan isojen hiukkasten häviöitä mobiililaboratoriossa.

Pienten hiukkasten häviöiden määrittämisessä oli enemmän ongelmia. Jo mittausten aikana havaittiin kammion olevan huono tapa tuottaa pieniä hiukkasia, sillä hiukkaspitoisuus muuttui nopeasti ajan funktiona. Kuitenkin jonkinlaisia arvioita häviöistä pystyttiin toteamaan. SMPS:n datan perusteella hiukkaskokoalueella 10 – 110 nm häviöitä ei juurikaan ole. Tämä on hyvin linjassa teorian kanssa, sillä tällä kokoalueella häviöiden pitäisi mobiililaboratoriossa olla hyvin pieniä. PSM:n datasta arvioitiin alle 10 nm hiukkasten häviöitä. Vain kolmella eri virtauksella suoritetuista mittauksista saatiin arvioitua häviöitä. Muissa tapauksissa kaikki pienet hiukkaset olivat jo hävinneet kammiosta. Näistä mittauksista arvioiden häviöt ovat kokoluokkaa 12 % - 17 % riippuen linjastossa vallitsevasta virtauksesta. On todennäköistä, että alle 5 nanometrin hiukkasia ei ole päätynyt merkittävästi mittauslaitteille, vaan pienimmät hiukkaset ovat kokoalueella 5- 7 nm, joten lasketut häviöt ovat hyvin linjassa teorian kanssa.

Pienten hiukkasten ei onnistunut tässä työssä erityisen hyvin. Alle 10 nanometrin hiukkasten häviöille voitiin esittää vain arvio eikä alle 5 nanometrin häviöitä saatu mitattua ollenkaan. Nämä mittaukset voitaisiin suorittaa uudestaan paremmalla mittausjärjestelyilla, jos halutaan parempi arvio häviöstä alle 10 nanometrin hiukkasille. Hiukkasten tuotto pitäisi tehdä jollakin muulla tavalla kun kammiolla ja DMA:ta voitaisiin käyttää hyväksi mittauksissa.

Tämän työn pohjalta olisi mielenkiintoista vielä mitata mobiililaboratorion sisäänmenotehokkuus ja verrata sitä Matlab- ohjelmalla laskettuihin teoreettisiin sisäänmenotehokkuuksiin. Mobiililaboratoriossa suoritetaan usein mittauksia ajon aikana, joten olisi tärkeä tietää tarkasti mobiililaboratorion sisäänmenotehokkuus. Tämän tehokkuuden mittaaminen on kuitenkin huomattavasti haastavampaa kuin linjahäviöiden mittaaminen, eikä sitä tässä työssä mitattu.

# Lähdeluettelo

Agarwal, J. & Liu, B. Y. H., 1980. A criterion for accurate aerosol sampling in calm air. *American Industrial Hygiene Association Journal,* Osa/vuosikerta 41, pp. 191-197.

Airmodus, 2015. nano Condensation Nucleus Counter System, Model A11 nCNC. Teoksessa: *User manual, Version 1.85.* s.l.:Airmodus Ltd..

Baron, P., Mazumder, M. & Cheng, Y., 2005. Direct-Reading Techniques Using Particle Motion and Optical Detection. Teoksessa: *Aerosol Measurement, 2nd Edition.* New York: A John Wiley & Sons, Inc., Publication, pp. 495-527.

Belyaev, S. P. & Levin, L. M., 1972. Investigation of Aerosol Aspiration by Photographing Particle Tracks Under Flash Illumination. *Journal of Aerosol Science,* Osa/vuosikerta 5, pp. 127-140.

Canagaratna, M. ym., 2004. Chase studies of particulate emissions from in-use New York City vehicles. *Aerosol Science and Technology,* pp. 2182-2189.

Cheng, Y., 2005. Condensation Detection and Diffusion Size Separation Techniques. Teoksessa: *Aerosol Measurement: Principles, Techniquers and Applications, 2nd edition.* New York: A John Wiley & Sons, Inc, Publication, pp. 569-596.

Cheng, Y. S. & Wang, C. S., 1981. Motion of particles in bends of circular pipes. *Atmospheric Environment,* Issue 15, pp. 301-306.

Crane, R. L. & Evans, R. L., 1977. Inertial dpeosition of particles in a bent pipe. *Journal of Aerosol Science,* Osa/vuosikerta 5, pp. 81-91.

Davies, C. N., 1968. The entry of aerosols into sampling tubes and heads. *British Journal of Applied Science,* Osa/vuosikerta 1, pp. 921-932.

Durham, M. D. & Lundgren, D. A., 1980. Evaluation of Aerosol Aspiration Efﬁciency as a Function of Stokes Number, Velocity Ratio and Nozzle Angle. *Journal of Aerosol Science,* Osa/vuosikerta 11, pp. 179-188.

Flagan, R., 2005. Electrical Techniques. Teoksessa: *Aerosol Measurement: Principles, Techniques and Applications, 2nd Edition.* New York: A John Wiley & Sons, Inc., Pulication, pp. 537-551.

Friendlander, S. & Johnstone, H., 1957. Deposition of Suspended Particles from Turbulent Gas Streams. *Industrial & Engineering Chemistry,* Osa/vuosikerta 49, p. 1151– 1156.

Friendlander, S. K., 1977. *Smoke, Dust and Haze.* New York: John Wiley & Sons.

Fuchs, N., 1964. *The Mechanics oF Aerosols.* Oxford: Pergamon.

Gormley, P. & Kennedy, M., 1949. Diffusion From a Stream Following Through a Cylindrical Tube. *Proceedings of Royal Irish Academy, 52,* p. 163–169.

Grinshpun, S., Willeke, K. & Kalatoors, S., 1993. A general equation for aerosol aspiration by thin-walled sampling probes in calm and moving air. *Atmospheric Environment,* Osa/vuosikerta 27A, pp. 1459-1470.

Grinshpun, S., Willeke, K. & Kalatoors, S., 1994. Corrigendum: A general equation for aerosol aspiration by thin-walled sampling probes in calm and moving air. *Atmospheric Environment,* Osa/vuosikerta 28, p. 375.

Hangal, S. & Willeke, K., 1990a. Aspiration Efﬁciency – Uniﬁed Model for All Forward Sampling Angles. *Environmental Science & Technology,* Osa/vuosikerta 24, pp. 688-691.

Hangal, S. & Willeke, K., 1990b. Aspiration Efficiency: Overall Efficiency of Tubular Inlets Sampling at 0-90 Degrees From Horizontal Aerosol Flow. *Atmospheric Environment,* Osa/vuosikerta 24A, pp. 2379-2386.

Heyder, J. & Gebhart, J., 1977. Gravitational Deposition of Particles From Laminar Aerosol Flow Through Inclined Circular Tubes. *Journal of Aerosol Science,* Osa/vuosikerta 8, p. 289–295.

Hinds, W., 1998. *Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Airboren Particles.* New York: Wiley-Interscience.

Holman, J., 1972. *Heat Transfer.* New York: McGrawHill.

Järvinen, A. ym., 2014. Calibration of the new electrical low pressure impactor (ELPI+). *Journal of Aerosol Science,* Osa/vuosikerta 69, pp. 150-159.

Keskinen, J., Pietarinen, K. & Lehtimäki, M., 1992. Electrical low pressure impactor. *Journal of Aerosol Science,* Osa/vuosikerta 23, pp. 353-360.

Kittelson, D. ym., 2000. Diesel aerosol sampling in the atmosphere. *SAE Technical Paper Series.*

Lee, K. W. & Gieseke, J. A., 1994. Deposition of Particles in Turbulent Pipe Flows. *Journal of Aerosol Science,* Osa/vuosikerta 25, pp. 699-709.

Liu, B. Y. H., Pui, D. Y. H., Rubow, K. L. & Szymanski, W. W., 1985. Electrostatic effects in aerosol sampling and filtration. *The Annals of Occupational Science,* Osa/vuosikerta 25, pp. 251-269.

Liu, B., Zhang, Z. & Kuehn, T., 1989. A Numerical Study of Inertial Errors in Anisokinetic Sampling. *Journal of Aerosol Science,* Osa/vuosikerta 20, p. 367–380.

Muyshondt, A., McFarland, A. R. & Anand, N. K., 1996. Deposition of Aerosol Particles in Contraction Fittings. *Aerosol Science and Technology,* Osa/vuosikerta 24, p. 205–216.

Okazaki, K., Wiener, R. W. & Willeke, K., 1987. Isoaxial Aerosol Sampling: Nondimsenional Representitation of Overall Sampling Efficiency. *Environmental Science & Technology,* Osa/vuosikerta 21, pp. 183-187.

Potila, O., 2015. *Kaupunki-ilman hiukkasten lukumääräpitoisuus ja kokojakauma Tampereella.* Diplomityö toim. s.l.:Tampereen Teknillinen Yliopisto.

Pui, D. Y. H., Romaynovas, F. & Liu, B. Y. H., 1987. Experimental Study of Particle Deposition in Bends of Circular Cross Section. *Aerosol Science & Technology,* Osa/vuosikerta 7, pp. 301-315.

Pöschl, U., 2005. Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects. *Angewandte Chemie (Internationl ed. in English),* pp. 7520-40.

Wang, M. ym., 2009. Use of a mobile laboratory to evaluate changes in on-road air pollutants during the Beijing 2008 summer olympics. *Atmospheric Chemistry and Physics,* Osa/vuosikerta 9, pp. 8247-8263.

Weiden, S., Drewnick, F. & Borrmann, S., 2009. Particle Loss Calculator - a New Software Tool for the Assessment of the Performance of Aerosol Inlet System. *Atmospheric Measurement Techniques,* Osa/vuosikerta 2, pp. 479-494.

Wen, H. Y. & Kesper, G., 1989. On the kinetics of particle re-entrainment from surfaces. *Journal of Aerosol Science,* Osa/vuosikerta 20, p. 20:483.498.

Willeke, K. & Baron, P., 2005. *Aerosol Measurement: Principles, Techiques and Applications.* New York: A John Wiley & Sons, Inc., Publication.

Wilson, J. G., Kingham, S. P. J. & Sturman, A. P., 2005. A review of intraurban variations in particulate air pollution: Implications for epidemical research. *Atmospheric Environmental,* Osa/vuosikerta 39, pp. 6444-6462.