



UNIVERSITY OF
EASTERN FINLAND



Finnish Institute of
Occupational Health



Työsuojelurahasto
Arbetarskyddsfonden
The Finnish Work Environment Fund

NANOHIUKKASTEN MONITOROINTI TYÖNTEKIJÄN HENGITYSVYÖHYKKEELTÄ ALTISTUMISTASOJEN SELVITTÄMISEKSI

Työsuojelurahaston hankkeen 115172 loppuraportti

Itä-Suomen Yliopisto:

Mirella Miettinen, Maija Leppänen, Jani Leskinen, Tiina Torvela

Työterveyslaitos:

Anneli Kangas, Tomi Kanerva, Arto Säämänen, Anna-Kaisa Viitanen

ITÄ-SUOMEN YLIOPISTO

YMPÄRISTÖ- JA BIOTIETEIDEN LAITOS

KUOPIO

2017

Grano Oy
Jyväskylä, 2017

Itä-Suomen yliopiston kirjasto
PL 107, 80101 Joensuu
puh. +358-50-3058396
<http://www.uef.fi/kirjasto>

ISBN: 978-952-61-2531-2 (nid.)
ISBN: 978-952-61-2532-9 (PDF)

ESIPUHE

Tämä on Työsuojelurahaston rahoittaman hankkeen *Nanohiukkasten monitorointi työntekijän hengitysvyöhykkeeltä altistumistasojen selvittämiseksi* (HEVY-NANO) loppuraportti.

Hankkeen toteuttivat Itä-Suomen yliopiston Ympäristö- ja biotieteiden laitos, Työterveyslaitos ja CoorsTek Sensors. Hankkeessa tehtiin työpaikkamittauksia kahdessa konepajassa, sekä yhdessä keittiökalusteita ja MDF-ovia valmistavassa yrityksessä, leipomossa, ja kampaamossa. Hankkeen vastuullisena johtajana toimi FT Mirella Miettinen. Tutkijat Jani Leskinen (FT), Maija Leppänen (FT), Anneli Kangas (FM), Tomi Kanerva (DI), ja Anna-Kaisa Viitanen (TkT) osallistui-
vat mittauksiin työpaikoilla. Tutkija Tiina Torvela (FT) analysoi elektronimikroskooppinäytteet, ja vanhempi asiantuntija Arto Säämänen (FT) osallistui tulosten käsittelyyn ja analysointiin.

Kiitämme Työsuojelurahastoa, Työterveyslaitosta ja Itä-Suomen yliopistoa hankkeen rahoituksesta. Hankkeeseen osallistuneille yrityksille ja niiden henkilöstölle kiitos osallistumisesta hankkeeseen sekä hyvästä yhteistyöstä hankkeen aikana. Kiitos myös hankkeen johtoryhmälle saamastamme ohjauksesta ja yhteistyöstä. Työterveyslaitoksen ja Itä-Suomen yliopiston henkilökuntaa kiitämme avusta ja tuesta hankkeen aikana.

Kuopiossa ja Tampereella 15.6.2017

Kirjoittajat

Tähän raporttiin liittyvät tiedustelut voi osoittaa Mirella Miettiselle, yhteystiedot alla.

Mirella Miettinen

Itä-Suomen yliopisto
Ympäristö- ja biotieteiden laitos
Pienhiukkas- ja aerosolitekniiikan laboratorio
PL 1627, 70211 Kuopio
puh. +358 40 355 3217
mirella.miettinen@uef.fi

TIIVISTELMÄ

Hankkeessa tuotettiin tietoa työntekijöiden altistumistasoista nanohiukkasille ($D_{50} \approx 0.5 \mu\text{m}$ tässä tutkimuksessa) eri toimialoilla. Hankkeessa tutkitut toimialat edustivat konepaja-, elintarvike- ja kalusteteollisuutta sekä palvelualaa. Mittauksia tehtiin kaikissa yrityksissä yhden työntekijän hengitysvyöhykkeeltä ja kiinteästä pisteestä mahdollisimman lähellä ko. työntekijän työpistettä sekä tarvittaessa kauempaa työpisteeltä (taustapiste). Hankkeeseen osallistuneiden työntekijöiden työnimikkeet olivat: CNC-koneistaja (konejapa 1), hitsaaja (konepaja 2), tiiminvetäjä (kalustetehtas), taikinantekijä (leipomo), ja kampaaja (kampaamo).

Jokaisella tutkitulla työpaikalla pystyttiin tunnistamaan työvaiheita tai prosesseja, joiden aikana työpaikan ilmaan vapautui nanohiukkasia. Nämä työvaiheet erottuivat parhaiten lukumääräpitoisuuden aikasarjoista sekä hengitysvyöhykkeeltä että kiinteästä pisteestä mitattuna. Eniten nanohiukkasia vapautui konepajateollisuudessa hitsauksen ja metallin työstön aikana. Myös leipomossa mitattiin verrattain suuria nanohiukaspitoisuuksia, jotka olivat peräisin pääosin paistosta ja uuneista. Muita työvaiheita, joiden aikana mitattiin taustaan nähden kohonneita nanohiukaspitoisuuksia, olivat hiusten käsittely muotoilutuotteilla ja väriaineilla sekä hionta käsin ja koneellisesti. Hitsauksen aikana mittaukset tehtiin hengityksensuojaimen ulkopuolelta, joten pitoisuudet eivät edusta työntekijän altistumista vaan tilannetta, jossa hengityksensuojain ei olisi käytössä. Konepajoissa työntekijöiden hengitysvyöhykkeeltä kerätyt nanohiukkaset sisälsivät terveydelle haitallisia metalleja, HTP-arvoihin verrattaessa eniten mangaania ja nikkeliä. Kalustetehtaassa, leipomossa ja kampaamossa hiukkaset olivat pääosin orgaanisia.

Lisäksi hankkeessa kehitettiin nanohiukkasten mittaustekniikkaa työntekijöiden hengitysvyöhykkeeltä. Hankkeessa suunniteltiin ja valmistettiin esierotin, jonka avulla määritettiin gravimetrisesti nanohiukkasten massapitoisuus työntekijän hengitysvyöhykkeellä. Esierotinta käytettiin myös tutkittaessa suurempien hiukkasten vaikutusta kaupallisten nanohiukkasten mittaamiseen tarkoitettujen laitteiden antamiin mittaustuloksiin. Esierotin ei vaikuttanut kiinteästä pisteestä mitattuun lukumääräpitoisuuteen yhdelläkään tutkitulla työpaikalla. Ainoastaan kalustetehtaassa tehdyissä mittauksissa esierottimella oli vaikutusta keuhkoihin teoreettisesti kertyvien hiukkasten pinta-pitoisuuteen (C_{LDSA}). Kiinteästä pisteestä mitatussa reaaliaikaisessa massapitoisuudessa esierottimen käyttö näkyi sen sijaan selvästi.

Nanohiukkasten massapitoisuus työntekijän hengitysvyöhykkeellä oli suurin leipomossa, jossa myös hengittyvän pölyn pitoisuus hengitysvyöhykkeellä oli korkea. Myös kalustetehtaassa nanohiukkasten massapitoisuus työntekijän hengitysvyöhykkeellä oli verrattain korkea, mutta lukumäärä- ja LDSA-pitoisuudet sen sijaan matalia. Tämä viittaa tämän tutkimuksen nanokoluokan ($D_{50} \approx 0.5 \mu\text{m}$) ylärajoilla olevien hiukkasten esiintymiseen työntekijän hengitysvyöhykkeellä kalustetehtaassa.

Altistuminen hengittyville hiukkasille oli tutkituista kohteista suurinta leipomossa. Suurin nanohiukkasaltistuminen mitattiin konepajassa erityisesti hitsauksen vaikutuksesta. Konepajoissa ilmaan vapautuvat metallit lisäävät altistumisen haitallisuutta, ja näissä kohteissa riskinhallinnan toimenpiteet ja henkilökohtaisten suojainten käyttö ovat tärkeitä. Kalustetehtaassa

puupölylle altistuminen oli kohtalaista mutta nanohiukkasille altistuminen oli puolestaan hyvin pientä. Kampaamossa altistuminen sekä hengittyville hiukkasille että nanokokoluokan hiukkasille oli verrattain pientä.

Hankkeen tuloksena laadittiin suositukset nanohiukkasaltistumisen hallintaan työpaikoilla. Toimenpidesuosituksia voivat hyödyntää kaikki työpaikat, joissa on mahdollista altistua nanohiukkasille. Altistumisen hallinnan tulee perustua ensisijaisesti päästöjen syntymisen ja vapautumisen ehkäisemiseen, seuraavaksi teknisiin riskinhallintakeinoihin päästön leviämisen ehkäisemiseksi ja vasta viimeisenä keinona henkilökohtaisiin suojaimiin.

Hankkeessa toteutettujen pitkien mittausten avulla saatiin arvokasta tietoa nanohiukkaspitouksien vaihtelusta eri toimialoilla ja työtehtävissä. Mittausten avulla saatiin kokemusta nanohiukkasten mittaamisesta työntekijöiden hengitysvyöhykkeeltä. Hengitysvyöhykemittaukset ovat tärkeässä roolissa tehtäessä altistumisen arviointia työpaikoilla. Hankkeen tuloksia voidaan käyttää arvioitaessa työntekijöiden altistumista nanohiukkasille ja torjuntateknisten toimien riittävyttä, parannettaessa työyhteisöjen toiminnan turvallisuutta ja kehitettäessä kemiallisten altisteiden hallintamenetelmiä. Hankkeessa laaditut toimenpidesuosituksien nanohiukkasaltistuksen vähentämiseksi työpaikoilla löytyvät Työterveyslaitoksen internet-sivuilta osoitteesta www.ttl.fi/nanoturvallisuus.

Sisällysluettelo

| | |
|--|----|
| TIIVISTELMÄ | I |
| LYHENNELUETTELO | IV |
| 1 JOHDANTO..... | 5 |
| 2 HANKKEEN TAVOITTEET | 7 |
| 3 MENETELMÄT | 8 |
| 3.1 Mittausten toteutus | 8 |
| 3.2 Mittausmenetelmät | 9 |
| 3.2.1 Hankkeessa kehitetty esierotin | 9 |
| 3.2.2 Mittalaitteet ja keräimet | 9 |
| 4 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU | 11 |
| 4.1 Taustapitoisuudet | 11 |
| 4.2 Pitoisuudet hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä..... | 11 |
| 4.2.1 Massapitoisuudet | 11 |
| 4.2.2 Lukumääräpitoisuudet..... | 12 |
| 4.2.3 Pinta-alapitoisuudet | 15 |
| 4.3 Hiukkasten muoto ja koostumus | 17 |
| 4.4 Esierottimen toiminta | 18 |
| 5 ALTISTUMINEN HIUKKASILLE..... | 20 |
| 5.1 Altistumistasot | 20 |
| 5.2 Altistumisen arviointi | 22 |
| 5.3 Suositukset hiukkasille altistumisen vähentämiseksi..... | 25 |
| 5.4 Toimenpidesuositukset | 26 |
| 6 TULOSTEN HYÖDYNNETTÄVYYS..... | 27 |
| 7 YHTEENVETO | 28 |
| KIRJALLISUUS..... | 30 |
| LIITTEET | 33 |

LYHENNELUETTELO

| | |
|-------------------|---|
| Agglomeraatti | Yhteen kasautuneista/ketjuuntuneista hiukkasista (primaarihiukkasista) muodostunut ryväs |
| Alveolijae | Alle 4 μm :n (D_{50}) kokoiset hiukkaset (pääsevät keuhkorakkuloihin asti) |
| C_{LDSA} | Keuhkoihin deponoituvien hiukkasten pinta-alapitoisuus (Lung-deposited Surface Area Concentration) |
| C_m | Hiukkasten massapitoisuus |
| C_n | Hiukkasten lukumääräpitoisuus |
| C_s | Hiukkasten kokonaispinta-alapitoisuus |
| CPC | Kondensatiohiukkaslaskuri (Condensation Particle Counter) |
| D_{50} | Hiukkasen aerodynaaminen halkaisija, jolla keräystehokkuus on 50 % |
| D_p | Keskimääräinen hiukkaskoko (halkaisija) |
| EDS | Energiaerotteinen röntgenspektroskopia (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) |
| FMPS | Sähköinen liikkuvuusokoluokittelija (Fast Mobility Particle Sizer) |
| GMD | Geometrisen keskihalkaisija (Geometric Mean Diameter) |
| GSD | Geometrisen keskihajonta (Geometric Standard Deviation) |
| Hengittävä pöly | Alle 100 μm :n (D_{50}) kokoiset hiukkaset |
| HTP | Haitalliseksi tunnettu pitoisuus |
| ICP-MS | Induktiivisesti kytketty plasma-massa spektrometri (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer) |
| Mini-LAS | Laser aerosoli spektrometri (Mini Laser Aerosol Spectrometer) |
| Nanohiukkaset | Alle 0.5 μm :n (D_{50}) kokoiset hiukkaset (tässä tutkimuksessa käytetty leikkausraja) |
| NSAM | Nanohiukkasten pinta-alamonitori (Nanoparticle Surface Area Monitor) |
| PM1 | Alle 1 μm :n (D_{50}) kokoiset hiukkaset |
| PM2.5 | Alle 2.5 μm :n (D_{50}) kokoiset hiukkaset |
| PM4 | Alle 4 μm :n (D_{50}) kokoiset hiukkaset (vrt. alveolijae, pääsevät keuhkorakkuloihin asti) |
| PM5 | Alle 5 μm :n (D_{50}) kokoiset hiukkaset |
| PM10 | Alle 10 μm :n (D_{50}) kokoiset hiukkaset (keuhkojoe, jäävät pääosin keuhkoputkistoon) |
| PM15 | Alle 15 μm :n (D_{50}) kokoiset hiukkaset |
| SEM | Pyyhkäisyelektronimikroskooppi (Scanning Electron Microscope) |
| SMPS | Sähköinen liikkuvuusokoluokittelija (Scanning Mobility Particle Sizer) |
| TEM | Läpäisyelektronimikroskooppi (Transmission Electron Microscope) |
| TEOM | Värähtelevä mikrovaaka (Tapered Element Oscillating Microbalance) |

1 JOHDANTO

Euroopan komission suositus nanomateriaalin määritelmästä (2011/696/EU) ei erottele teollisesti valmistettuja ja luonnollisesti tai muiden prosessien sivutuotteena syntyneitä nanomateriaaleja toisistaan. Määritelmän mukaan ”nanomateriaali tarkoittaa luonnollista materiaalia, sivutuotemateriaalia tai valmistettua materiaalia, joka sisältää hiukkasia joko vapaina, agglomeroituneina tai aggregoituneina ja jonka hiukkasista vähintään 50 prosenttia lukumääräperusteisen kokojakauman mukaisesti on kooltaan 1–100 nm tai jonka ulkomitoista yksi tai useampi on 1–100 nm”. Agglomeraatissa yksittäiset hiukkaset ovat liittyneet yhteen heikoilla sidoksilla ryppäiksi tai ketjuiksi, aggregaatissa yksittäisten hiukkasten väliset sidokset ovat vahvempia. Agglomeraattien/aggregaattien koko on yleensä suurempi kuin 100 nm, joten nanorakenteisia hiukkasia esiintyy tyypillisesti vielä 500 nanometrin kokoluokassa.

Nanokokoluokan hiukkasia muodostuu esimerkiksi prosesseissa, joissa aineet palavat ja siirtyvät kaasufaasiin. Tällaisia ovat mm. hitsaus, muovien lämpökäsittely ja erilaiset polttoprosessit (Schneider ym., 2007; Rantanen ja Pääkkönen, 2008; Hämeri ym., 2009). Toisaalta nanokokoluokan hiukkasille voivat altistua myös mm. leipurit ja rakennusalan ja puutuoteteollisuuden työntekijät (Zimmer ja Maynard, 2002; Tissari ym., 2005; Welling ym., 2008; Asikainen ym., 2009).

Nanohiukkasten aiheuttamia terveysvaaroja ei tunneta kunnolla. Todettuja terveyshaittoja ovat mm. keuhkotulehdus, vaikutukset verenkiertoon ja aivoihin, perimämyrkyllisyys ja syöpäriskin mahdollinen lisääntyminen (Savolainen ja Vainio, 2011). Pieni koko voi mahdollistaa nanohiukkasten kulkeutumisen esimerkiksi hengityselimistöä verenkiertoon tai aivoihin ja suuri pinta-ala lisää niiden reaktiivisuutta elimistössä. On osoitettu, että mm. hitsauksessa syntyvät nanokokoiset mangaanioksidishiukkaset voivat kulkeutua aivoihin nenän hajuhermosäikeiden kautta (Oberdörster ym., 2004). Koon lisäksi hiukkasten muoto, pinta-ala, agglomeroitumisaste, kidemuoto, sähkövaraus ja kemiallinen koostumus vaikuttavat niiden kulkeutumiseen elimistössä ja biologisiin vasteisiin (Oberdörster ym., 2005; Nel ym., 2009). Arvioitaessa nanomateriaalien aiheuttamia riskejä ihmisille näitä ominaisuuksia tulisi arvioida altistuspitoisuuksien lisäksi.

Nanohiukkasille tapahtuvan altistumisen arvioinnissa ongelmana on se, että käytettävissä ei ole varmaa tietoa siitä, mikä hiukkasten suure kuvaa parhaiten niiden haitallisuutta (NIOSH, 2009). Yksimielisiä ollaan siitä, että massaan perustuva pitoisuusmääritys ja bulkkimateriaaleille asetetut raja-arvot eivät sovi kovin hyvin nanohiukkasille, ja massan lisäksi tulisi mitata myös hiukkasten lukumäärää tai pinta-alaa (Maynard ja Aitken, 2007; Hämeri ym., 2009; Park ym., 2010a; Park ym., 2010b). Tällä hetkellä suositellaan hiukkaspitoisuuksien mittausta mahdollisimman monipuolisilla menetelmillä (NIOSH, 2009).

Altistumisen arvioinnin tulisi perustua mahdollisimman tarkkaan tietoon hiukkasten pitoisuudesta ja kokojakaumasta (Lehtimäki ja Säämänen, 2013). Pitoisuustieto on tärkeä, koska haittavaikutusten pitää olla sidoksissa johonkin hiukkasten määrälliseen ominaisuuteen. Kokojakauma puolestaan on tärkeä arvioitaessa, miten suuri osa hengitysilmassa olevista hiukkasista kiinnittyy määrättyihin kohtiin hengityselimissä. Alle 300 nm:n kokoisten nanohiukkasten pääasiallinen depositiomekanismi hengityselimistössä on diffuusio (Löndahl ym., 2014). Hiukka-

set, joiden halkaisija on alle 10 nm deponoituvat jo ylähengitysteihin ja henkitorven ja keuhkoputkien alueelle suuren diffuusionopeutensa vuoksi. 20–300 nm:n kokoiset hiukkaset kiinnittyvät alveolialueelle. Hiukkasen kulkeutumiseen ja vaikutuksiin elimistössä vaikuttavat koon lisäksi kuitenkin myös sen muut ominaisuudet ja lisäksi hengitystapa ja -taajuus, virtausdynamiikka hengitysteissä ja keuhkojen morfologia, joihin kaikkiin puolestaan vaikuttaa henkilön ikä, sukupuoli ja fyysinen kunto.

Nanohiukkasille ei ole asetettu lukumäärään perustuvia raja-arvoja. Työterveyslaitos on antanut ainoastaan teollisesti tuotetuille nanohiukkasille varovaisuusperiaatteeseen, altistumisen minimoimiseen ja hiukkastoksikologiaan perustuvat lukumääräpitoisuuden tavoitetasot (Työterveyslaitos, 2013). Esimerkiksi hitaasti hajoaville nanomateriaaleille, joiden tiheys on alle 6000 kg/m^3 tavoitetaso on $40\,000 \text{ hiukkasta/cm}^3$ (8 h), kun taustapitoisuus on vähennetty.

Vaikka monissa prosesseissa tiedetään vapautuvan nanohiukkasia, työntekijöiden altistumista niille on tutkittu harvakseltaan ja mittaukset on yleensä tehty kiinteistä pisteistä (mm. Elihn ja Berg, 2009; Buonanno ym., 2010; Buonanno ym., 2011; Curvin ja Bertke, 2011; van Broekhuizen ym., 2012; Ham ym., 2012). Koska nanohiukkasten lukumääräpitoisuus ja kokojakauma muuttuvat nopeasti siirryttäessä kauemmaksi päästölähteestä, ei kiinteästä pisteestä tehtyjen mittausten avulla voida arvioida työntekijän altistumistasoja täysin luotettavasti (Brouwer ym., 2004; Seipenbusch ym., 2008; Park ym., 2010b). Lisäksi nanohiukkasten mittaamista työpaikoilla vaikeuttavat usein muut monista sisä- ja ulkolähteistä peräisin olevat hiukkaset, jolloin mitattavasta työvaiheesta vapautuvien nanohiukkasten erottaminen taustapitoisuuksista voi olla hankalaa (Lehtimäki ja Säämänen, 2013). Siksi mittauksissa tulisi painottaa myös henkilökohtaista näytteenottoa kiinteän pisteen mittausten lisäksi, jos tarkoituksena on arvioida työntekijän altistumista.

Nanohiukkasten mittaukseen ei ole vielä olemassa yhteisesti sovittua strategiaa, vaikka harmonisointityö yhtenäisen mittaustekniikan luomiseksi on käynnissä (Brouwer ym., 2012). Nanohiukkasten mittaustekniikkaa kehitetään jatkuvasti. Monet uusista kaupallisista mittalaitteista perustuvat hiukkasten varaamiseen diffuusiovaraajalla ja määrittävät hiukkasten pitoisuuksia (esim. lukumäärä, pinta-ala) laskennallisesti hiukkasten kantaman varauksen perusteella. Tämä on mahdollista kuitenkin vain rajoitetulla hiukkaskokoalueella ja jos läsnä on pienempiä tai suurempia hiukkasia, mittalaitteen antama tulos voi olla virheellinen (Asbach ym., 2009; Brouwer ym., 2009; Asbach ym., 2011). Useimmissa kaupallisissa nanohiukkasten mittaamiseen käytetyissä laitteissa esierotinta ei ole lainkaan tai esierottimena on sykloni, joka leikkaa pois tyypillisesti yli 1 mikrometrin kokoiset hiukkaset. Lisäksi diffuusiovaraajien tulokista laskettu massapitoisuus on aina teoreettinen.

Tämä hanke tuotti lisätietoa työntekijöiden altistumistasoista nanohiukkasille eri toimialoilla (konepaja-, elintarvike- ja kalusteteollisuus sekä palveluala) keskittymällä erityisesti hengitysvyöhykemittauksiin. Hankkeen mittausten avulla saatiin kattava läpileikkaus eri toimialoilta.

Lisäksi hankkeessa kehitettiin nanohiukkasten mittaustekniikkaa kehittämällä esierotin, jonka avulla voidaan jatkossa määrittää gravimetrisesti nanohiukkasten massapitoisuus työntekijän hengitysvyöhykkeellä.

2 HANKKEEN TAVOITTEET

Hankkeen tavoitteena oli kehittää nanohiukkasten mittaustekniikkaa henkilökohtaisen altistumisen arvioimiseksi ja selvittää pitoisuustasoja (lukumäärä, pinta-ala, massa) nanohiukkasille erilaisilla työpaikoilla sekä työntekijän hengitysvyöhykkeellä että työpisteillä ja ympäröivissä tiloissa sekä tutkia työpaikoilla esiintyvien nanohiukkasten ominaisuuksia (muoto, koostumus) elektronimikroskopiaa käyttäen.

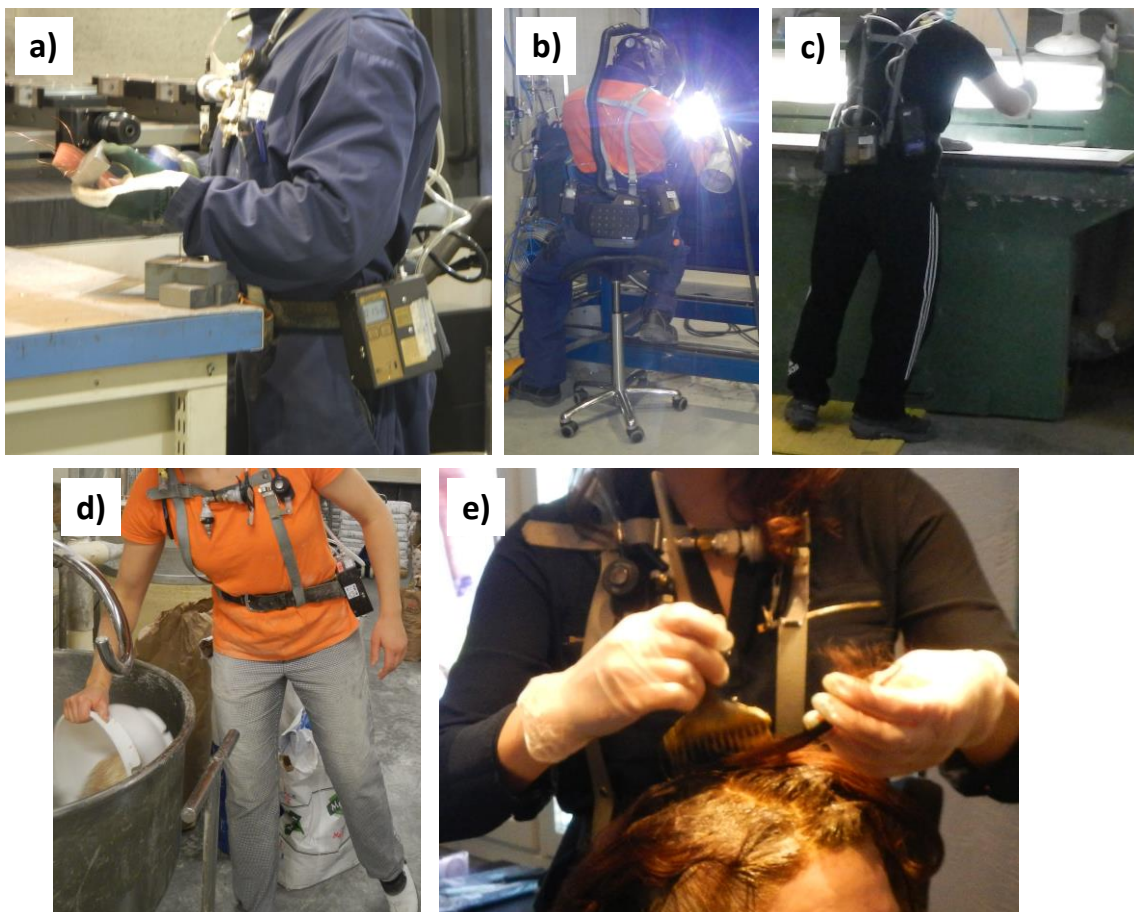
Pitoisuustasojen ja nanohiukkasten koostumuksen perusteella oli tavoitteena arvioida niiden vaikutusta työntekijöiden altistumiseen, ja vertailla tuloksia kirjallisuustutkimuksista saatuihin arvoihin. Lisäksi tavoitteena oli arvioida työntekijöiden suojautumistason riittävyttä ja nanohiukkasaltistuksen hallintaa työpaikoilla, ja laatia toimenpidesuositukset nanohiukkasaltistuksen vähentämiseksi työpaikoilla.

3 MENETELMÄT

3.1 Mittausten toteutus

Mittauksia tehtiin useilla toimialoilla, jotta saatiin tietoa työntekijöiden altistumistasoista erityyppisille nanohiukkasille, ja testattua nanohiukkasten mittaustekniikkaa erilaisissa työympäristöissä. Hankkeeseen osallistui kaksi konepajaa, yksi keittiökalusteita ja MDF-ovia valmistava yritys (jatkossa ”kalustetehdas”), yksi leipomo, ja yksi kampaamo. Mittauksia tehtiin kaikissa yrityksissä yhden työntekijän hengitysvyöhykkeeltä ja kiinteästä pisteestä mahdollisimman lähellä ko. työntekijän työpistettä (työpiste) pääasiassa koko työvuoron ajan. Lisäksi molemmissa konepajoissa sekä kalustetehtaassa tehtiin mittauksia myös toisesta kiinteästä pisteestä, joka sijaitsi kauempana mitattavasta prosessista (taustapiste).

CNC-koneistajan työhön kuului työstökeskuksen käyttämistä ja teräksen hiontaa (Kuva 1a). **Hitsaaja** (Kuva 1b) TIG-hitsasi terästä. Työhön kuului hitsauksen lisäksi myös muita työvaiheita, kuten kulmahiomakoneen käyttöä ja hiomista teräsharjalla. Kalustetehtaalla **tiiminvetäjän** työtehtäviin kuului mm. koneella jyröntää ja hiontaa (Kuva 1c). Leipomossa **taikinantekijän** työhön kuului mm. jauhojen ja mausteiden käsittelyä, taikinakoneiden käyttöä ja käsin leivontaa (Kuva 1d). **Kampaajan työ** sisälsi hiusten pesua, leikkausta käsin ja koneella, värjäystä, ja hiusten muotoilua (Kuva 1e).



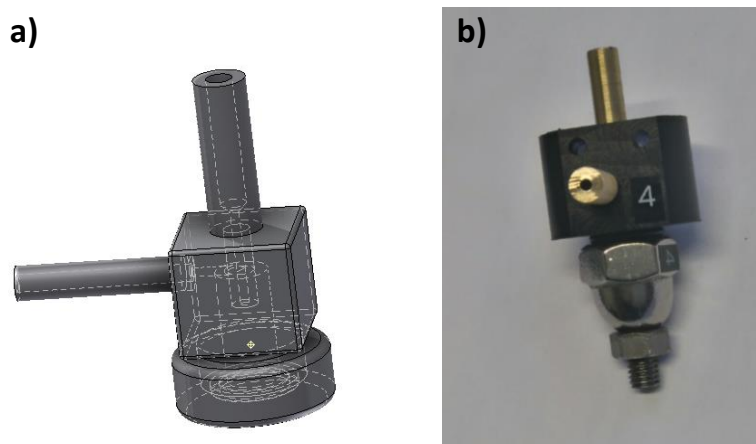
Kuva 1. Hankkeeseen osallistuneet työntekijät työssään: **a)** CNC-koneistaja, **b)** hitsaaja, **c)** kalustetehtaan tiiminvetäjä, **d)** taikinantekijä, ja **e)** kampaaja.

3.2 Mittausmenetelmät

3.2.1 Hankkeessa kehitetty esierotin

Hankkeessa haluttiin määrittää nanohiukkasten massapitoisuus työntekijän hengitysvyöhykkeeltä gravimetrisesti. Lisäksi haluttiin selvittää, vaikuttavatko työpaikan ilmassa esiintyvät suuremmat hiukkaset nanohiukkasten mittaamiseen käytettyjen kaupallisten laitteiden antamiin mittaustuloksiin.

Hankkeessa suunniteltiin ja mallinnettiin esierotin. Toimiakseen työpaikkamittauksissa esierotin sai aiheuttaa vain pienen painehäviön, sen tuli olla dimensioiltaan pieni ja kevyt, eikä se saanut tukkeutua helposti. Esierottimen suunnittelussa hyödynnettiin kirjallisuudesta löytyviä empiirisiä malleja, ja mallinnettiin virtauksia ja hiukkasten ratoja numeerisella virtausdynamiikalla (CFD) (FLUENT, Ansys 15.0). Kirjallisuudessa nanokokoluokan hiukkasten erotteluun on käytetty mm. minisykloneita (Hsiao ym., 2009), ja myös tässä hankkeessa suunniteltu esierotin on ns. GK sykloni (Kenny ja Gusmann, 2000) (Kuva 2), jonka virtaukseksi valittiin $2.0 \text{ dm}^3/\text{min}$. Esierottimen laboratorioissa testattu erotustehokkuus aerodynaamiselta halkaisijaltaan 0.5 mikrometrin ammoniumsulfaatti-hiukkasille oli noin 60 %.



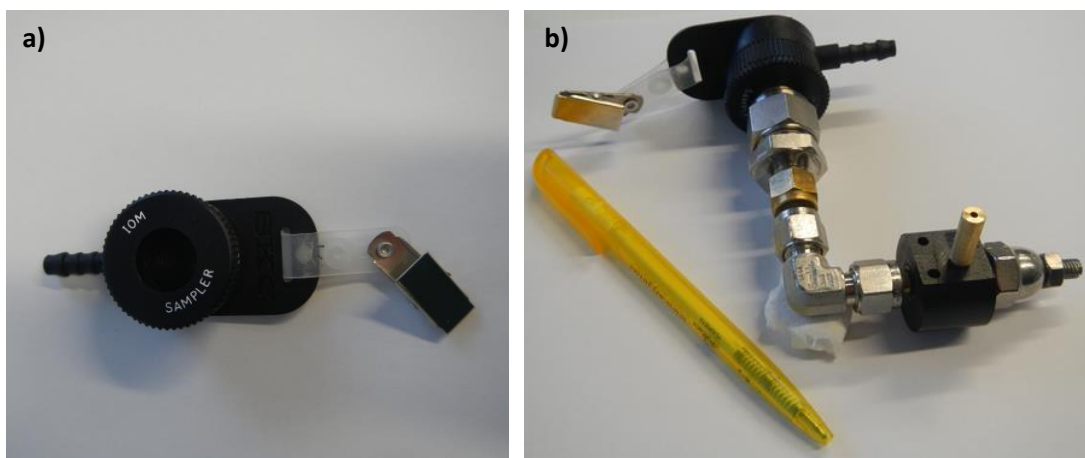
Kuva 2. a) CAD-kuva esierottimen prototyypistä, **b)** valokuva valmiista esierottimesta.

3.2.2 Mittalaitteet ja keräimet

Hankkeen mittaukset suoritettiin kaupallisilla hiukkasmittalaitteilla ja -keräimillä. Hiukkasten lukumääräpitoisuus (C_n , yksikkö $1/\text{cm}^3$) mitattiin työ- ja taustapisteissä reaaliaikaisesti kondensatiohiukkaslaskureilla (Condensation Particle Counter, CPC) ja/tai DiSCmini-nanohiukkasmonitorilla. Työntekijän hengitysvyöhykkeeltä lukumääräpitoisuus mitattiin toisella DiSCmini:lla. Lukumääräkojakauma ja hiukkasten geometrinen keskihalkaisija (Geometric Mean Diameter, GMD, yksikkö nm) mitattiin työ- ja taustapisteissä sähköisillä liikkuvuuskoelukittelijoilla (Fast Mobility Particle Sizer, FMPS; Scanning Mobility Particle Sizer, SMPS). Liikkuvuuskoelukittelijat mittaavat samalla myös lukumääräpitoisuuden, johon vaikuttaa kuitenkin laitteen kokoalue ja aikaresoluutio. Keskimääräinen hiukkaskoko (hiukkasen halkaisija D_p , yksikkö nm) hengitysvyöhykkeellä mitattiin DiSCmini-nanohiukkasmonitorilla.

Työpisteessä mitattiin hiukkasten kokonaispinta-alapitoisuus (C_s , yksikkö $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$) reaaliaikaisesti Pegasor AQ™ Indoor -mittalaitteella ja keuhkojen alveolialueelle teoreettisesti kertyvien hiukkasten pinta-alapitoisuus (Lung-deposited Surface Area Concentration, C_{LDSA}) nano-hiukkasten pinta-alamonitorilla (Nanoparticle Surface Area Monitor, NSAM). Työntekijän hengitysvyöhykkeeltä pinta-alapitoisuuksia mitattiin PartectorTEM-nanohiukkasmonitorilla ja/tai DiSCmini:llä. DiSCmini antaa laskentaohjelman tuloksena molemmat pinta-alapitoisuudet, PartectorTEM LDSA-pitoisuuden.

Hengittyvän pölyn ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$) massapitoisuus (C_m , yksikkö mg/m^3) työ- ja taustapisteissä sekä hengitysvyöhykkeellä määritettiin IOM-keräinten avulla (Kuva 3a). Nanohiukkasten ($D_{50} \approx 0.5 \mu\text{m}$) massapitoisuus määritettiin hengitysvyöhykkeeltä käyttämällä hankkeessa kehitettyä esierotinta (Kuva 3b). Myös joidenkin muiden mittalaitteiden edessä käytettiin välillä esierottimia työpistemittauksissa. Alveolijakeen, eli keuhkorakkuloihin asti pääsevien hiukkasten ($D_{50} = 4 \mu\text{m}$), massapitoisuus määritettiin työpisteestä IOM-vahtokeräimellä. Reaaliaikainen massapitoisuus mitattiin työpisteessä värähtelevällä mikrova'alla (Tapered Element Oscillating Microbalance, TEOM). Hengitysvyöhykkeellä reaaliaikaista laskennallista massapitoisuutta monitoroitiin DiSCmini:lla. Taustapisteissä reaaliaikaista massapitoisuutta seurattiin DustTrak DRX -laitteella.



Kuva 3. a) IOM-keräin, b) IOM-keräin ja esierotin kiinnitettynä siihen.

Eri hiukkasjakeiden osuus kokonaismassasta (%) määritettiin taustapisteessä DustTrak DRX:llä, joka mittaa samanaikaisesti alle yhden mikrometrin (PM1), alle kahden ja puolen mikrometrin (PM2.5), alle neljän mikrometrin (PM4, alveolijae), alle 10 mikrometrin (PM10, keuhkojaje) ja alle 15 mikrometrin (PM15) jakeiden massapitoisuutta. Työpisteessä eri hiukkasjakeiden (PM1, PM2.5, ja PM10) osuudet määritettiin laser aerosoli spektrometrillä (Mini Laser Aerosol Spectrometer, Mini-LAS) tai Grimm Dust Monitor 1.108 -laitteella. Elektronimikroskooppinäytteitä kerättiin sekä työntekijän hengitysvyöhykkeeltä, työpisteestä että taustapisteestä.

Mittauskohteissa käytetyt mittalaitteet, niiden toimintaperiaatteet ja mittausalueet sekä hiukkasten analyysimenetelmät on esitetty liitteessä 2.

4 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

4.1 Taustapitoisuudet

Hankkeen tulokset on koostettu viiden eri työpaikkamittauksen tulosten perusteella. Pääkohdat tuloksista on esitetty tässä kappaleessa. Mittaustulokset kunkin mittauskohteen osalta on esitetty yksityiskohtaisesti liitteessä 1.

Tutkittavilla työpaikoilla mitattiin varsinaisen työajan ulkopuolella keskiarvopitoisuus, ns. taustapitoisuus, hiukkasten lukumääräpitoisuudelle, pinta-alapitoisuudelle ja massapitoisuudelle. Pitoisuudet mitattiin työpisteestä. Tämän lisäksi koepajoilla ja kalustetehtaalla tehtiin mittauksia myös taustapisteessä. Taustapitoisuudet on esitetty vertailun helpottamiseksi tulos-taulukkojen yhteydessä ja lisäksi yksityiskohtaisesti liitteessä 1.

4.2 Pitoisuudet hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä

Jokaisessa mittauskohteessa mitattiin hiukkasten massapitoisuutta (kpl 4.2.1), lukumääräpitoisuutta (kpl 4.2.2) ja pinta-alapitoisuutta (kpl 4.2.3). Lisäksi hiukkasten kemiallinen koostumus ja muoto analysoitiin (kpl 4.3).

4.2.1 Massapitoisuudet

IOM-keräimillä määritetyt hengittyvän pölyn ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$), alveolijakeen ($D_{50} = 4 \mu\text{m}$) ja nanohiukkasten ($D_{50} \approx 0.5 \mu\text{m}$, mitattu IOM+esierotin yhdistelmällä) massapitoisuudet työntekijän hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä eri työpaikoilla sekä vastaava haitalliseksi tunnettu pitoisuus (HTP-arvo) on koottu taulukkoon 1.

Hengittyvän pölyn massapitoisuudet sekä työntekijän hengitysvyöhykkeellä että työpisteessä olivat selkeästi suurimpia leipomossa. Pienimmät massapitoisuudet mitattiin kampaamossa. Konepajoissa ja kalustetehtaalla massapitoisuudet olivat hieman suurempia kuin kampaamossa. Nanohiukkasten massapitoisuus hengitysvyöhykkeellä oli suurin leipomossa ja kalustetehtaalla, ja vastaavasti pienin kampaamossa. Nanohiukkasten osuus hengittyvästä pölystä työntekijän hengitysvyöhykkeellä oli konepajoissa 20–40 %, kalustetehtaassa 64 %, leipomossa 9–15 % ja kampaamossa 16 %.

Työpisteeltä mitattiin sekä hengittyvän pölyn pitoisuutta että alveolijakeen pitoisuutta. Alveolijakeen osuus hengittyvästä pölystä vaihteli konepajoissa karkeasti 40–70 % välillä. Kalustetehtaassa alveolijakeen osuus oli samaa suuruusluokkaa (53 %). Leipomossa alveolijakeen osuus hengittyvästä pölystä oli alle 20 %, joten hiukkasjakauma painottui selvästi isompiin hiukkasiin kuin muissa kohteissa. Kampaamossa alveolijakeen arvo jäi alle menetelmän määrittämissä rajan. Työpisteeltä mitatut hengittyvän pölyn massapitoisuudet olivat selkeästi pienempiä kuin hengitysvyöhykkeeltä mitatut pitoisuudet. Hengitysvyöhykepitoisuudet olivat karkeasti 1.5–10 kertaisia verrattuna työpisteen pitoisuuksiin.

Konepajojen mittaustuloksia verrattiin epäorgaanisen pölyn HTP-arvoon (10 mg/m^3). Konepajoissa pöly sisälsi kuitenkin mm. metalleja, joille on annettu tiukempia HTP-arvoja, ja joiden merkitystä ei tässä yhteydessä käsitellä. Hengitysvyöhykkeeltä määritetyt massapitoisuudet jäivät konepajoissa alle HTP-arvon (Taulukko 1). Kalustetehtaan kohdalla sovellettiin puupölylle annettua HTP-arvoa (2 mg/m^3). Hengitysvyöhykkeeltä määritetty massapitoisuus oli 60 %

HTP-arvosta. Leipomossa hengittyvän pölyn pitoisuutta verrattiin jauhopölylle annettuun HTP-arvoon (2 mg/m³). Hengitysvyöhykkeeltä mitatut pitoisuudet olivat selvästi yli jauhopölyn HTP-arvon.

Taulukko 1. Hengittyvän pölyn ja nanohiukkasten massapitoisuudet (C_m) työntekijän hengitysvyöhykkeellä, ja hengittyvän pölyn (kaksi näytettä) sekä alveolijakeen massapitoisuudet työpisteessä. Leipomossa työpisteestä määritettiin myös nanohiukkasten massapitoisuus.

| Kohde (työntekijä) | C _m (mg/m ³) | | | | | |
|--|-------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|
| | Hengitysvyöhyke | | Työpiste | | | HTP-arvo |
| | Hengittyvä pöly | Nanohiuk- kasjæ | Hengittyvä pöly | Alveolijæ | Nanohiuk- kasjæ | Hengittyvä pöly |
| Konepaja 1 (CNC-koneistaja) | 0.71–0.93 | 0.16–0.30 | 0.24–0.49 | 0.16–0.20 | - | 10* |
| Konepaja 2 (hitsaaja) | 0.47–2.48 | 0.15–0.47 | 0.17–0.33 | <LOQ ^a - 0.13 | - | 10* |
| Kalustetehtas (tiiminvetäjä) | 1.19 | 0.76 | 0.11–0.34 | <LOQ ^b - 0.18 | - | 2 |
| Leipomo (taikinantekijä) | 6.81–14.49 | 0.62–1.07 | 1.7–2.57 | 0.29–0.36 | 0.10–0.20 | 2 |
| Kampaamo (kampaaja) | 0.35–0.58 | <LOQ–0.09 | 0.15–0.25 | <LOQ ^c | <LOD ^d | 5 |

^a määrittäysraja 0.12 mg/m³

^b määrittäysraja 0.10 mg/m³

^c määrittäysraja 0.14 mg/m³

^d LOD = havaitsemisraja: 0.073 mg

* HTP-arvo ei ota huomioon pölyn sisältämiä metalleja, joille on annettu omat HTP-arvot.

4.2.2 Lukumääräpitoisuudet

Työpisteessä mitattiin hiukkasten lukumääräpitoisuus ja lukumääräkokojakauma. Hengitysvyöhykkeeltä mitattiin lukumääräpitoisuus ja keskimääräinen hiukkaskoko (D_p). Kaikilla työpaikoilla ilmaan vapautui nanohiukkasia tutkituista työvaiheista. Hengitysvyöhykkeeltä mitatut lukumääräpitoisuudet olivat suurimpia konepajoissa. Erityisesti hitsaus ja hionta olivat työvaiheita, jotka nostivat lukumääräpitoisuutta hengitysvyöhykkeellä. Verrattain suuria pitoisuuksia mitattiin myös leipomossa kaikkien paistamistoimintojen ollessa käynnissä yhtä aikaa. Kalustetehtaassa ja kampaamossa lukumääräpitoisuus oli pienempi kuin konepajoissa ja leipomossa.

Konepajat:

Konepajassa 1 hengitysvyöhykkeeltä mitatut työpäivän keskiarvopitoisuudet olivat noin 40 000–60 000 1/cm³. Huomattavasti korkeampia lukumääräpitoisuuksia mitattiin toisessa konepajassa, jossa työpäivän keskiarvopitoisuudet olivat noin 190 000–370 000 1/cm³.

Konepajoilta tunnistetut työvaiheet, jotka nostivat hiukkasten lukumääräpitoisuutta, olivat käsin hionta koneella, työstökoneella työskentely, teräsharjalla hionta, hitsaus, metallin lämmitys kaasupolttimella ja kulmahiontakoneella hionta. Näiden työvaiheiden aikana mitatut pitoisuudet hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä sekä taustapitoisuudet työpisteellä ennen toiminnan alkamista on esitetty taulukossa 2.

Työpisteellä mitattiin käsin hionnan aikana jopa 3 500 000 1/cm³ pitoisuuksia. Käsin hionnan aikana työpisteeltä mitatut pitoisuudet olivat välillä korkeampia kuin hengitysvyöhykkeeltä mitatut pitoisuudet. Korkeimmat mitatut hetkelliset lukumääräpitoisuudet käsin hionnan aikana hengitysvyöhykkeellä olivat noin 1 000 000 1/cm³. Käsin hionnan aikana syntyi runsaasti nanokokoisia hiukkasia, joista osa oli alle 10 nm. Nämä hiukkaset eivät tule mitatuksi hengitysvyöhykkeeltä johtuen mittalaitteen mittausalueen alarajasta (10 nm). Tässä tapauksessa hengitysvyöhykepitoisuus on todennäköisesti suurempi kuin mittalaitteen antama tulos, mikä tulee huomioida altistumista arvioitaessa.

Työstökoneella työskentelyn aikana hengitysvyöhykkeeltä mitatut pitoisuudet olivat samaa suuruusluokkaa kuin käsin hionnan aikana (Taulukko 2). Työstökoneella työskentelyn aikana hengitysvyöhykepitoisuudet olivat samaa suuruusluokkaa tai suurempia kuin työpisteen pitoisuudet. Työpisteestä mitatun hiukkaskokojakauman perusteella työstökoneella työskentelyn aikana vapautuneet nanohiukkaset olivat selvästi suurempia (noin 100 nm) kuin käsin hionnan aikana.

Hitsauksen aikana hengitysvyöhykkeeltä mitatut keskimääräiset lukumääräpitoisuudet olivat välillä 83 000–2 002 000 1/cm³. Korkeimmat hetkelliset pitoisuudet olivat noin 18 000 000 1/cm³. Työpisteeltä mitatut pitoisuudet olivat selvästi alhaisempia. Hengitysvyöhykkeellä lukumääräpitoisuuden keskiarvo hitsauksen aikana oli suurimmillaan yli 20 kertainen työpisteestä mitattuun keskiarvoon verrattuna.

Kulmahiomakoneella hiomisen aikana keskimääräiset lukumääräpitoisuudet olivat yleensä vielä korkeampia kuin hitsauksen aikana. Hitsaus, kulmahiomakoneella hionta, teräsharjalla hionta, ja kaasupolttimen käyttö muodostivat runsaasti pieniä, alle 50 nm:n hiukkasia. Erityisesti kulmahiontakoneen käyttö tuotti paljon aivan pienimpiä hiukkasia, mikä voi osaltaan selittää sitä, että hengitysvyöhykkeeltä DiSCmini-mittalaitteella mitattu pitoisuus oli pienempi kuin työpisteestä mitattu pitoisuus. DiSCmini:n mittausalueen alaraja on 10 nm, joten se ei havaitse tätä pienempiä hiukkasia.

Taulukko 2. Hiukkasten lukumääräpitoisuuden (C_n) keskiarvot konepajoilla suoritettavien työvaiheiden aikana mitattuna hengitysvyöhykkeeltä ja työpisteeltä sekä tausta mitattuna työpisteeltä ennen toiminnan alkamista.

| Työvaihe | Hiukkasten lukumääräpitoisuus (1/cm ³), työvaiheiden keskiarvojen vaihtelu | | |
|------------------------------------|--|-------------------|----------------|
| | Hengitysvyöhyke | Työpiste | Tausta |
| | <i>DiSCmini</i> | <i>CPC 3775</i> | <i>CPC3775</i> |
| Käsin hionta koneella | 44 000–126 000 | 77 000–164 000 | 13 000–22 000 |
| Työstökoneella työskentely | 42 000–126 000 | 60 000–72 000 | |
| Teräsharjalla hionta | 2 629 000 | 143 000 | 3 500–19 000 |
| Hitsaus | 83 000–2 002 000 | 83 000–260 000 | |
| Metallin lämmitys kaasupolttimella | 724 000 | 110 000 | |
| Kulmahiomakoneella hionta | 201 000–2 421 000 | 487 000–2 423 000 | |

Kalustetehtähdas:

Kalustetehtähdasissa lukumääräpitoisuuden keskiarvo hengitysvyöhykkeellä vaihteli runsaasti eri mittauspäivien välillä ollen 2 000–11 000 1/cm³. Nanohiukkasten pitoisuutta nostavana työvaiheena tunnistettiin työskentely hiontakoneella. Myös kaasutruckien havaittiin aiheuttavan pitoisuuden nousua kalustetehtähdäällä.

Hiontakoneella työskentelyn aikana mitatut pitoisuudet hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä sekä taustapitoisuus työpisteellä ennen toiminnan alkamista on esitetty taulukossa 3. Yleisesti ottaen lukumääräpitoisuudet olivat verrattain pieniä. Hiontakoneella työskentelyn aikana muodostui runsaasti pieniä, alle 50 nm:n hiukkasia. Enimmillään keskimääräinen lukumääräpitoisuus hiontakoneella työskentelyn aikana oli hengitysvyöhykkeellä noin kuusi kertaa suurempi kuin työpisteessä.

Taulukko 3. Hiukkasten lukumääräpitoisuuden (C_n) keskiarvot kalustetehtaalla suoritettavien työvaiheiden aikana mitattuna hengitysvyöhykkeeltä ja työpisteeltä sekä tausta mitattuna työpisteeltä ennen toiminnan alkamista.

| Työvaihe | Hiukkasten lukumääräpitoisuus ($1/cm^3$) | | |
|-----------------|--|-----------------|----------------|
| | Hengitysvyöhyke | Työpiste | Tausta |
| | <i>DiSCmini</i> | <i>CPC 3775</i> | <i>CPC3775</i> |
| Hionta koneella | 1 700–27 000 | 4 100–11 000 | 600–1 500 |

Leipomo:

Leipomossa hengitysvyöhykkeeltä mitatut työvuoron keskiarvopitoisuudet olivat noin 80 000–110 000 $1/cm^3$. Nanohiukkasten lukumääräpitoisuus kasvoi työvuoron edetessä sekä hengitysvyöhykkeellä että kiinteässä pisteessä. Nanohiukkasten keskimääräinen lukumääräpitoisuus oli hengitysvyöhykkeellä suurempi tai samaa suuruusluokkaa kuin työpisteessä.

Paistamistoiminnot, erityisesti leivän paistaminen arinauuneissa, nostivat nanohiukkasten lukumääräpitoisuutta koko leipomotilassa. Korkeimmat hetkelliset lukumääräpitoisuudet työpisteessä, noin 900 000 $1/cm^3$, mitattiin kun kaikki paistamistoiminnot (pinnavaunu- ja arinauuneissa paistaminen, munkinpaisto) olivat käynnissä yhtä aikaa.

Nanohiukkasten lukumääräpitoisuutta nostavana työvaiheena tunnistettiin myös uunien käynnistys, taikinan teko ja käsin leivonta. Eri työvaiheiden aikana mitatut lukumääräpitoisuudet hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä sekä taustapitoisuus ennen toiminnan alkamista on esitetty taulukossa 4.

Työvaiheiden aikana vapautui hiukkasia, jotka olivat kooltaan noin 30–100 nm. Pienimpiä, alle 10 nm hiukkasia vapautui uunien käynnistysvaiheessa, mutta ne kasvoivat nopeasti suuremmiksi.

Taulukko 4. Hiukkasten lukumääräpitoisuuden keskiarvot leipomossa suoritettavien työvaiheiden aikana mitattuna hengitysvyöhykkeeltä ja työpisteeltä sekä tausta mitattuna työpisteeltä ennen toiminnan alkamista.

| Työvaihe | Hiukkasten lukumääräpitoisuus ($1/cm^3$) | | | |
|-------------------|--|-----------------|--------------------------|--------------------------|
| | Hengitysvyöhyke | Työpiste | | Tausta |
| | <i>DiSCmini</i> | <i>DiSCmini</i> | <i>CPC 3775/CPC 3776</i> | <i>CPC 3775/CPC 3776</i> |
| Uunien käynnistys | 800–7 800 | 600–1 200 | 1 200–1 300 | 400–600 |
| Taikinanteko | 18 000–55 000 | 11 000–76 000 | 11 000–68 000 | |
| Käsin leivonta | 76 000–262 000 | 77 000–279 000 | 258 000 | |

Kampaamo:

Kampaamossa hengitysvyöhykkeeltä mitatut työpäivän keskiarvopitoisuudet olivat noin 14 000–15 000 $1/cm^3$. Nanohiukkasten pitoisuutta nostaviksi työvaiheiksi tunnistettiin hiusten muotoilu ja värjäys. Eri työvaiheiden pitoisuuskeskiarvot mitattuna hengitysvyöhykkeeltä ja

työpisteeltä sekä taustapitoisuus työpisteessä ennen toiminnan alkamista on esitetty taulukossa 5.

Lukumääräpitoisuudet hengitysvyöhykkeellä olivat pääsääntöisesti samaa suuruusluokkaa työpisteestä mitattujen pitoisuuksien kanssa. Ainoastaan hiuslakan suihkutuksen aikana hengitysvyöhykkeeltä mitattu pitoisuus oli noin neljä kertaa suurempi hengitysvyöhykkeellä kuin työpisteellä.

Väri- ja vaalennusaineista vapautui ilmaan yhdisteitä, joista muodostui paljon pieniä, alle 50 nm kokoisia hiukkasia. Hiuslakan suihkutuksessa vapautuneet hiukkaset olivat hieman suurempia kuin värjäyksen aikana vapautuneet (noin 60 nm).

Taulukko 5. Hiukkasten lukumääräpitoisuuden keskiarvot kampaamossa suoritettavien työvaiheiden aikana mitattuna hengitysvyöhykkeeltä ja työpisteeltä sekä tausta mitattuna työpisteeltä ennen toiminnan alkamista.

| Työvaihe | Hiukkasten lukumääräpitoisuus (1/cm ³) | | |
|------------------|--|-----------------|-----------------|
| | Hengitysvyöhyke | Työpiste | Tausta |
| | <i>DiSCmini</i> | <i>DiSCmini</i> | <i>DiSCmini</i> |
| Hiusten muotoilu | 37 000 | 24 000 | 3 300 |
| Värjäys | 28 000–68 000 | 50 000–141 000 | |

4.2.3 Pinta-alapitoisuudet

Työpisteessä mitattiin keuhkojen alveolialueelle teoreettisesti kertyvien hiukkasten pinta-alapitoisuutta (C_{LDSA}) ja kokonaispinta-alapitoisuutta (C_s). Hengitysvyöhykkeeltä mitattiin C_s - ja C_{LDSA} -pitoisuuksia. Työskentelyjaksojen aikana mitatut keskimääräiset pinta-alapitoisuudet työntekijän hengitysvyöhykkeellä olivat suurimpia konepajoissa, sekä leipomossa kaikkien paistamistoimintojen ollessa käynnissä yhtä aikaa.

Konepajat:

Konepajassa 1 hengitysvyöhykkeeltä mitatut työpäivän keskiarvot C_{LDSA} :lle olivat noin 120–260 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Korkeampia pitoisuuksia mitattiin jälleen toisessa konepajassa, jossa työpäivän keskiarvopitoisuudet olivat 290–450 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$.

Pinta-alapitoisuuksien aikasarjoissa käsin hionta koneella ei erottunut yhtä selvästi kuin lukumääräpitoisuuden aikasarjoissa sen enempää työpisteessä kuin hengitysvyöhykkeelläkään. Teräsharjalla hionta, hitsaus, metallin lämmitys kaasupolttimella ja kulmahiontakoneella hionta erottuivat hieman paremmin pinta-alapitoisuuksien aikasarjoista kuin käsin hionta ja työstökoneella työskentely.

Eri työvaiheiden aikana mitatut pinta-alapitoisuudet hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä sekä vastaavat taustapitoisuudet on esitetty taulukossa 6. Toisin kuin lukumääräpitoisuudet, pinta-alapitoisuudet olivat yleensä suurempia työstökoneella työskentelyn aikana kuin käsin hionnan aikana. Hengitysvyöhykkeellä pinta-alapitoisuudet olivat enimmillään noin 7–8 kertaa suurempia kuin työpisteessä.

Taulukko 6. Hiukkasten pinta-alapitoisuuksien keskiarvot konepajoissa suoritettavien työvaiheiden aikana mitattuna hengitysvyöhykkeeltä ja työpisteeltä sekä tausta mitattuna työpisteeltä ennen toiminnan alkamista.

| <i>Työvaihe</i> <i>suure</i> | Hiukkasten pinta-alapitoisuus ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$) | | | | | |
|-------------------------------------|---|-------------|---------------|------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | Hengitysvyöhyke | | | Työpiste | | Tausta |
| | DiSCmini | | Partector-TEM | NSAM | Pegasor AQ TM Indoor | Pegasor AQ TM Indoor |
| | C_{LDSA} | C_s | C_{LDSA} | C_{LDSA} | C_s | C_s |
| Käsin hionta | 75–384 | 294–3 484 | 187–584 | 248–601 | 1 730–1 832 | 82 |
| Työstökoneella työskentely | 158–565 | 1 395–6 451 | 198–583 | 334–488 | 2 516 | |
| Teräsharjalla hionta | 2 420 | 6 950 | - | 310 | - | 380 |
| Hitsaus | 160–2 080 | 770–7 960 | - | 300–490 | 1 100–1 530 | |
| Metallin lämmitys kaasupolttimella | 500 | 1 650 | - | 370 | 1 340 | |
| Kulmahiomakoneella hionta | 23–3 300 | 810–12 530 | - | 630–1 920 | 2 030 | |

Kalustetehtähdas:

Kalustetehtähdässa hengitysvyöhykkeeltä mitatut työpäivän keskiarvot C_{LDSA} :lle olivat noin 7–19 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Työskentelyjaksot hiontakoneella eivät erottuneet pinta-alapitoisuuden aikasarjoista yhtä selvästi kuin lukumääräpitoisuuden aikasarjoista. Työvaiheen aikana mitatut pitoisuudet hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä sekä taustapitoisuus työpisteessä ennen toiminnan alkamista on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Hiukkasten pinta-alapitoisuuksien keskiarvot kalustetehtähdässa suoritettavien työvaiheiden aikana mitattuna hengitysvyöhykkeeltä ja työpisteeltä sekä tausta mitattuna työpisteeltä ennen toiminnan alkamista.

| <i>Työvaihe</i> <i>suure</i> | Hiukkasten pinta-alapitoisuus ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$) | | | | | |
|-------------------------------------|---|--------|--------------|------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | Hengitysvyöhyke | | | Työpiste | | Tausta |
| | DiSCmini | | PartectorTEM | NSAM | Pegasor AQ TM Indoor | Pegasor AQ TM Indoor |
| | C_{LDSA} | C_s | C_{LDSA} | C_{LDSA} | C_s | C_s |
| Hionta koneella | 6–35 | 34–148 | 8–35 | 6–26 | 152–168 | 47 |

Leipomo:

Leipomossa hengitysvyöhykkeeltä mitatut työvuoron keskiarvot C_{LDSA} :lle olivat noin 330–630 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Kokonaispinta-alapitoisuuden (C_s) keskiarvot hengitysvyöhykkeellä olivat noin 5 400–9 900 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ mittausyöstä riippuen. Työpisteestä mitattu C_{LDSA} -keskiarvo työvuoron aikana oli noin 260–560 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Kokonaispinta-alapitoisuuden keskiarvo työpisteessä oli noin 3 000–6 400 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$.

Kuten lukumääräpitoisuudetkin, myös pinta-alapitoisuudet kasvoivat sekä hengitysvyöhykkeellä että työpisteessä työvuoron edetessä. Molempien pinta-alapitoisuuksien keskiarvot olivat suurempia hengitysvyöhykkeellä kuin työpisteessä.

Työvaiheiden aikana mitatut pitoisuudet hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä sekä taustapitoisuus työpisteessä ennen toiminnan alkamista on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Hiukkasten pinta-alapitoisuuksien keskiarvot leipomossa suoritettavien työvaiheiden aikana mitattuna hengitysvyöhykkeeltä ja työpisteeltä sekä tausta mitattuna työpisteeltä ennen toiminnan alkamista.

| <i>Työvaihe</i> <i>suure</i> | Hiukkasten pinta-alapitoisuus ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$) | | | | | | Tausta |
|--------------------------------------|---|----------------|-------------------|----------------|-------------------|---------------------------------|----------------|
| | Hengitysvyöhyke | | Työpiste | | | Pegasor AQ TM Indoor | |
| | DiSCmini | | DiSCmini | | NSAM | | C _s |
| | C _{LDSA} | C _s | C _{LDSA} | C _s | C _{LDSA} | | |
| Uunien käynnistys | 2–7 | 17–31 | 2–3 | 14–21 | 1–2 | 7–12 | 7–8 |
| Taikinanteko | 17–285 | 49–6 624 | 10–384 | 30–6 088 | 6–376 | 15–1 534 | |
| Riisipiirakoiden kuori-taikinan teko | 444–1 553 | 6 669–22 938 | 428–1 598 | 4 858–18 946 | 467–1 761 | 2 252–6 890 | |

Kampaamo:

Kampaamossa hengitysvyöhykkeeltä mitatut työpäivän keskiarvot C_{LDSA}:lle olivat noin 22–28 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$.

Työvaiheista LDSA-pitoisuutta nosti erityisesti hiusten muotoilu, jolloin suihkutettiin muotoilutuotteita. Myös hiusten suoristaminen nähtiin pinta-alapitoisuutta nostavana työvaiheena. Hengitysvyöhykkeeltä mitatut LDSA-pitoisuudet olivat suurimpia työvaiheen aikana, jolloin suihkutettiin hiuslakkaa. Pienimmät LDSA-pitoisuudet mitattiin hiusten värjäyksen jälkeen värin vaikuttaessa. Työvaiheiden aikana LDSA-pitoisuus hengitysvyöhykkeellä oli enimmillään noin 5 kertaa suurempi kuin koko työpäivän keskiarvopitoisuus. Työvaiheen aikana mitatut pitoisuudet hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä sekä taustapitoisuus työpisteessä ennen toiminnan alkamista on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Hiukkasten pinta-alapitoisuuksien keskiarvot kampaamossa suoritettavien työvaiheiden aikana mitattuna hengitysvyöhykkeeltä ja työpisteeltä sekä tausta mitattuna työpisteeltä ennen toiminnan alkamista.

| <i>Työvaihe</i> <i>suure</i> | Hiukkasten pinta-alapitoisuus ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$) | | | | | | Tausta |
|-------------------------------------|---|-------------------|-------------------|----------------|-------------------|---------------------------------|----------------|
| | Hengitysvyöhyke | | Työpiste | | | Pegasor AQ TM Indoor | |
| | DiSCmini | Partector-TEM | DiSCmini | | NSAM | | C _s |
| | C _{LDSA} | C _{LDSA} | C _{LDSA} | C _s | C _{LDSA} | | |
| Hiuslakan suihkutetus | 143 | 113 | 81 | 615 | 64 | 218 | 12–16 |
| Värjäys | 30–74 | 32–76 | 53–152 | 162–493 | 32–112 | 110–309 | |

4.3 Hiukkasten muoto ja koostumus

Hiukkasten muotoa ja koostumusta tutkittiin mikroskooppisin ja spektrometrin menetelmin. Tässä hankkeessa keskityttiin nanohiukkasiin, joten elektronimikroskopiaa ei tehty suurista hiukkasista. Hengitysvyöhykenäytteitä kerättiin pääsääntöisesti koko työvuoron ajan, ja näytteenotto keskeytettiin lounastauon ajaksi. Määritettyjä pitoisuuksia verrattiin suoraan HTP_{8h}-arvoihin.

Konepajoissa muodostui nanohiukkasten lisäksi suuria, mikrometrien kokoisia hiukkasia. Analysoidut nanohiukkaset sisälsivät toiminnoista riippuen pääasiassa rautaa, mangaania, kaliumia, natriumia, kromia ja nikkeliä. CNC-koneistajan hengitysvyöhykkeeltä kerätyt hiukkaset sisälsivät mangaania ja rautaa. Hiukkaset olivat päällystyneet kevyemmällä aineilla, jotka ovat

todennäköisesti peräisin lastuamismasseista. Hitsaajan hengitysvyöhykkeeltä määritetyt Cr_{tot} - ja Ni-pitoisuudet (hengittävä pöly) olivat samaa suuruusluokkaa ruostumattoman teräksen TIG-hitsauksessa aiemmin määritettyjen pitoisuuksien kanssa (Työterveyslaitos, 2011; Coldwell ja Keen, 2010).

Kalustetehtaassa ilman impaktoria (elektronimikroskooppinäytekeräimessä esierottimena käytettiin SMPS:n impaktoria) kerätyissä näytteissä esiintyi suuria, useiden mikrometrien kokoisia hiukkasia. Nanokokoiset hiukkaset olivat pääosin peräisin kaasutrukkien päästöistä. Hengitysvyöhykkeeltä kerätyissä näytteissä esiintyi suurehkoja hiukkasia, jotka sisälsivät lähinnä hiiltä ja typpeä. Nämä hiukkaset olivat peräisin työstetyistä MDF-levyistä. Eniten nano-hiukkasista analysoiduista alkuaineista esiintyi kalsiumia, rautaa ja natriumia. Kalustetehtaan kaikissa mittauspisteissä esiintyi pallomaisia hiukkasia, ja ne lienevät ainakin osittain lähtöisin ulkoilmasta.

Leipomossa taikinantekijän hengitysvyöhykkeeltä ilman impaktoria kerätyissä näytteissä esiintyi useiden mikrometrien kokoisia jauhoihiukkasia, jotka sisälsivät hiiltä, happea, typpeä, rikkiä, fosforia ja kaliumia. Impaktorin kanssa kerätyissä näytteissä isoja hiukkasia ei esiintynyt. Lisäksi jauhopöly sisälsi myös nanokokoluokan hiukkasia. Nanokokoisia nokihiukkasia syntyi palamisprosessista. Nanoihiukkasjakeesta löytyi eniten kalsiumia. Hengittävissä pölyssä sen sijaan oli eniten kaliumia, kalsiumia, natriumia, ja magnesiumia. Hengitysvyöhykkeeltä impaktorin kanssa kerätyissä näytteissä ja työpisteeltä kerätyissä näytteissä jauhopöly esiintyi hiukkasina, jotka koostuivat pääasiassa hiilestä ja hapesta, sekä pienestä määrästä rikkiä tai piitä.

Kampaamossa esiintyi muodoltaan sekä pallomaisia että epäsäännöllisiä hiukkasia, jotka sisälsivät pääasiassa hiiltä. Todennäköisesti kerätyt hiukkaset olivat enimmäkseen peräisin ulkoilmasta. Väri- ja vaalennusaineista vapautuneista haihtuvista yhdisteistä muodostuneet hiukkaset ovat luultavasti suurimmaksi osaksi niin kevyitä, että niitä ei pystytty havaitsemaan käytettävissä olleilla menetelmillä. Kerätyt hiukkaset sisälsivät hiilen lisäksi mm. typpeä, titania, rautaa, piitä, rikkiä, kaliumia, ja kalsiumia. Hengittävän pölyn näytteistä löytyi lisäksi kromia ja nikkeliä. Hengitysvyöhykkeeltä ja työpisteestä kerätyt näytteet eivät juurikaan eronneet toisistaan, joten hiukkaset olivat jakautuneet tasaisesti työtilaan.

4.4 Esierottimen toiminta

Esierottimen tavoitteena oli erottaa nanokokoiset hiukkaset hiukkasjakaumasta. Esierottimen vaikutusta reaaliaikaiseen massapitoisuuteen testattiin TEOM-mittalaitteen kanssa. TEOM ja esierotin mittasivat reaaliaikaista massapitoisuutta työpisteessä muissa mittauskohteissa paitsi kampaamossa. Mitattu massapitoisuus oli jokaisessa mittauskohteessa esierottimen kanssa pienempi kuin ilman sitä. Konepajoissa esierottimen kanssa mitattu massapitoisuus oli noin 20–60 % ilman esierotinta mitatusta massapitoisuudesta.

Konepajassa 1 ilman esierotinta mitatusta TEOM-datasta lasketut keskiarvot olivat hieman pienempiä kuin työpisteestä IOM-keräimillä koko työpäivän ajalle määritetyt hengittävän pölyn massapitoisuudet. Konepajassa 2 puolestaan ilman esierotinta mitatusta datasta lasketut keskiarvot olivat huomattavasti pienempiä kuin työpisteestä IOM-keräimillä koko työpäivän ajalle määritetyt hengittävän pölyn massapitoisuudet.

Kalustetehtaassa esierottimen kanssa mitatut massapitoisuudet olivat hyvin pieniä ja vain 3–4 % ilman esierotinta mitatusta massapitoisuudesta. Ilman esierotinta mitatusta TEOM-dastasta lasketut keskiarvot olivat vain hieman pienempiä kuin työpisteestä IOM-keräimillä koko työpäivän ajalle määritetyt hengittyvän pölyn massapitoisuudet silloin, kun tiloissa käytettiin ilmankostutinta. Ilmankostuttimien käyttö nosti hiukkasten massapitoisuutta selvästi. Kun ilmankostutin ei ollut käytössä, TEOM-laitteella mitattu massapitoisuus oli huomattavasti IOM-keräimillä määritettyä massapitoisuutta pienempi.

Leipomossa ensimmäisenä ja toisena mittausyönä esierottimen kanssa TEOM:lla mitatut keskiarvopitoisuudet olivat samaa suuruusluokkaa IOM+esierotin yhdistelmällä työpisteestä mitattujen massapitoisuuksien kanssa. Kolmantena mittausyönä ilman esierotinta mitattu keskiarvopitoisuus oli noin kolme kertaa suurempi kuin esierottimen kanssa mitattu keskiarvopitoisuus, mutta huomattavasti pienempi kuin IOM-keräimellä työpisteestä määritetty hengittyvän pölyn massapitoisuus.

Esierotinta käytettiin myös pinta-alapitoisuuden mittaamisessa NSAM-mittalaitteen kanssa. Esierottimella oli vaikutusta NSAM:lla mitattuun pinta-alapitoisuuteen ainoastaan kalustetehtaassa. Nanohiukkasten lukumääräpitoisuutta mitattaessa esierotinta käytettiin kaupallisten mittalaitteiden edessä. Missään kohteessa esierotin ei vaikuttanut lukumääräpitoisuuksiin.

5 ALTISTUMINEN HIUKKASILLE

5.1 Altistumistasot

Hankkeen tavoitteena oli määrittää työntekijän altistumistasot (massa, lukumäärä, pinta-ala) nanohiukkasille hengitysvyöhykkeeltä tehtävillä mittauksilla. Altistumistasot eri työpaikoilla on koottu taulukkoon 10. Massapitoisuus on määritetty gravimetrisesti käyttäen IOM-keräintä ja esierotinta. Lukumäärä- ja pinta-alapitoisuuksien osalta altistumistaso on mitattu suoraan-osoittavalla hiukkasmittalaitteella (DiSCmini). Altistumistasot ovat työvuoron (n. 8 h) keskiarvopitoisuuksia, joista ei ole vähennetty taustapitoisuutta. Hitsauksen aikana mittaukset tehtiin hengityksensuojaimen ulkopuolelta, joten pitoisuudet eivät siis edusta hitsaajan altistumista vaan tilannetta, jossa hengityksensuojain ei olisi käytössä.

Nanohiukkasten massapitoisuus työntekijän hengitysvyöhykkeellä oli suurin leipomossa, jossa myös hengittyvän pölyn pitoisuus hengitysvyöhykkeellä oli korkea. Myös kalustetehtaassa nanohiukkasten massapitoisuus työntekijän hengitysvyöhykkeellä oli verrattain korkea, mutta lukumäärä- ja pinta-alapitoisuudet sen sijaan matalia. Tämä viittaa nanokokoluokan ($D_{50} \approx 0.5 \mu\text{m}$ tässä tutkimuksessa) ylärajoilla olevien hiukkasten esiintymiseen työntekijän hengitysvyöhykkeellä.

Selkeästi korkeimmat nanohiukkasten lukumääräpitoisuudet hengitysvyöhykkeellä mitattiin konepajassa 2. Hitsaustyössä nanohiukkasten lukumääräpitoisuus hitsaajan hengitysvyöhykkeellä hengityksensuojaimen ulkopuolella oli korkea kaikissa tutkituissa työvaiheissa. Koko työpäivän ajalle lasketut lukumääräpitoisuuden keskiarvot olivat noin 3 kertaa suurempia hitsaajan hengitysvyöhykkeellä kuin työpisteessä.

Konepajassa 1 CNC-koneistajan työssä käsin hionta oli työvaihe, jossa nanohiukkasten lukumääräpitoisuus oli korkea, mutta keskimääräiset koko työpäivän ajalle lasketut lukumääräpitoisuudet olivat samaa tasoa kuin taustapitoisuus.

Myös leipomossa kaikkien paistamistoimintojen ollessa käynnissä nanohiukkasten lukumääräpitoisuus hengitysvyöhykkeellä oli korkea. Kalustetehtaassa ja kampaamossa nanohiukkasten lukumääräpitoisuuden keskiarvot työpäivän aikana hengitysvyöhykkeellä olivat pieniä, mutta yksittäisissä työvaiheissa hetkelliset pitoisuudet hengitysvyöhykkeellä nousivat välillä suuriksi.

Vaikka nanohiukkasten lukumääräpitoisuus oli suurin konepajassa 2, pinta-alapitoisuus oli suurin leipomossa, mikä todennäköisesti johtuu hieman suuremmasta keskimääräisestä hiukkaskoosta leipomossa kuin konepajassa. Nanohiukkasjäte leipomossa sisälsi sekä jauhopölystä että paistamistoiminnoista peräisin olevia hiukkasia. Leipomon jauhopölyt ovat kuitenkin pääosin melko karkeita hiukkasia, mikä näkyi korkeina hengittyvän pölyn massapitoisuuksina tai kinantekijän hengitysvyöhykkeellä.

Taulukko 10. Työntekijän altistumistasot (massa C_m , lukumäärä C_n , ja keuhkojen alveolialueelle teoreettisesti kertyvien hiukkasten pinta-ala C_{LDSA}) työvuoron aikana nanohiukkasille eri työpaikoilla.

| Kohde (työntekijä) | Altistumistaso nanohiukkasille | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|--|
| | C_m (mg/m ³) | C_n (1/cm ³) | C_{LDSA} (µm ² /cm ³) |
| Konepaja 1 (CNC-koneistaja) | 0.16–0.30 | 43 000–62 000 | 119–263 |
| Konepaja 2 (hitsaaja) | 0.15–0.47 | 186 000–372 000 | 290–450 |
| Kalustetehtas (tiiminvetäjä) | 0.76 | 2 000–11 000 | 7–19 |
| Leipomo (taikinantekijä) | 0.62–1.07 | 79 000–109 000 | 379–627 |
| Kampaamo (kampaaja) | 0.09 | 14 000–15 000 | 26–28 |

Taulukossa 11 on vertailtu työpisteeltä mitattuja, koko työvuoron ajalle laskettuja nanohiukkasten massa-, lukumäärä- ja pinta-alapitoisuuksien keskiarvoja nanohiukkasten pitoisuustasoihin erilaisissa työympäristöissä. Kirjallisuusarvot ovat kiinteistä mittauspisteistä mitattuja keskiarvoja.

Tässä hankkeessa mitatut massa- ja lukumääräpitoisuudet molemmissa konepajoissa olivat samaa suuruusluokkaa teollisuusympäristöistä mitattujen pitoisuuksien kanssa ja pinta-alapitoisuudet hieman matalampia. Kalustetehtaalla lukumäärä- ja pinta-alapitoisuudet olivat huomattavan pieniä teollisuusympäristöihin verrattuna. Työntekijän hengitysvyöhykkeellä nanohiukkasten massapitoisuus oli verrattain korkea, mikä viittaa nanokokoluokan ($D_{50} \approx 0.5 \mu\text{m}$ tässä tutkimuksessa) ylärajoilla olevien hiukkasten esiintymiseen. Massapitoisuus työpisteellä oli matala, joten hengitysvyöhykkeellä mitatut hiukkaset olivat todennäköisesti peräisin prosessista tai työvaiheesta lähellä työntekijää.

Leipomossa massa-, lukumäärä-, ja pinta-alapitoisuudet työpisteessä olivat samaa suuruusluokkaa kuin aiemmissa tutkimuksissa mitatut pitoisuudet. Myös leipomossa massapitoisuus työntekijän hengitysvyöhykkeellä oli suuri, mikä johtuu paitsi nanokokoluokan ylärajoilla olevien hiukkasten esiintymisestä, myös muihin työpaikkoihin verrattuna huomattavan suuresta hengittyvän pölyn pitoisuudesta taikinantekijän hengitysvyöhykkeellä. Kampaamossa työpisteeltä mitattu massapitoisuus oli alle määräysrajan ollen pienempi kuin taulukossa 11 annettu kirjallisuusarvo PM5-hiukkasille. Nanohiukkasten lukumäärä- ja pinta-alapitoisuuksille kampaamossa ei löytynyt kirjallisuudesta vertailuarvoja.

Taulukko 11. Mittaustulosten* (massa C_m , lukumäärä C_n , ja keuhkojen alveolialueelle teoreettisesti kertyvien hiukkasten pinta-ala C_{LDSA}) vertailu kirjallisuusarvoihin.

| Mittaussympäristö | C_m (mg/m ³) | C_n (1/cm ³) | C_{LDSA} (µm ² /cm ³) |
|------------------------------------|--|--|--|
| Ulkoilma (kaupunki – tienvarsi) | 0.05 ^a (Ympäristöministeriö, 2017) | 11 000–48 000 (Morawska ym., 2008) | 40–50 (Buonanno ym., 2011) |
| Toimisto | 0.12–0.15 ^b (Saraga ym., 2014) | 2 500–12 000 (Tran Ngoc ym., 2013; Vorsburg ym., 2011) | 50 (Buonanno ym., 2011) |
| Kampaamo | 0.03–0.39 ^c (van der Wal ym., 1997) | - | - |
| Ravintola yms. | 0.01–0.33 ^d (Park ym., 2010a; Buonanno ym., 2010) | 9 100–773 000 (See ja Balasubramanian, 2006; Wierzbicka ym., 2015) | 6–270 (Park ym., 2010a; Park ym., 2010b; Neuberger ym., 2013) |
| Leipomo | 0.12–0.77 ^d (Tissari ym., 2002; Miettinen ym., 2015) | 40 000–170 000 (Miettinen ym., 2015) | 590–1 500 (Miettinen ym., 2015) |
| Teollisuusympäristö | 0.03–1.1 ^d (Elihn ja Berg, 2009; Ham ym., 2012; Zhang ym., 2013) | 15 000–1 646 000 (Elihn ym., 2011; Young ym., 2013) | 430–2 450 (Park ym., 2010a; Park ym., 2010b) |
| Tämä tutkimus | | | |
| Konepaja 1 | 0.10–0.12 | 59 000–71 000 | 273–314 |
| Konepaja 2 | 0.02–0.05 | 75 000–120 000 | 194–284 |
| Kalustetehdas | 0.001–0.01 | 5 600–9 200 | 8–22 |
| Leipomo | 0.17–0.18/0.10–0.20 ^e | 111 000 | 470–661 |
| Kampaamo | < LOD ^{e,f} | 10 000–11 000 | 28–31 |

^aPM10, 24h keskiarvon raja-arvo

^bHengittyvät hiukkaset (arvio kuvasta)

^cPM5

^dPM1

^eIOM+esierotin

^fLOD = havaitsemisraja 0.073 mg/m³

* Hiukkasten massapitoisuus taulukossa 11 on määritetty työpisteessä joko IOM+esierotin yhdistelmällä (leipomossa ja kampaamossa) tai TEOM+esierotin yhdistelmällä (konepajat ja kalustetehdas). Lukumäärä- ja pinta-alapitoisuuksien osalta CPC 3775:lla, CPC 3776:lla, CPC 3007:lla (C_n) ja NSAM:lla (C_{LDSA}). Kalustetehtaalla NSAM:lle on ilmoitettu ilman esierotinta mitattu keskiarvo.

5.2 Altistumisen arviointi

Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet (HTP-arvot) ovat sosiaali- ja terveysministeriön (STM) arvioita työntekijöiden hengitysilmän pienimmistä pitoisuuksista, jotka voivat aiheuttaa haittaa tai vaaraa työntekijöiden turvallisuudelle tai terveydelle. Ne ovat työturvallisuuslain (738/2002) 38 § 4 momentin nojalla annetulla STM:n asetuksella (1214/2016) vahvistettuja arvoja. Työnantajan on otettava ne huomioon työn vaarojen selvittämisessä ja arvioinnissa sekä työympäristön suunnittelussa työpaikan ilman puhtautta, työntekijöiden altistumista ja mittaustulosten merkitystä arvioidessaan.

Epäorgaaniselle pölylle on annettu HTP-arvo 10 mg/m³, orgaaniselle pölylle 5 mg/m³, puupölylle 2 mg/m³, ja jauhopölylle 2 mg/m³. Lisäksi kovapuupölylle annettu sitova raja-arvo on 5 mg/m³. Nanohiukkasille ei ole Suomessa asetettu HTP-arvoa. Myöskään alveolijakeiselle pölylle ei ole annettu HTP-arvoa, mutta Työterveyslaitos on antanut tavoitetason 0.5 mg/m³

(8 h) alveolijakeiselle yleiselle pölylle (Työterveyslaitos, 2016). Tavoitetaso on tarkoitettu vähentämään hiukkasten epäspesifisiä, kaikille hengitysteihin pääseville hiukkasille yhteisiä terveyshaittoja. Pienet hiukkaset pääsevät syväälle hengitysteihin, aina keuhkorakkuloihin asti, ja poistuvat sieltä hitaasti. Joillekin metalleille HTP-arvo on asetettu hengittävän pölyn lisäksi myös alveolijakeelle ($D_{50} = 4 \mu\text{m}$). Alveolijakeen $\text{HTP}_{8\text{h}}$ -arvot nikkelille ja mangaanille ovat 0.01 mg/m^3 ja 0.02 mg/m^3 , tässä järjestyksessä. Nikkeliyhdisteiden on eläinkokeissa ja epidemiologisissa tutkimuksissa osoitettu lisäävän syöpäkasvainten esiintymistä hengitysteissä (Työterveyslaitos, 2011). Mangaani aiheuttaa mm. keskushermostovaikutuksia. Vaikka hiukkaset eivät sisältäisi metalleja, ne voivat olla silti haitallisia. Esimerkiksi jauhopölyn pienimmät hiukkasjakeet voivat osaltaan vaikuttaa mm. allergisen alveoliitin syntyyn (Stobnicka ja Górný, 2015).

Työterveyslaitos on antanut teollisesti tuotetuille nanohiukkasille varovaisuusperiaatteeseen, altistumisen minimointiin ja hiukkastoksikologiaan perustuvan lukumääräpitoisuuden tavoitetaso. Tavoitetaso on taustapitoisuuden vähentämisen jälkeen kahdeksan tunnin altistumisajalle $40\,000 \text{ 1/cm}^3$ (hiukkaset, joiden tiheys $< 6000 \text{ kg/m}^3$) (Työterveyslaitos, 2013). Tavoitetasot eivät ole lakisääteisiä vaan niihin tulisi suhtautua tasoina, joihin työpaikalla olisi hyvä pyrkiä. Tavoitetasot ovat altistumistasoja, joilla altisteen aiheuttamat terveysriskit ja muut haitat voidaan olettaa olevan minimaaliset. (Työterveyslaitos, 2017) Nanohiukkasten pinta-alapitoisuudelle ei ole annettu tavoitetasoa.

Alla on arvioitu työpaikkakohtaisesti hankkeessa tutkittujen työpaikkojen osalta työntekijöiden altistumista nanohiukkasille hankkeen tulosten perusteella. Tulokset eivät suoraan ole yleistettävissä muihin vastaaviin työpaikkoihin.

Konepajat:

Nanohiukkasten ($D_{50} \approx 0.5 \mu\text{m}$) massapitoisuus CNC-koneistajan hengitysvyöhykkeellä oli enimmillään 60 % Työterveyslaitoksen antamasta alveolijakeisen pölyn tavoitetasosta. Hengittävän pölyn pitoisuudet hengitysvyöhykkeellä olivat alle 10 % epäorgaanisen pölyn HTP -arvosta. On kuitenkin huomattava, että pöly sisälsi metalleja sekä leikkuunesteen sisältämiä yhdisteitä, joille voi olla annettu yhdistekohtaisia HTP -arvoja. Tämä tulee huomioida altistumista arvioitaessa tapauskohtaisesti. Työpisteeltä mitattu alveolijakeisen pölyn massapitoisuus oli korkeimmillaan 40 % tavoitetasosta. Hengitysvyöhykkeeltä kerätyt hiukkaset sisälsivät mm. mangaania ja rautaa. Nanohiukkasjakeesta määritetty mangaanipitoisuus hengitysvyöhykkeellä oli noin 32 % alveolijakeen $\text{HTP}_{8\text{h}}$ -arvosta.

Hengitysvyöhykkeeltä mitatut nanohiukkasten lukumääräpitoisuuden keskiarvot ylittivät Työterveyslaitoksen tavoitetaso. Tosin näistä arvoista ei ole vähennetty taustapitoisuutta (päivätausta), joka oli samaa luokkaa kuin koko työvuoron ajalle lasketut hengitysvyöhykkeen keskiarvopitoisuudet. Altistuminen nanohiukkasille perustuu tämän perusteella työympäristöön yleisesti, eikä pelkästään tietyn työvaiheen aikana muodostuneisiin hiukkasiin. Käsin hionnan aikana hiukkasten lukumääräpitoisuudet olivat tyyppillisesti huomattavasti keskiarvopitoisuutta korkeampia.

Hitsaustyössä nanohiukkasten massapitoisuus hengitysvyöhykkeellä oli mittauspäivästä riippuen 30–94 % alveolijakeisen pölyn tavoitetasosta. Työpisteeltä mitatut alveolijakeisen pölyn massapitoisuudet olivat noin 25 % tavoitetasosta. Hengittävän pölyn pitoisuudet olivat 5–25

% epäorgaanisen pölyn HTP-arvosta. Hengitysvyöhykkeeltä kerätyt hiukkaset sisälsivät kromia, nikkeliä, mangaania ja rautaa. Mangaanin pitoisuus oli 11 % ja nikkelin pitoisuus oli 5.1 % alveolijakeen HTP_{8h}-arvoista.

Hitsaajan hengitysvyöhykkeeltä mitatut nanohiukkasten lukumääräpitoisuuden keskiarvot ylittivät selvästi (4–8 kertaisesti) Työterveyslaitoksen asettaman tavoitetason. Yksittäisten työvaiheiden keskiarvopitoisuudet olivat paikoin vielä huomattavasti korkeampia. Hengityksensuojaimen käyttö pienensi työntekijän todellista altistumista.

Nanohiukkasten osuus hengittyvästä pölystä ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$) konepajoissa oli noin 20–40 %.

Kalustetehdas:

Nanohiukkasten massapitoisuus hengitysvyöhykkeellä ylitti alveolijakeisen pölyn tavoitetason. Hengittyvän pölyn pitoisuudet hengitysvyöhykkeellä ja työpisteellä olivat 2–24 % kovapuupölyn sitovasta raja-arvosta ja 38–60 % puupölyn HTP-arvosta. Mikäli työstettävä materiaali sisältää kovapuuta, tulee pitoisuuksia verrata kovapuupölyn sitovaan raja-arvoon. Nanohiukkasten osuus hengittyvästä pölystä oli 64 %. Hengitysvyöhykkeeltä kerätyt, työstetyistä MDF-levyistä peräisin olleet hiukkaset sisälsivät lähinnä hiiltä ja tyypeä. Työpisteeltä mitattu alveolijakeisen pölyn massapitoisuus oli ensimmäisenä mittauspäivänä noin 36 % Työterveyslaitoksen asettamasta tavoitetasosta. Muina päivinä pitoisuus jäi alle menetelmän määrittämissä rajan. Ensimmäisenä mittauspäivänä kalustetehtaassa käytettiin ilmankostuttimia, mikä voi selittää eron.

Hengitysvyöhykkeeltä mitatut nanohiukkasten lukumääräpitoisuuden keskiarvot olivat selvästi alle Työterveyslaitoksen asettaman tavoitetason. Yksittäisissä työvaiheissa hetkelliset pitoisuudet hengitysvyöhykkeellä nousivat kuitenkin välillä suuriksi.

Leipomo:

Nanohiukkasten massapitoisuus hengitysvyöhykkeellä ylitti alveolijakeisen pölyn tavoitetason. Sen sijaan työpisteeltä mitattu alveolijakeisen pölyn massapitoisuus jäi alle tavoitetason. Työntekijän hengitysvyöhykkeeltä mitatut hengittyvän pölyn pitoisuudet ylittivät jauhopölyn HTP-arvon huomattavasti, ollen noin 300–700 % jauhopölyn HTP-arvosta. Työpisteellä pitoisuudet olivat noin 85–128 % jauhopölyn HTP-arvosta. Nanohiukkasten osuus hengittyvästä pölystä oli noin 9–15 %. Nanohiukkaset sisälsi sekä paistamistoiminnoista että jauhopölystä peräisin olevia hiukkasia.

Työntekijän hengitysvyöhykkeeltä mitatut nanohiukkasten lukumääräpitoisuuden keskiarvot ylittivät selvästi Työterveyslaitoksen asettaman tavoitetason taustapitoisuuden vähentämisen jälkeen.

Kampaamo:

Nanohiukkasten massapitoisuus työntekijän hengitysvyöhykkeellä oli alle alveolijakeisen pölyn tavoitetason. Työpisteeltä mitattu alveolijakeisen pölyn massapitoisuus oli kumpanakin mittauspäivänä alle menetelmän määrittämissä rajan. Hengittyvän pölyn pitoisuudet hengitysvyöhykkeellä ja työpisteellä olivat 3–12 % orgaanisen pölyn HTP-arvosta.

Nanohiukkasten osuus hengittyvästä pölystä oli noin 16 %. Kampaamosta kerätyt hiukkaset ovat todennäköisesti enimmäkseen peräisin ulkoilmasta.

Hengitysvyöhykkeeltä mitatut nanohiukkasten lukumääräpitoisuuden keskiarvot olivat taustapitoisuuden vähentämisen jälkeen korkeintaan 30 % Työterveyslaitoksen asettamasta tavoitetasosta.

5.3 Suositukset hiukkasille altistumisen vähentämiseksi

Hiukkasille altistumisen vähentämisessä tulee keskittyä sekä teknisiin ratkaisuihin että työtapoihin. Syöpävaarallisia aineita käsiteltäessä (esim. hitsaus) tulisi valita parasta käytössä olevaa tekniikkaa pitämään altistuminen niin pienenä kuin mahdollista.

Tekniset torjuntatoimenpiteet, kuten riittävä ilmanvaihto, kohdepoistot, koteloinnit, automaatio ym. ovat ensisijaisia altistumisen hallintakeinoja kaikilla työpaikoilla, joissa esiintyy pölyviä prosesseja tai työvaiheita. Ilmanvaihdon toiminta suositellaan tarkastettavan säännöllisin väliajoin. Hyvien työtapojen avulla saadaan teknisistä ratkaisuista mahdollisimman suuri hyöty.

Paineilman käyttöä työstettävien kappaleiden, työpisteen, ja vaatteiden puhdistamisessa tulee välttää, sillä paineilma nostaa jo pinnoille laskeutuneen pölyn takaisin hengitysilmaan. Puhdistamiseen tulee käyttää ensisijaisesti imurointia sekä kostealla pyyhintää pölyävyyden pienentämiseksi.

Hiukkasten leviäminen muualle työtiloihin tulee estää huolehtimalla ilmanvaihdon toimivuudesta. Erityisesti hitsaushuurujen leviämisen estäminen tulisi ehkäistä ja taata yleisilmanvaihdolla hitsaustyöpisteen ilman vaihtuminen 5-10 krt/h (Työterveyslaitos, 2011). Hitsauspisteissä tulee käyttää kohdepoistoja aina kun mahdollista. Kiinteissä hitsaustyöpisteissä kohdepoiston toteuttamiseen voidaan käyttää esimerkiksi imupöytiä ja -seiniä, hitsauskiinnittimeen liitettviä poistoja tai liikuteltavia imuletkuja. Poisto tulee tuoda mahdollisimman lähelle valo-kaarta, vähintään noin 30 cm etäisyydelle ja virtausnopeuden poistokanavassa tulee olla vähintään 5-10 m/s. Liikkuvassa työssä tulee käyttää liikuteltavalla imuletkulla varustettuja liikuteltavia kohdepoistolaitteita.

Leipomoissa ilmanvaihdon riittävydestä ja säännöllisestä huollosta sekä pölynpoistojärjestelmistä tulee huolehtia. Jauhojen punnituspaikalla olisi hyvä olla kohdepoisto. Jauhöpölyn osalta toimivat ja oikein käytetyt kohdepoistot jauhoja käsiteltäessä vähentävät myös nanohiukkasille altistumista. Myös uunien yläpuolisten kohdepoistojen/huuvien toimivuuteen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Uunien polttoainelinjat ja tulipesät tulee tarkistaa mahdollisten vuotojen havaitsemiseksi ja palamisilman riittävydestä huolehtia. Uunit ja arinat kannattaisi esimerkiksi imuroida ennen lämmittämisen aloittamista. Tuotteita ei suositella jäähdytettävän leipomotilassa.

Leipomoissa pölyämistä voi vähentää muuttamalla työtapoja. Esimerkiksi jauhojen pudottamismatkat, sirotteluetaisyydet, käsin jauhotuksen määrä ja heittoetaisyydet, jne. tulisivat olla mahdollisimman lyhyitä. Taikinantekokoneiden kohdepoistoa olisi hyvä käyttää jo kaadettaessa jauhoja taikinapataan. Raaka-aineita taikinapataan lisättäessä astia/jauhosäkki tulisi tyhjentää mahdollisimman lähellä padan pohjaa ja rauhallisesti pölyämisen vähentämiseksi. Taikinantekokoneet tulisi varustaa kansilla aina, kun jauhoja käsitellään. Kannen tulee istua mahdollisimman tiiviisti padan päälle. Siivouksessa ei pitäisi käyttää harjaa, koska sillä nostetaan

jo laskeutunut pöly takaisin ilmaan. Vähemmän pölyä ilmaan nostattavia menetelmiä ovat esimerkiksi imun tai lastan käyttö sekä pintojen pyyhkiminen nihkeällä/kostealla liinalla.

Myös kampaamoissa ja kalustetehtaissa tehokkaaseen yleisilmanvaihtoon ja ilmanvaihdon säännölliseen huoltoon tulisi kiinnittää huomiota, jotta eri työvaiheissa vapautuvat hiukkaset poistuisivat nopeasti ja työpaikkojen ilmanlaatu pysyisi mahdollisimman hyvänä. Myös näillä aloilla hiukkaspitoisuuden pienentämiseksi voidaan käyttää kohdepoistoja, mutta erityisesti kampaamoissa soveltuvien ja kustannustehokkaiden ratkaisujen löytäminen työympäristöön voi olla vaikeaa.

Kunnes tekniset torjuntatoimenpiteet saadaan toteutettua ja mikäli teknisten torjuntatoimenpiteiden toteuttaminen ei ole mahdollista, suositellaan hengityksensuojaimen käyttöä. Tutkituista työvaiheista erityisesti hitsauksen aikana tulee ehdottomasti käyttää hengityksensuojainta, ensisijaisesti puhallinsuojainta tai raitisilmapuhaltimia. Myös käsin hionnan aikana suositellaan käytettäväksi hengityksensuojainta.

Hengityksensuojain valitaan aina työpaikan riskinarvioinnin perusteella. Yleisesti, P3-luokan suodatinsuojain suojaa hiukkasmaisilta ilman epäpuhtauksilta. Mikäli suojainta on tarpeen käyttää yli kaksi tuntia päivässä, tulisi valita puhaltimella toimiva hengityksensuojain, joka on varustettu hiukkassuodattimella. Suojaimia valitessa tulee varmistaa kaikkien suojainten yhteensopivuus. Hengityksensuojaimen oikeasta käytöstä, huoltamisesta, ja suodattimien säännöllisestä vaihdosta on huolehdittava. Lisätietoja suojautumisesta saa Työterveyslaitoksen internet-sivuilta osoitteesta www.ttl.fi/tyoymparisto/henkilonsuojaimet/kaytto-ja-valinta/hengityksensuojaimet/ sekä www.ttl.fi/malliratkaisut.

5.4 Toimenpidesuosituksukset

Hankkeen tuloksena laadittiin suositukset nanohiukkasaltistumisen hallintaan työpaikoilla. Toimenpidesuosituksia voivat hyödyntää kaikki työpaikat, joissa on mahdollista altistua nanohiukkasille. Toimenpideohje perustuu yleisiin riskinhallinnan perusteisiin. Altistumisen vähentämiseen tähtäävien toimenpiteiden tulee aina perustua työpaikan riskinarviointiin. Riskinarvioinnin tukena voi käyttää ulkopuolisia asiantuntijoita, esimerkiksi työhygieenikkoja ja työterveyshuoltoa.

Ensisijaisesti altistumisen hallinnan tulee perustua päästöjen syntymisen ja vapautumisen ehkäisemiseen, seuraavaksi teknisiin riskinhallintakeinoihin päästön leviämisen ehkäisemiseksi ja vasta viimeisenä keinona henkilökohtaisiin suojaimiin. Torjuntatekniset ratkaisut mitoitetaan riskinarvioinnin perusteella. Henkilökohtaiset suojaimet valitaan niin ikään riskinarvioinnin perusteella. Henkilökohtaisten suojainten valinnassa työpaikat saavat apua suojainvalmistajilta ja työterveyshuollosta.

Toimenpidesuosituksukset löytyvät liitteestä 3 ja Työterveyslaitoksen internet-sivuilta osoitteesta www.ttl.fi/nanoturvallisuus.

6 TULOSTEN HYÖDYNNETTÄVYYS

Tutkimuksen tuloksia voivat hyödyntää ensisijaisesti yritykset, joiden työntekijät voivat altistua työssään nanohiukkasille. Tuloksia voidaan käyttää riskinarvioinnin tukena kartoitettaessa työpaikan prosesseja ja työvaiheita, joissa nanohiukkasia saattaa vapautua. Tuloksia voidaan hyödyntää myös arvioitaessa työntekijöiden altistumista nanohiukkasille ja torjuntateknisten toimien riittävyttä, parannettaessa työyhteisöjen toiminnan turvallisuutta ja kehitettäessä kemiallisten altisteiden hallintamenetelmiä.

Tuloksia voivat hyödyntää kaikki työpaikat, joiden prosesseissa vapautuu työilmaan nanohiukkasia. Hankkeessa laaditut toimenpidesuositukset toteutettiin liittämällä niihin liittyvä materiaali Työterveyslaitoksen internet-sivuille, josta se on kaikkien kiinnostuneiden helposti löydettävissä.

Hankkeessa toteutettujen pitkien mittausten avulla saatiin arvokasta tietoa nanohiukkaspitoisuuksien vaihtelusta eri toimialoilla ja työtehtävissä, sekä mittaustulosten hajonnasta. Saatua tietoa voidaan hyödyntää jatkossa mittausepävarmuuden hallinnassa.

Tuloksia voidaan hyödyntää myös uuden työhygieenisen mittausstrategian (CEN689) testaamisessa ja käyttöönotossa Suomessa.

Myös esimerkiksi mittalaitteiden valmistajat ja kansainvälinen tiedeyhteisö voivat hyödyntää tuloksia. Työpaikoilta mitatut pitoisuustasot tallennetaan kansainvälisiin tutkimustietokantoihin (esim. Necid = Nano Exposure and Contextual Information Database) sekä lisätään FINJEM -altistumistietokantaan.

7 YHTEENVETO

Hankkeessa kehitetty esierotin toimi moitteettomasti useiden nanohiukkasten mittaamiseen käytettyjen mittalaitteiden kanssa. Esierotin ei kuitenkaan toiminut työntekijän henkilökohtaiseen monitorointiin tarkoitettujen diffuusiovaraajien kanssa (DiSCmini, PartectorTEM), koska laitteiden sisäiset pumpit eivät olleet riittävän tehokkaita, jotta ne olivat pystyneet imeämään näytevirtaa esierottimen läpi. IOM-keräimen ja esierottimen yhdistelmällä saatiin määritettyä nanohiukkasten massapitoisuus ja osuus hengittävistä pölyistä työntekijän hengitysvyöhykkeellä.

Esierotin ei vaikuttanut mitattuun lukumääräpitoisuuteen työpisteessä yhdelläkään työpäivällä. Sen sijaan keuhkoihin teoreettisesti deponoituvien hiukkasten pinta-alapitoisuus (C_{LDSA}) oli kalustetehtaalla ensimmäisenä ja kolmantena mittauspäivänä ilman esierotinta NSAM:lla mitattuna noin 2–3 kertaa korkeampi kuin esierottimen kanssa mitattu pitoisuus. Sama näkyi PartectorTEM:n työntekijän hengitysvyöhykkeeltä mitaamissa LDSA-pitoisuuksissa. Työpisteeltä mitatussa reaaliaikaisessa massapitoisuudessa esierottimen käyttö näkyi selvästi.

Nanohiukkasia vapautui kaikista tutkituista prosesseista. Nanohiukkasia tuottavat työvaiheet erottuivat parhaiten lukumääräpitoisuuden aikasarjoista sekä hengitysvyöhykkeellä että työpisteessä. Nanohiukkasten massapitoisuus työntekijän hengitysvyöhykkeellä oli suurin leipomossa, jossa myös hengittävän pölyn pitoisuus hengitysvyöhykkeellä oli korkea. Myös kalustetehtaassa nanohiukkasten massapitoisuus työntekijän hengitysvyöhykkeellä oli verrattain korkea, mutta lukumäärä- ja LDSA-pitoisuudet sen sijaan matalia. Tämä viittaa nanokokoluokan ($D_{50} \approx 0.5 \mu\text{m}$ tässä tutkimuksessa) ylärajoilla olevien hiukkasten esiintymiseen työntekijän hengitysvyöhykkeellä kalustetehtaassa. Esierottimen leikkausraja ei ole kovin jyrkkä, joten jos leikkausrajaa hieman suurempia hiukkasia esiintyy paljon, ne vaikuttavat mitattuun massapitoisuuteen. Toisaalta, lukumäärä- ja LDSA-pitoisuuksia mitanneen DiSCmini:n impaktori leikkaa pois halkaisijaltaan yli $0.7 \mu\text{m}$ hiukkaset.

Korkeimmat nanohiukkasten lukumääräpitoisuudet mitattiin konepajassa 2 (hitsaus). Myös leipomossa kaikkien paistamistoimintojen ollessa käynnissä nanohiukkasten lukumääräpitoisuus oli korkea. Vaikka nanohiukkasten lukumääräpitoisuus oli suurin konepajassa 2, C_{LDSA} oli suurin leipomossa, mikä todennäköisesti johtui hieman suuremmasta keskimääräisestä hiukkaskokoista leipomossa.

Konepajoissa työntekijöiden hengitysvyöhykkeeltä kerätyt nanohiukkaset sisälsivät mm. terveydelle haitallisia metalleja, HTP-arvoihin verrattaessa eniten mangaania ja nikkeliä. Kalustetehtaassa, leipomossa ja kampaamossa hiukkaset olivat pääosin orgaanisia.

Hengitysvyöhykemittaukset antoivat pääasiassa tarkempaa tietoa nanohiukkasille altistumisesta kuin työpistemittaukset. Kuitenkin jos prosessissa syntyvät hiukkaset olivat erittäin pieniä, eivät hengitysvyöhykemittauksiin soveltuvat laitteet pystyneet mittaamaan niitä. Esimerkiksi hitsaamisen aikana syntyneitä hiukkasia ei pystytty mittaamaan hengitysvyöhykkeeltä yhtä tehokkaasti kuin työpisteeltä, jossa laitteen mittausalueen alaraja oli pienempi (4 nm) verrattuna hengitysvyöhykkeeltä mittavan laitteen mittausalueen alarajaan (10 nm).

Tutkituista työpaikoista altistuminen nanohiukkasille oli suurinta konepajoissa erityisesti hitsauksen ja hiomisen yhteydessä. Nanohiukkasten lisäksi näiden työvaiheiden aikana on mahdollista altistua myös syöpävaarallisille ja muuten terveydelle haitallisille metalleille. Näiden työvaiheiden aikana altistumista tulisi pyrkiä pienentämään torjuntateknisillä toimenpiteillä sekä erityisesti hitsauksen aikana myös hengityksensuojainta käyttämällä.

Leipomoissa jauhopölylle altistumiseen tulee myös kiinnittää huomiota. Tässä hankkeessa tutkitussa kohteessa työntekijä altistui jauhopölypitoisuuksille, jotka olivat selvästi yli jauhopölylle annetun HTP-arvon. Leipomoissa on erittäin tärkeää kiinnittää huomiota työtilojen ilmanvaihtoon, kohdepoistoihin sekä työtappoihin, jotta altistuminen voidaan minimoida. Lisätietoa jauhopölyn hallinnasta saa esimerkiksi Työturvallisuuskeskuksen julkaisusta ”Pölyt pois yhteistyöllä – Vähennä jauhopölyä leipomossa” (Säämänen ym., 2012) ja <https://ttk.fi/tyohyvinvointi-ja-tyosuojelu/toimialakohtaista-tietoa/teollisuus/elintarvikeala>.

Nanohiukkasaltistumisen hallinnassa tulisi ensisijaisesti pyrkiä estämään päästön syntyminen ja sen vapautuminen hengitysilmaan. Tekniset torjuntatoimenpiteet, kuten kohdepoistot, koteloinnit, automaatio ym. ovat toimivia altistumisen hallintakeinoja kaikilla tutkituilla työpaikoilla. Henkilökohtaisten suojaimien käyttöön tulisi turvautua vasta kun kaikki muut toimenpiteet altistumisen vähentämiseksi on tehty. Lisätietoa altistumisen hallinnasta saa esimerkiksi Työterveyslaitoksen internet-sivuilta osoitteesta www.ttl.fi. Toimenpidesuositukset nanohiukkasaltistumisen hallintaa varten löytyvät osoitteesta www.ttl.fi/nanoturvallisuus.

KIRJALLISUUS

- Asbach C., Fissan H., Stahlmecke B., ym. (2009) Conceptual limitations and extensions of lung-deposited Nanoparticle Surface Area Monitor (NSAM). *J Nanopart Res* 11:101-109.
- Asbach C., Fissan H., Kaminski H., ym. (2011) A low pressure drop preseparator for elimination of particles larger than 450 nm. *Aerosol and Air Quality Res* 11:487–496.
- Asikainen V., Damsten H., Ihalainen M., ym. (2009) Rakennuspölylle altistumisen vähentäminen uudisrakentamisessa. Kuopion yliopisto, Ympäristötieteen laitoksen monistesarja 3/2009, Kuopio, 91 s.
- van Broekhuizen P., van Broekhuizen F., Cornelissen R., Reijnders L. (2012) Workplace exposure to nanoparticles and the application of provisional nanoreference values in times of uncertain risks. *J Nanopart Res* 14:770.
- Brouwer D., Berges M., Virji M.A., ym. (2012) Harmonization of measurement strategies for exposure to manufactured nano-objects; Report of a workshop. *Ann Occup Hyg* 56:1–9.
- Brouwer D., van Duuren-Stuurman B., Berges M., ym. (2009) From workplace air measurement results toward estimates of exposure? Development of a strategy to assess exposure to manufactured nano-objects. *J Nanopart Res* 11:1867–1881.
- Brouwer D.H., Gijbbers J.H.J., Lurvink M.W.M. (2004) Personal exposure to ultrafine particles in the workplace: Exploring sampling techniques and strategies. *Ann Occup Hyg* 48:439–453.
- Buonanno G., Morawska L., Stabile L., Viola A. (2010) Exposure to particle number, surface area and PM concentrations in pizzerias. *Atmos Environ* 44:3963-3969.
- Buonanno G., Morawska L., Stabile L. (2011) Exposure to welding particles in automotive plants. *J Aerosol Sci* 42:295-304.
- Buringh E., Noy D., Pouwels H., Swuste, P. (1992). A systematic implementation of control measures for airborne contaminants in workplace air. *Staub- Reinhaltung der Luft*. 52:347–351.
- Coldwell M., Keen C. (2010) A small survey of exposure to stainless steel welding fume. Health and Safety Executive, Research report RR770, Buxton, 38 s.
- Curvin B., Bertke S. (2011) Exposure characterization of metal oxide nanoparticles in the workplace. *J Occup Environ Hyg* 8:580–587.
- Elihn K., Berg P. (2009) Ultrafine particle characteristics in seven industrial plants. *Ann Occup Hyg* 53:475–484.
- Elihn K., Berg P., Liden G. (2011) Correlation between airborne particle concentrations in seven industrial plants and estimated respiratory tract deposition by number, mass and elemental composition. *J Aerosol Sci* 42:127-41.
- Ham S., Yoon C., Lee E., ym. (2012) Task-based exposure assessment of nanoparticles in the workplace. *J Nanopart Res* 14:1126.
- Hsiao T-C., Chen D-R., Son S.Y. (2009) Development of mini-cyclones as the size-selective inlet of miniature particle detectors. *Aerosol Sci* 40:481-491.
- Hämeri K., Lähde T., Hussein T., ym. (2009) Facing the key workplace challenge: Assessing and preventing exposure to nanoparticles at source. *Inhal Toxicol* 21(S1):17–24.
- International Commission on Radiological Protection (ICRP) (1994) Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3).
- Kenny L.C., Gussman R.A. (2000) A direct approach to the design of cyclones for aerosol-monitoring applications. *J Aerosol Sci* 31:1407-1420.
- Komission suositus 2011/696/EU nanomateriaalin määritelmästä; EUVL L 275, 20.10.2011, s. 38-40.
- Lehtimäki M., Säämänen A. (2013) Best available technology (BAT) nanomateriaalien valmistuksessa ja käsittelyssä. VTT-R-02265-13, 96 s.
- Lyyränen J., Backman U., Tapper U., ym. (2009) A size selective nanoparticle collection device based on diffusion and thermophoresis. *J Physics: Conference Series* 170:012011. doi:10.1088/1742-6596/170/1/012011.

- Löndahl J., Möller W., Pagels J. H., ym. (2014) Measurement techniques for respiratory tract deposition of airborne nanoparticles: A critical review. *J Aerosol Med Pulmonary Drug Deliv* 27:229-254.
- Maynard A.D., Aitken R.J. (2007) Assessing exposure to airborne nanomaterials: current abilities and future requirements. *Nanotoxicol* 1:26-41.
- Miettinen M., Torvela T., Koponen H., ym. (2015) Kuinka paljon ja millaisille nanohiukkasille työpaikoilla altistutaan Suomessa? Itä-Suomen yliopisto, Ympäristötieteen laitos, Kuopio, 48 s.
- Miettinen M., Torvela T., Leskinen J.T.T. (2016) Physicochemical characterization of aerosol generated in the gas tungsten arc welding of stainless steel. *Ann Occup Hyg* 60:960-968.
- Morawska L., Ristovski Z., Jayaratne E.R., ym. (2008) Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: Characteristics, ambient processing and implications on human exposure. *Atmos Environ* 42:8113-38.
- Nel A.E., Mädler L., Velegol D., ym. (2009) Understanding biophysicochemical interactions at the nano-bio interface. *Nat Mater* 8:543-557.
- NIOSH (2009) Approaches to safe nanotechnology. Managing the health and safety concerns associated with engineered nanomaterials. DHHS (NIOSH) Publication No. 2009-125, 104 s.
- Neuberger M., Moshhammer H., Schietz A. (2013) Exposure to ultrafine particles in hospitality venues with partial smoking bans. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 23(5):519-524.
- Oberdörster G., Maynard A., Donaldson K., ym. (2005) Principles for characterizing the potential human health effects from exposure to nanomaterials: elements of a screening strategy. *Part Fibre Toxicol* 2:8.
- Oberdörster G., Sharp Z., Atudorei V., ym. (2004) Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhalation Toxicol* 16:437-445.
- Park J.Y., Ramachandran G., Raynor P.C., ym. (2010a) Comparing Exposure Zones by Different Exposure Metrics Using Statistical Parameters: Contrast and Precision. *Ann Occup Hyg* 54(7):799-812.
- Park J.Y., Ramachandran G., Raynor P.C., ym. (2010b) Determination of particle concentration rankings by spatial mapping of particle surface area, number, and mass concentrations in a restaurant and a die casting plant. *J Occup Environ Hyg* 7:466-476.
- Rantanen S., Pääkkönen R. (2008) Työhygieniä. Kemialliset ja fysikaaliset tekijät. Työsuojeluhallinto. Työsuojelujulkaisuja 86. Multiprint, Tampere, 110 s.
- Savolainen K., Vainio H. (2011) Synteettisten nanohiukkasten ja nanoteknologian riskit. *Lääketieteellinen Aikakauskirja Duodecim* 127:1097-104.
- Schneider T., Jansson A., Jensen K.A. ym. (2007) Evaluation and control of occupational health risks from nanoparticles. Nordic council of ministers. Copenhagen, Denmark, TemaNord 2007:581. Available at <http://www.norden.org/publications>.
- See S.W., Balasubramanian R. (2006) Risk assessment of exposure to indoor aerosols associated with Chinese cooking. *Environ Res* 102:197-204.
- Seipenbusch M., Binder A., Kasper G. (2008) Temporal evolution of nanoparticle aerosols in workplace exposure. *Ann Occup Hyg* 52:707-716.
- STM (2016) HTP-arvot 2016. Haitalliseksi tunnetut pitoisuudet. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja 2016:8. STM, s. 1-98.
- Stobnicka A., Górny R.L. (2015) Exposure to flour dust in the occupational environment. *JOSE* 21:241-249.
- Säämänen A., Ruotsala R., Piispanen P., Kanerva T. (2012) Pölyt pois yhteistyöllä – Vähennä jauhopölyä leipomossa. Työturvallisuuskeskus, Helsinki, 53 s.
- Tissari J., Nuutinen J., Raunemaa T. (2002) Pienihiukkaset leipomossa. Lähteet, koostumus ja pienihiukkasille altistuminen. Kuopion yliopisto, Ympäristötieteiden laitosten monistesarja 16/2002. Kuopio, 56 s.
- Tissari J., Yli-Pirilä P., Nuutinen J., ym. (2005) Pienihiukkasten vähentäminen pienleipomossa. Kuopion yliopisto, Ympäristötieteiden laitos, Kuopio, 32 s.

- Tran Ngoc Q., He C., Morawska L., Knibbs L.D. (2013) Influence of ventilation and filtration on indoor particle concentrations in urban office buildings. *Atmos Environ* 79:41-52.
- TSI (2012) Measuring nanoparticle exposure. Application note NSAM-001. [http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Application_Notes/NSAM-001appnote.pdf] (sivulla käyty 20.9.2016).
- Työterveyslaitos (2016) Hengittävän ja alveolijakeisen pölyn tavoitetasoperustelumuistio. Tavoitetaso TU-01-2016.
- Työterveyslaitos (2013) Teollisesti tuotettujen nanomateriaalien tavoitetasoperustelumuistio. Tavoitetaso TY-02-2013.
- Työterveyslaitos (2011) Terästen hitsaussavun/huurun tavoitetasoperustelumuistio. Tavoitetaso TY-04-2011.
- Työterveyslaitos (2017) Tavoitetasot. www.ttl.fi/tavoitetasot. (sivulla käyty 30.5.2017).
- Vosburgh D.J.H., Ku B.K., Peters T.M. (2014) Evaluation of a Diffusion Charger for Measuring Aerosols in a Workplace. *Ann Occup Hyg* 58:424-36.
- van der Wal J.F., Hoogveen A.W., Moons A.M.M. (1997) Investigation on the exposure of hairdressers to chemical agents. *Env Int* 23:433-439.
- Welling I., Lehtimäki M., Rautio S., ym. (2008) Wood dust particle and mass concentrations and filtration efficiency in sanding of wood materials. *J Occup Environ Hyg* 6:90-98.
- Wierzbicka A., Bohgard M., Pagels J.H., Dahl A., Londahl J., Hussein T., Swietlicki E., Gudmundsson A. (2015) Quantification of differences between occupancy and total monitoring periods for better assessment of exposure to particles in indoor environments. *Atmos Environ* 106:419-28.
- Young L.H., Lin Y.H., Lin T.H., ym. (2013) Field Application of a Newly Developed Personal Nanoparticle Sampler to Selected Metalworking Operations. *Aerosol Air Qual Res* 13:849-61.
- Zhang M., Jian L., Bin P., ym. (2013) Workplace exposure to nanoparticles from gas metal arc welding process. *J Nanopart Res* 15:2016.
- Zimmer A.D., Maynard A.D. (2002) Investigation of the aerosols produced by a high-speed hand-held grinder using various substrates. *Ann Occup Hyg* 46:663-672.
- Ympäristöministeriö (2017) Valtioneuvoston asetus ilmanlaadusta 79/2017. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170079> (sivulla käyty 10.6.2017)

LIITTEET

Liite 1: Mittaustulosten yksityiskohtainen tarkastelu

Liite 2: Hankkeessa käytetyt mittalaitteet ja analyysimenetelmät

Liite 3: Toimenpidesuosituksset altistumisen vähentämiseksi

1 TAUSTAPITOISUUDET

Taustapitoisuudet eri työpaikoilla on koottu taulukkoon 1. Työpisteessä taustapitoisuudet ovat yöllä ennen toiminnan alkamista mitattuja keskiarvopitoisuuksia. Lukumääräpitoisuus (C_n) mitattiin CPC 3775:lla, CPC 3776:lla, NanoScan SMPS:lla tai DiSCmini-nanohiukkasmonitorilla, kokonaispinta-alapitoisuus (C_s) Pegasor AQTM Indoor -laitteella, ja massapitoisuus (C_m) TEOM:lla. Kampaamossa, jossa TEOM ei ollut mukana, massapitoisuus (PM15) mitattiin DustTrak DRX -laitteella.

Taustapisteessä C_m yöllä on DustTrak DRX:n mittaama PM15-hiukkasten keskiarvopitoisuus, ja päivällä IOM-keräimillä määritetty hengittyvän pölyn ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$) pitoisuus. C_n mitattiin yöllä NanoScan SMPS:lla, ja päivällä P-Trak:lla tai CPC 3007:lla. C_s mitattiin Pegasor AQTM Indoor -laitteella (P) tai DiSCmini:lla (D), ja keuhkojen alveolialueelle teoreettisesti deponoituvien hiukkasten pinta-alapitoisuus (C_{LDSA}) DiSCmini:lla. Konepajassa 1 C_{LDSA} :n mittaus yöllä taustapisteessä ei onnistunut. Leipomossa ja kampaamossa C_{LDSA} ennen toiminnan alkamista työpisteessä oli hyvin pieni, alle $7 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, joten lukuarvoja ei merkitty taulukkoon 1.

Kalustetehtaalla pitoisuudet taustapisteessä olivat yöllä suurempia kuin päivällä, lukumääräpitoisuutta lukuun ottamatta. Muissa kohteissa pitoisuudet taustapisteessä olivat yöllä pienempiä kuin päivällä. Konepajassa 2 pitoisuudet taustapisteessä olivat korkeita, koska ilmanvaihto ei toiminut mittauskampanjan aikana normaalisti kovan pakkasen vuoksi osittain suljettujen tuloilmapisteidensä takia, ja lisäksi taustapisteen läheisyydessä oli erityisesti toisena mittauspäivänä hitsaustoimintaa.

Taulukko 1. Keskimääräiset taustapitoisuudet (massa C_m , lukumäärä, C_n , ja kokonaispinta-ala C_s) eri työpaikoilla työpisteessä (yöllä ennen toiminnan alkamista) ja taustapisteessä (yöllä ennen toiminnan alkamista ja päivällä). Työpisteessä C_m on mitattu TEOM:lla tai DustTrak DRX:llä, C_n CPC 3775:lla, CPC 3776:lla, NanoScan SMPS:lla, tai DiSCmini-nanohiukkasmonitorilla, ja C_s Pegasor AQTM Indoor -laitteella. Taustapisteessä C_m on mitattu IOM-keräimillä (hengittyvä pöly) tai DustTrak DRX -laitteella (PM15), C_n NanoScan SMPS:lla, P-Trak:lla, tai CPC 3007:lla, C_s Pegasor AQTM Indoor -laitteella tai DiSCmini:lla, ja C_{LDSA} DiSCmini:lla.

| Kohde (työntekijä) | Mittauspiste | | | | | | |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|--|--|---|---|---|
| | Työpiste | | | Taustapiste | | | |
| | C_m (mg/m^3) | C_n ($1/\text{cm}^3$) | C_s ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$) | C_m (mg/m^3) | C_n ($1/\text{cm}^3$) | C_s ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$) | C_{LDSA} ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$) |
| Konepaja 1 (CNC-koneist.) | 0.002 | $13 \cdot 10^3$ - $22 \cdot 10^3$ | 82 | 0.008 ^a 0.22-0.29 ^b | $14 \cdot 10^3$ ^a $41 \cdot 10^3$ - $58 \cdot 10^3$ ^b | 105^a (P) 944^b (P) 1778 - 2832^b (D) | - ^a 215 - 286^b |
| Konepaja 2 (hitsaaja) | 0.052 | $3.5 \cdot 10^3$ - $19 \cdot 10^3$ | 379 | 0.014-0.062 ^a 0.12-0.20 ^b | - ^a $84 \cdot 10^3$ - $150 \cdot 10^3$ ^b | 52 - 585^a (P) 116 - 1009^a (D) 1283 - 2285^b (D) | 15 - 95^a 241 - 443^b |
| Kalustetehdas (tiiminvetäjä) | 0.077 | $0.6 \cdot 10^3$ - $1.5 \cdot 10^3$ | 47 | 0.08-0.10 ^a 0.07-0.09 ^b | $0.9 \cdot 10^3$ ^a $1.3 \cdot 10^3$ - $1.7 \cdot 10^3$ ^b | 43^a (P) 32 - 37^b (D) | 10^a 5 - 6^b |
| Leipomo (taikinantekijä) | 0.003 | $0.4 \cdot 10^3$ - $0.6 \cdot 10^3$ | 7-8 | - | - | - | - |
| Kampaamo (kampaaja) | 0.006- 0.009 | $3.3 \cdot 10^3$ | 12-16 | - | - | - | - |

^aYö

^bPäivä

2 PITOISUUDET HENGITYSVYÖHYKKEELLÄ JA TYÖPISTEESSÄ TYÖVUORON AIKANA

2.1 Massapitoisuudet

IOM-keräimillä määritetyt hengittävän pölyn ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$), alveolijakeen ($D_{50} = 4 \mu\text{m}$) ja nanohiukkasten ($D_{50} \approx 0.5 \mu\text{m}$) massapitoisuudet työntekijän hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä eri työpajoilla on koottu taulukkoon 2. Hengitysvyöhykenäytteitä kerättiin koko työvuoron ajan, ja näytteenotto keskeytettiin lounastauon ajaksi, paitsi leipomossa, jossa näytteenottoa ei keskeytetty työvuoron aikana. Konepajassa 1 yhdessä hengitysvyöhykkeeltä kerätyssä näytteessä näytteenottoaika oli työvuoron kestoa lyhyempi. Kiinteän pisteen (työpiste) näytteissä näytteenottoa ei keskeytetty taukojen ajaksi.

Hengittävän pölyn massapitoisuudet työntekijän hengitysvyöhykkeellä olivat pienimpiä kampaamossa ja konepajassa 2 (ensimmäistä mittauspäivää lukuun ottamatta). Selvästi suurimpia hengittävän pölyn pitoisuudet olivat taikinantekijän hengitysvyöhykkeellä leipomossa. Myös työpisteessä hengittävän pölyn pitoisuudet olivat suurimpia leipomossa. Nanohiukkasten massapitoisuus hengitysvyöhykkeellä oli suurin leipomossa ja kalustetehtaalla, pienin kampaamossa.

Taulukko 2. Eri työpaikoilta IOM-keräimillä määritetyt hengittävän pölyn ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$) ja nanohiukkasten ($D_{50} \approx 0.5 \mu\text{m}$) massapitoisuudet (C_m) työntekijän hengitysvyöhykkeellä, ja hengittävän pölyn (kaksi näytettä) sekä alveolijakeen ($D_{50} = 4 \mu\text{m}$) massapitoisuudet työpisteessä. Leipomossa ja kampaamossa työpisteestä määritettiin myös nanohiukkasten massapitoisuus.

| Kohde (työntekijä) | mittaus- päivä | C_m (mg/m ³) | | | | |
|---------------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| | | HV | | Työpiste | | |
| | | Hengittävä pöly | Nanohiukkas- jake | Hengittävä pöly | Alveolijake | Nanohiukkas- jake |
| Konepaja 1 (CNC-koneistaja) | 1 | 0.71 | 0.30 ^a | 0.39-0.49 | 0.20 | - |
| | 2 | 0.79 | 0.16 | 0.22-0.29 | 0.16 | - |
| | 3 | 0.93 | 0.19 | 0.24 | 0.17 | - |
| Konepaja 2 (hitsaaja) | 1 | 2.48 | 0.47 | 0.26-0.33 | < LOQ ^b | - |
| | 2 | 0.47 | 0.17 | 0.17-0.22 | 0.13 | - |
| | 3 | 0.54 | 0.15 | 0.31-0.32 | 0.12 | - |
| Kalustetehtas (tiiminvetäjä) | 1 | - | - | 0.34 | 0.18 | - |
| | 2 | - | - | 0.18-0.24 | < LOQ ^c | - |
| | 3 | 1.19 | 0.76 | 0.11-0.20 | < LOQ ^c | - |
| Leipomo (taikinantekijä) | 1 | 14.49 | - | 2.1-2.57 | 0.29 | 0.10 |
| | 2 | 7.19 | 1.07 | 1.7-2.30 | 0.32 | 0.16 |
| | 3 | 6.81 | 0.62 | 1.9-2.49 | 0.36 | 0.20 |
| Kampaamo (kampaaja) | 1 | 0.58 | 0.09 | 0.24-0.25 | < LOQ ^d | < LOD ^e |
| | 2 | 0.35 | < LOD ^e | 0.15-0.16 | < LOQ ^d | < LOD ^e |

^aKeräysaika tässä näytteessä 225 min

^bLOQ = määrittäysraja: 0.12 mg/m³

^cLOQ: 0.10 mg/m³

^dLOQ: 0.14 mg/m³

^eLOD = havaitsemisraja: 0.073 mg

Konepajassa 1 hengittävän pölyn massapitoisuus oli hengitysvyöhykkeellä noin 1.5–4 kertaa suurempi kuin työpisteessä. Nanohiukkasten osuus hengittävästä pölystä hengitysvyöhykkeellä oli 20–42 %. Tosin ensimmäisenä mittauspäivänä esierottimen kanssa näytteenottopumpun virtausten kanssa oli ongelmia ja keräys keskeytettiin kesken työpäivän, joten tulos (42 %) ei välttämättä ole täysin luotettava. Alveolijakeen osuus hengittävästä pölystä työpisteessä oli 41–71 %. Myös mini-LAS -laite mittasi keuhko- ja alveolijakeen osuutta hengittävästä pölystä työpisteessä. Alveolijakeen osuus hengittävästä pölystä oli noin 60–70 %. Keuhkojakeen osuus hengittävästä pölystä oli noin 90 % ensimmäisenä ja

kolmantena mittauspäivänä, toisena mittauspäivänä hengittyvän pölyn ja keuhkojakeen laskennalliset massapitoisuudet olivat yhtä suuret.

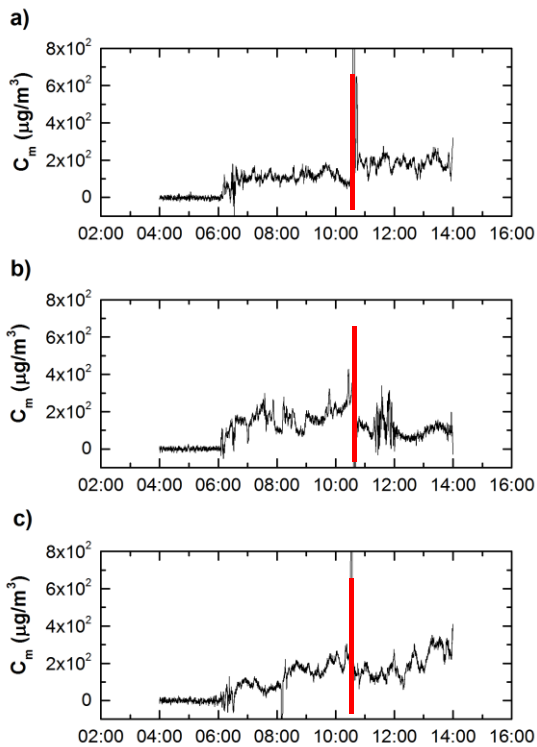
Konepajassa 2 hengittyvän pölyn massapitoisuus oli hengitysvyöhykkeellä noin 2–3 kertaa suurempi kuin työpisteessä, lukuun ottamatta ensimmäistä mittauspäivää, jolloin hengittyvän pölyn massapitoisuus hengitysvyöhykkeellä oli noin kymmenkertainen työpisteeseen verrattuna. Työntekijä hioi ensimmäisenä mittauspäivänä työstettäviä kappaleita teräsharjalla, minkä havaittiin olevan pölyvä työvaihe. Lisäksi työntekijä puhdisti paineilmalla työstettävät kappaleet ja vaatteensa hiomisen jälkeen. Hiontatyö ja vaatteiden puhdistus paineilmalla ovat todennäköisesti syynä muita päiviä korkeampiin massapitoisuuksiin hengitysvyöhykkeellä ensimmäisenä mittauspäivänä. Nanohiukkasten osuus hengittyvästä pölystä oli 19–36 %. Alveolijakeen osuus hengittyvästä pölystä työpisteessä oli noin 38–59 %. Mini-LAS -laitteen tuloksista lasketut keuhkojakeen ja alveolijakeen osuudet hengittyvästä pölystä olivat noin 65–81 % ja 13–31 %, tässä järjestyksessä.

Kalustetehtaassa hengitysvyöhykkeeltä kerättyjen IOM-näytteiden tulokset kahtena ensimmäisenä mittauspäivänä olivat epäloogisia (nanohiukkasjakeen massapitoisuus oli suurempi kuin hengittyvän pölyn massapitoisuus), joten tuloksia ei raportoida. Kolmannen mittauspäivän tulosten perusteella IOM-keräimillä määritetty hengittyvän pölyn massapitoisuus oli hengitysvyöhykkeellä noin 6 kertaa suurempi kuin työpisteessä. Hengittyvän pölyn massapitoisuus työpisteessä oli suurin ensimmäisenä mittauspäivänä, mikä johtuu ilmankostuttimien käytöstä kalustetehtaassa tuona päivänä. Nanohiukkasten osuus hengittyvästä pölystä oli 64 %, mutta tulokseen pitää suhtautua varauksella. Hengitysvyöhykkeeltä määritetty hengittyvän pölyn massapitoisuus oli todennäköisesti liian alhainen, joten nanohiukkasten osuus hengittyvästä pölystä ei luultavasti ole noin suuri. Alveolijakeen osuus hengittyvästä pölystä työpisteessä oli noin 53 %. Mini-LAS ei toiminut kalustetehtaassa.

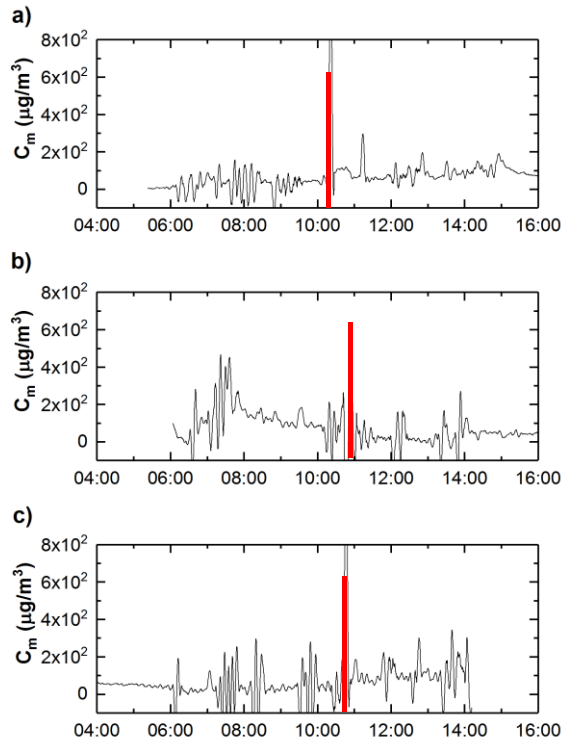
Leipomossa sekä hengittyvän pölyn että nanohiukkasten massapitoisuus oli hengitysvyöhykkeellä noin 3–6 kertaa suurempi kuin työpisteessä. Nanohiukkasten osuus hengittyvästä pölystä oli 9–15 %. Kiinteästä pisteestä IOM-vahtokeräimellä määritetty hengittyvän pölyn pitoisuus oli kaikkina mittauspäivinä pienempi kuin tavallisella IOM-keräimellä määritetty hengittyvän pölyn pitoisuus. Alveolijakeen osuus IOM-vahtokeräimellä määritetystä hengittyvästä pölystä oli 14–19 %. Grimm Dust Monitor 1.108 -laitteen tuloksista lasketut keuhkojakeen ja alveolijakeen osuudet hengittyvästä pölystä olivat noin 47–51 % ja 8–9 %, tässä järjestyksessä.

Kampaamossa hengittyvän pölyn massapitoisuus oli hengitysvyöhykkeellä noin kaksi kertaa suurempi kuin työpisteessä. Nanohiukkasten massapitoisuus jäi alle havaitsemisrajan kolmessa näytteessä neljästä. Nanohiukkasten osuus hengittyvästä pölystä oli noin 16 %. Alveolijakeisen pölyn massapitoisuus molempina päivinä oli alle määrittämissä rajan. Grimm Dust Monitor 1.108 -laitteen tuloksista koko mittausjaksolle lasketut keuhkojakeen ja alveolijakeen osuudet hengittyvästä pölystä olivat noin 86 % ja 65 %, tässä järjestyksessä.

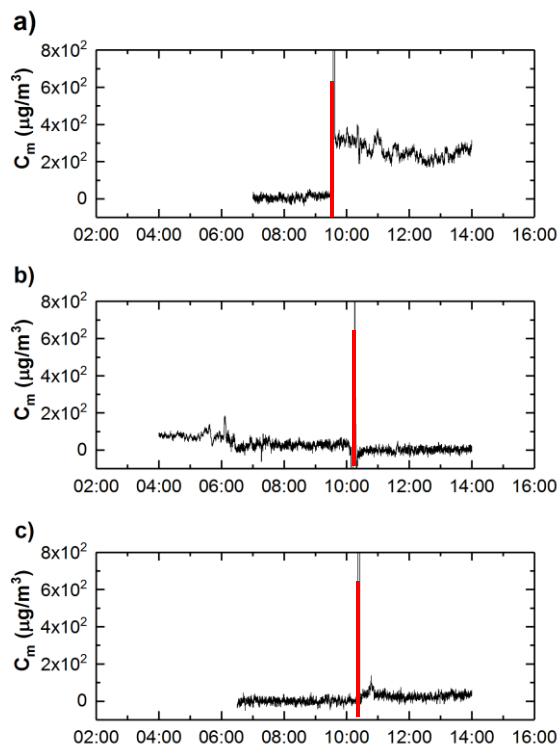
Työpisteessä hiukkasten reaaliaikaista massapitoisuutta mitattiin TEOM:lla, jonka edessä käytettiin välillä esierotinta. Kampaamossa TEOM ei ollut mukana. TEOM mittasi konepajoissa ja kalustetehtaassa ensimmäisen ja kolmannen mittauspäivän aamupäivät esierottimen kanssa, iltapäivät ilman. Toisena mittauspäivänä TEOM mittasi aamulla ilman esierotinta, iltapäivällä sen kanssa. Esierotin otettiin pois tai laitettiin paikoilleen lounastauon aikana (Kuvat 1-3). Leipomossa TEOM mittasi kaksi ensimmäistä yötä esierottimen kanssa, kolmannen yön ilman sitä (Kuva 4). Massapitoisuus oli esierottimen kanssa luonnollisesti pienempi kuin ilman sitä. Työskentelyjaksot eivät erottuneet massapitoisuuden aikasarjoista. Ilman esierotinta ja esierottimen kanssa mitatut keskiarvopitoisuudet on koottu taulukkoon 3.



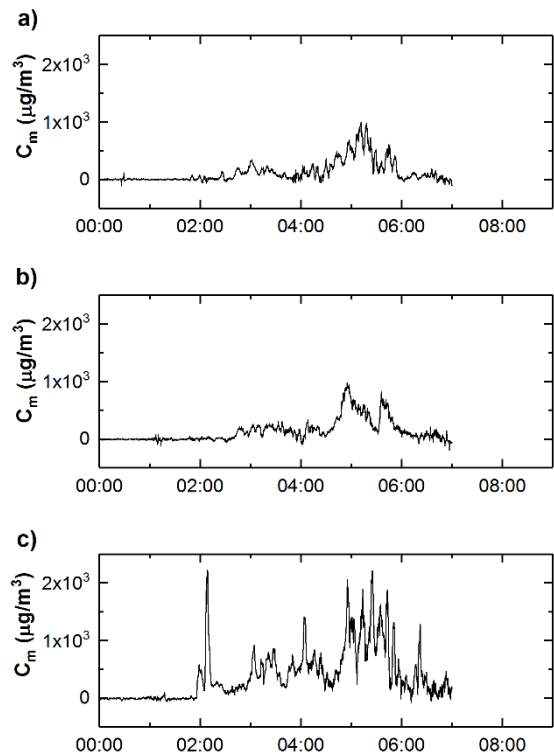
Kuva 1. Massapitoisuuden aikasarja (3 min keskiarvoistus) konepajassa 1 työpisteessä mitattuna TEOM:lla **a)** ensimmäisenä mittauspäivänä, **b)** toisena mittauspäivänä, ja **c)** kolmantena mittauspäivänä. Kuviin on punaisella pystyviivalla merkitty, milloin esierotin on otettu pois tai laitettu paikoilleen. Esierotin oli TEOM:n edessä ensimmäisenä ja kolmantena mittauspäivänä aamupäivällä (kuvat a ja c), toisena mittauspäivänä iltapäivällä (kuva b).



Kuva 2. Massapitoisuuden aikasarja (3 min keskiarvoistus) konepajassa 2 työpisteessä mitattuna TEOM:lla **a)** ensimmäisenä mittauspäivänä, **b)** toisena mittauspäivänä, ja **c)** kolmantena mittauspäivänä. Kuviin on punaisella merkitty, milloin esierotin on otettu pois tai laitettu paikoilleen. Esierotin oli TEOM:n edessä ensimmäisenä ja kolmantena mittauspäivänä aamupäivällä (kuvat a ja c), toisena mittauspäivänä iltapäivällä (kuva b).



Kuva 3. Massapitoisuuden aikasarja (3 min keskiarvoistus) kalustetehtaassa työpisteessä mitattuna TEOM:lla **a)** ensimmäisenä mittauspäivänä, **b)** toisena mittauspäivänä, ja **c)** kolmantena mittauspäivänä. Kuviin on punaisella pystyviivalla merkitty, milloin esierotin on otettu pois tai laitettu paikoilleen. Esierotin oli TEOM:n edessä ensimmäisenä ja kolmantena mittauspäivänä aamupäivällä (kuvat a ja c), toisena mittauspäivänä iltapäivällä (kuva b).



Kuva 4. Hiukkasten massapitoisuuden aikasarja (3 min keskiarvoistus) leipomossa työpisteessä mitattuna TEOM:lla **a)** ensimmäisenä mittausyönä, **b)** toisena mittausyönä, ja **c)** kolmantena mittausyönä. Esierotin oli TEOM:n edessä ensimmäisenä ja toisena mittausyönä.

Taulukko 3. TEOM:lla ilman esierotinta tai sen kanssa mitattu massapitoisuuden keskiarvo (\pm keskihajonta) työpisteessä eri työpaikoilla.

| Kohde (työntekijä) | mittaus- päivä | C_m (mg/m ³) | |
|---------------------------------|-------------------|----------------------------|--------------------|
| | | ei esierotinta | esierotin käytössä |
| Konepaja 1 (CNC-koneistaja) | 1 | 0.19 \pm 0.03 | 0.10 \pm 0.04 |
| | 2 | 0.16 \pm 0.07 | 0.10 \pm 0.07 |
| | 3 | 0.20 \pm 0.07 | 0.12 \pm 0.07 |
| Konepaja 2 (hitsaaja) | 1 | 0.08 \pm 0.04 | 0.05 \pm 0.14 |
| | 2 | 0.12 \pm 0.10 | 0.02 \pm 0.07 |
| | 3 | 0.11 \pm 0.07 | 0.03 \pm 0.08 |
| Kalustetehtas (tiiminvetäjä) | 1 | 0.26 \pm 0.04 | 0.01 \pm 0.02 |
| | 2 | 0.03 \pm 0.03 | 0.001 \pm 0.014 |
| | 3 | 0.03 \pm 0.02 | 0.001 \pm 0.015 |
| Leipomo (taikinantekijä) | 1 | - | 0.17 \pm 0.20 |
| | 2 | - | 0.18 \pm 0.21 |
| | 3 | 0.54 \pm 0.41 | - |

Konepajassa 1 esierottimen kanssa mitattu massapitoisuus oli 53–63 % ilman esierotinta mitatusta massapitoisuudesta. Ilman esierotinta mitatusta datasta lasketut keskiarvot olivat hieman pienempiä kuin työpisteestä IOM-keräimillä koko työpäivän ajalle määritetyt hengittyvän pölyn massapitoisuudet.

Konepajassa 2 esierottimen kanssa mitattu massapitoisuus oli 17–63 % ilman esierotinta mitatusta massapitoisuudesta. Ilman esierotinta mitatusta datasta lasketut keskiarvot olivat huomattavasti pienempiä kuin työpisteestä IOM-keräimillä koko työpäivän ajalle määritetyt hengittyvän pölyn massapitoisuudet.

Kalustetehtaassa esierottimen kanssa mitatut massapitoisuudet olivat hyvin pieniä ja vain 3–4 % ilman esierotinta mitatusta massapitoisuudesta. Ilman esierotinta mitatusta datasta laskettu keskiarvo oli ensimmäisenä päivänä vain hieman pienempi kuin IOM-keräimillä määritetty hengittyvän pölyn massapitoisuus. Toisena ja kolmantena mittauspäivänä massapitoisuus oli huomattavasti IOM-keräimillä määritettyä massapitoisuutta pienempi. Ilmankostuttimien käyttö ensimmäisenä mittauspäivänä nosti suurempien hiukkasten massapitoisuutta selvästi (Kuva 3a, iltapäivällä ilman esierotinta mitattu massapitoisuus).

Leipomossa ensimmäisenä ja toisena mittausyönä työpisteestä TEOM:lla esierottimen kanssa mitatut keskiarvopitoisuudet olivat samaa suuruusluokkaa IOM+esierotin yhdistelmällä työpisteestä mitattujen massapitoisuuksien kanssa. Kolmantena mittausyönä TEOM:lla ilman esierotinta mitattu keskiarvopitoisuus oli noin kolme kertaa suurempi kuin esierottimen kanssa mitattu keskiarvopitoisuus, mutta huomattavasti pienempi kuin IOM-keräimellä työpisteestä määritetty hengittyvän pölyn massapitoisuus.

Reaaliaikaista laskennallista massapitoisuutta hengitysvyöhykkeellä seurattiin DiSCmini-nanohiukkamonitorilla. Laskennalliset massapitoisuudet olivat kaikilla työpaikoilla huomattavasti pienempiä kuin IOM+esierotin yhdistelmällä hengitysvyöhykkeeltä määritetty nanohiukkasten massapitoisuus ja usein myös pienempiä kuin työpisteestä TEOM+esierotin yhdistelmällä mitattu nanohiukkasten massapitoisuus.

2.2 Lukumääräpitoisuudet ja lukumääräkokojakaumat

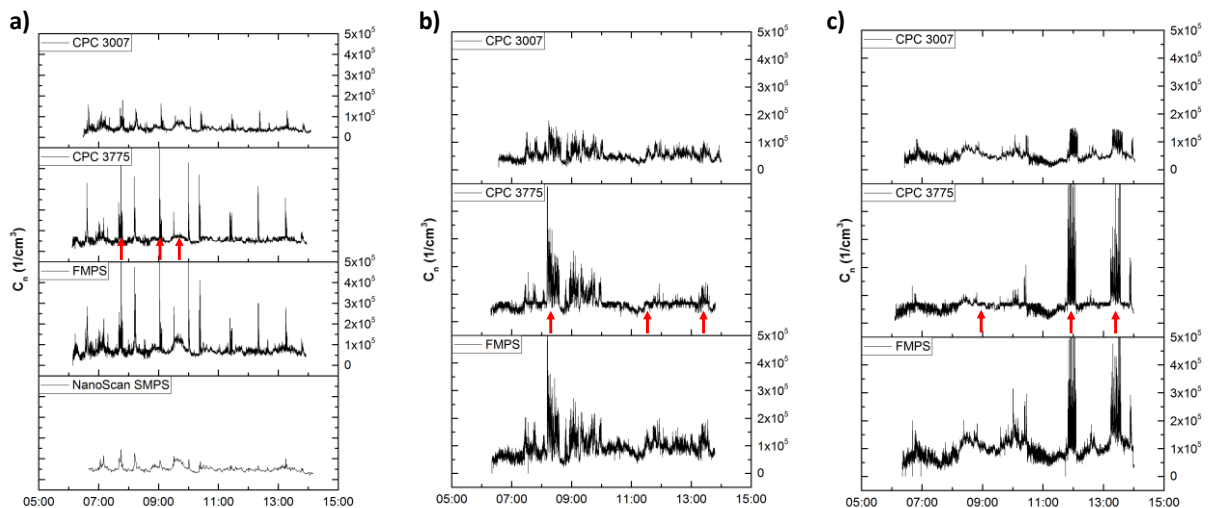
Työpisteessä lukumääräpitoisuus mitattiin kondensaatiohiukkaslaskureilla (CPC 3775, CPC 3776 ja CPC 3007) ja sähköisillä liikkuvuusokoluokittelijoilla (FMPS, NanoScan SMPS). Hengitysvyöhykkeellä luku-

määräpitoisuus ja keskimääräinen hiukkaskoko (D_p) mitattiin DiSCmini-nanohiukkasmonitorilla. Työskentelyjaksojen aikana mitatut keskimääräiset lukumääräpitoisuudet työntekijän hengitysvyöhykkeellä olivat selvästi suurimpia konepajassa 2. Myös konepajassa 1 käsin hionnan aikana ja leipomossa kaikkien paistamistoimintojen ollessa käynnissä yhtä aikaa lukumääräpitoisuuden keskiarvot olivat korkeita.

Lukumääräkokojakaumat työpisteessä mitattiin FMPS:lla ja NanoScan SMPS:lla. Kaikilla työpaikoilla ilmaan vapautui nanohiukkasia tutkituista työvaiheista. Kunkin työpaikan tulokset on esitetty erikseen alla.

Konepaja 1:

NanoScan SMPS mittasi työpisteessä vain ensimmäisenä mittauspäivänä, eikä se alhaisemman aikaresoluutionsa vuoksi pystynyt seuraamaan lukumääräpitoisuuden nopeaa vaihtelua käsin hionnan aikana (Kuva 5a). CPC 3007 ei todennäköisesti pystynyt havaitsemaan pienimpiä käsin hionnassa muodostuneita hiukkasia, koska sen mittausalueen alaraja on 10 nm. Myös laitteen pitoisuusalueen yläraja, $1 \cdot 10^5 \text{ 1/cm}^3$, ylittyi pitoisuuspiikkien aikana. CPC 3775:n edessä käytettiin välillä esierotinta. Esierotinmen käyttö ei juurikaan vaikuttanut mitattuihin lukumääräpitoisuuksiin.



Kuva 5. Lukumääräpitoisuuden (C_n) aikasarjat konepajassa 1 työpisteessä **a)** ensimmäisenä mittauspäivänä mitattuna CPC 3007:lla, CPC 3775:lla, FMPS:lla, ja NanoScan SMPS:lla, **b)** toisena mittauspäivänä mitattuna CPC 3007:lla, CPC 3775:lla, ja FMPS:lla, ja **c)** kolmantena mittauspäivänä mitattuna CPC 3007:lla, CPC 3775:lla, ja FMPS:lla. Kuviin on punaisilla nuolilla merkitty niiden työskentelyjaksojen keskikohtat, joilta on laskettu lukumääräpitoisuuden keskiarvot taulukkoon 4 (työskentelyjaksot 1-3, aikajärjestyksessä). Y-akselin asteikko on sama kaikissa kuvissa.

Käsin hionta erottui myös hengitysvyöhykkeeltä mitatuista lukumääräpitoisuuden aikasarjoista. Koko työpäivän ajalle (lounastauko vähennetty) laskettu keskiarvopitoisuus hengitysvyöhykkeellä ensimmäisenä mittauspäivänä oli $(62 \pm 66) \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$, toisena mittauspäivänä $(43 \pm 32) \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$, ja kolmantena mittauspäivänä $(47 \pm 128) \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$. Käsin hionnan aikana keskimääräinen hiukkaskoko hengitysvyöhykkeellä oli noin 30–70 nm päivästä ja työn aktiivisuudesta riippuen. Työstökoneella työskentelyn aikana keskimääräinen hiukkaskoko hengitysvyöhykkeellä oli noin 60–90 nm.

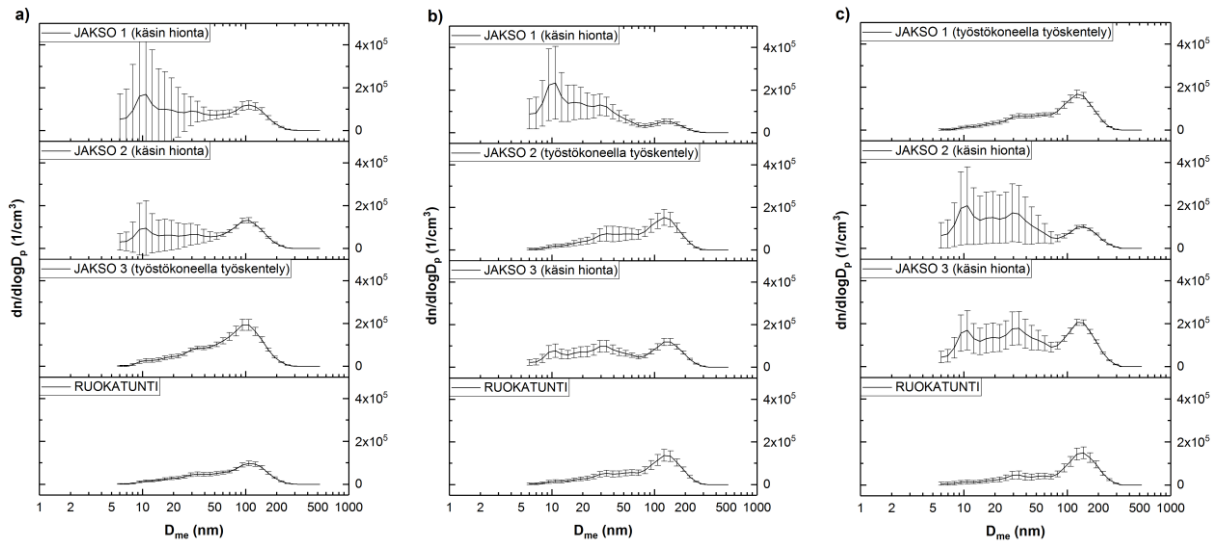
Taulukkoon 4 on koottu hiukkasten lukumääräpitoisuuksien keskiarvot keskihajontoineen kuvaan 5 merkittyjen työskentelyjaksojen 1-3 aikana kunakin mittauspäivänä työpisteessä ja hengitysvyöhykkeellä. CPC 3775:n tuloksista laskettuna keskimääräinen lukumääräpitoisuus työpisteessä oli käsin hionnan aikana enimmillään noin kolme kertaa suurempi kuin työstökoneella työskentelyn aikana. Korkeimmat mitatut hetkelliset lukumääräpitoisuudet käsin hionnan aikana työpisteessä olivat noin $3500 \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$. DiSCmini:n hengitysvyöhykkeeltä mitaamat lukumääräpitoisuuden keskiarvot työskentelyjaksojen aikana olivat ensimmäisenä mittauspäivänä korkeampia kuin työpisteestä CPC 3775:lla mitatut, mutta toisena ja kolmantena mittauspäivänä tilanne oli päinvastainen. Erityisesti käsin hionnasta muodostui kuitenkin paljon pieniä hiukkasia, joten lukumääräpitoisuuden hengitysvyöhykkeellä käsin hionnan aikana on täytynyt todellisuudessa olla samaa suuruusluokkaa tai suurempi kuin työpisteessä. Korkeimmat mitatut hetkelliset lukumääräpitoisuudet käsin hionnan aikana hengitysvyöhykkeellä olivat noin $1000 \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$.

Taulukko 4. Hiukkasten lukumääräpitoisuuden (C_n) keskiarvot keskihajontoineen ($ka \pm SD$) hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä kunakin mittauspäivänä kuvaan 5 merkittyjen työskentelyjaksojen 1-3 aikana. Työskentelyjaksojen pituudet olivat 6-34 min.

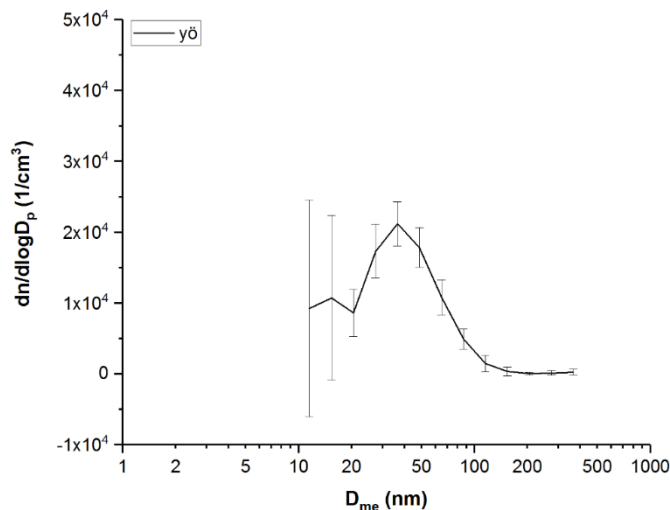
| Mittauspäivä/jakso | Hiukkasten lukumääräpitoisuus ($1/\text{cm}^3$), $ka \pm SD$ | | | |
|---|--|-------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | HV | Työpiste | | |
| | DiSCmini | CPC 3775 | CPC 3007 | FMPS |
| 1/jakso 1 (käsin hionta) | $(126 \pm 102) \cdot 10^3$ | $(119 \pm 133) \cdot 10^3, a$ | $(64 \pm 26) \cdot 10^3$ | $(153 \pm 155) \cdot 10^3$ |
| 1/jakso 2 (käsin hionta) | $(115 \pm 52) \cdot 10^3$ | $(89 \pm 60) \cdot 10^3, a$ | $(57 \pm 21) \cdot 10^3$ | $(111 \pm 62) \cdot 10^3$ |
| 1/jakso 3 (työstökoneella työskentely) | $(126 \pm 79) \cdot 10^3$ | $(72 \pm 43) \cdot 10^3, a$ | $(69 \pm 5.6) \cdot 10^3$ | $(124 \pm 10) \cdot 10^3$ |
| 2/jakso 1 (käsin hionta) | $(96 \pm 64) \cdot 10^3$ | $(150 \pm 72) \cdot 10^3$ | $(84 \pm 31) \cdot 10^3$ | $(155 \pm 78) \cdot 10^3$ |
| 2/jakso 2 (työstökoneella työskentely) | $(42 \pm 29) \cdot 10^3$ | $(60 \pm 13) \cdot 10^3, a$ | $(50 \pm 17) \cdot 10^3$ | $(101 \pm 28) \cdot 10^3$ |
| 2/jakso 3 (käsin hionta) | $(44 \pm 13) \cdot 10^3$ | $(77 \pm 15) \cdot 10^3, a$ | $(62 \pm 15) \cdot 10^3$ | $(116 \pm 25) \cdot 10^3$ |
| 3/jakso 1 (työstökoneella työskentely) | $(51 \pm 14) \cdot 10^3$ | $(64 \pm 8.0) \cdot 10^3, a$ | $(52 \pm 6.6) \cdot 10^3$ | $(101 \pm 11) \cdot 10^3$ |
| 3/jakso 2 (käsin hionta) | $(51 \pm 25) \cdot 10^3$ | $(164 \pm 171) \cdot 10^3$ | $(78 \pm 28) \cdot 10^3$ | $(177 \pm 115) \cdot 10^3$ |
| 3/jakso 3 (käsin hionta) | $(79 \pm 25) \cdot 10^3$ | $(157 \pm 74) \cdot 10^3$ | $(95 \pm 25) \cdot 10^3$ | $(217 \pm 69) \cdot 10^3$ |

^aCPC 3775:n edessä käytettiin esierotinta

Koska NanoScan mittasi työpisteessä vain ensimmäisenä päivänä, eikä pienemmän aikaresoluutionsa vuoksi pystynyt seuraamaan lukumääräpitoisuuden nopeata vaihtelua käsin hionnan aikana, eri työskentelyjaksoilta esitetään vain FMPS:n mitaamat lukumääräkokojakaumat (Kuva 6). NanoScan SMPS:n mitaama keskimääräinen lukumääräkokojakauma työpisteessä ensimmäisenä mittauspäivänä ennen toiminnan alkamista (klo 4:00-5:30) on esitetty kuvassa 7. Ennen toiminnan alkamista lukumääräkokojakauma oli yksihuippuinen ja hiukkasten geometrinen keskikoko (GMD) noin 35 nm (1.7) (sulussa geometrinen keskihajonta, GSD). Toiminnan aikana lukumääräkokojakauman huippu oli noin 100 nm kohdalla ja käsin hionnan aikana muodostui runsaasti pieniä, alle 50 nm:n hiukkasia, jolloin lukumääräkokojakauma muuttui monihuippuiseksi (Kuva 6).



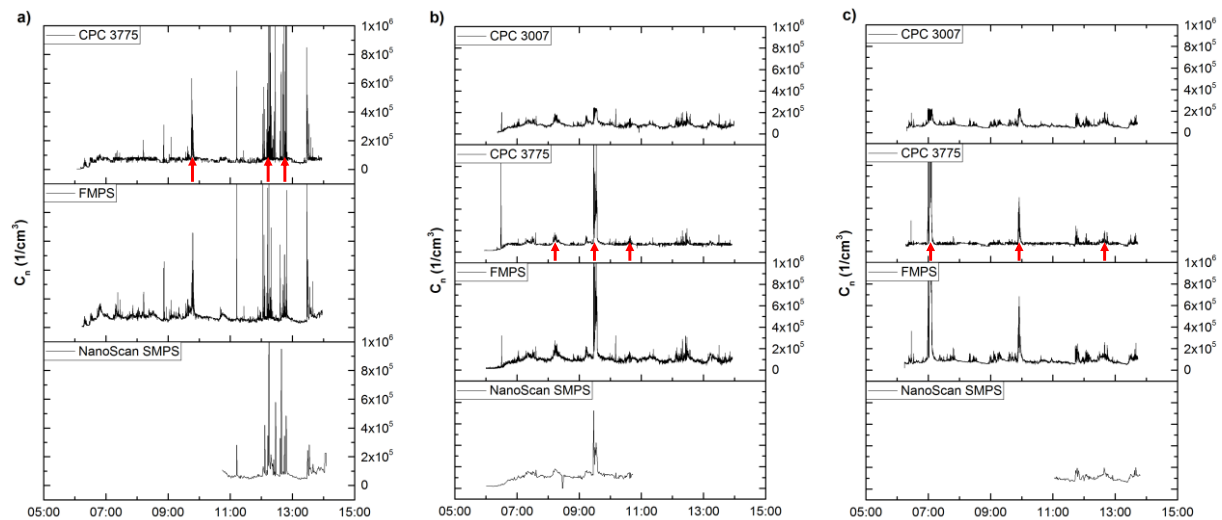
Kuva 6. FMPS:lla konepajassa 1 työpisteestä mitatut keskimääräiset lukumääräkokojakaumat keskihajontoineen työskentelyjaksojen 1-3 ja ruokatunnin aikana **a)** ensimmäisenä mittauspäivänä, **b)** toisena mittauspäivänä, **c)** kolmantena mittauspäivänä.



Kuva 7. NanoScan SMPS:lla konepajassa 1 työpisteestä mitattu keskimääräinen lukumääräkokojakauma keskihajontoineen ensimmäisenä mittauspäivänä ennen toiminnan alkamista (klo 4:00-5:30).

Konepaja 2:

NanoScan SMPS mittasi työpisteessä ensimmäisenä ja kolmantena mittauspäivänä iltapäivällä, toisena mittauspäivänä aamupäivällä (Kuva 8). CPC 3007 mittasi työpisteessä toisena ja kolmantena mittauspäivänä. Sen pitoisuusalueen yläraja, $1 \cdot 10^5$ $1/\text{cm}^3$, ylittyi pitoisuuspiikkien aikana. CPC 3775:n edessä käytettiin välillä esierotinta. Esierottimen käyttö ei juurikaan vaikuttanut mitattuihin lukumääräpitoisuuksiin.



Kuva 8. Lukumääräpitoisuuden (C_n) aikasarjat konepajassa 2 työpisteessä **a)** ensimmäisenä mittauspäivänä mitattuna CPC 3775:lla, FMPS:lla, ja NanoScan SMPS:lla, **b)** toisena ja **c)** kolmantena mittauspäivänä mitattuna CPC 3007:lla, CPC 3775:lla, FMPS:lla, ja NanoScan SMPS:lla. Kuviiin on punaisilla nuolilla merkitty niiden työskentelyjaksojen keskikohdat, joilta on laskettu lukumääräpitoisuuden keskiarvot taulukkoon 5 (työskentelyjaksot 1-3, aikajärjestyksessä). Y-akselin asteikko on sama kaikissa kuvissa.

Koko työpäivän ajalle (tauot vähennetty) laskettu keskiarvopitoisuus hengitysvyöhykkeellä ensimmäisenä mittauspäivänä oli $(252 \pm 1017) \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$ ja keskimääräinen hiukkaskoko $41 \pm 23 \text{ nm}$. Toisena mittauspäivänä keskiarvopitoisuus oli $(372 \pm 1352) \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$ ja keskimääräinen hiukkaskoko $40 \pm 11 \text{ nm}$. Kolmantena mittauspäivänä keskiarvopitoisuus oli $(186 \pm 705) \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$ ja keskimääräinen hiukkaskoko $46 \pm 20 \text{ nm}$.

Taulukkoon 5 on koottu hiukkasten lukumääräpitoisuuksien keskiarvot keskihajontoineen kuvaan 8 merkittyjen työskentelyjaksojen 1-3 aikana kunakin mittauspäivänä työpisteessä ja hengitysvyöhykkeellä. CPC 3775:n tuloksista lasketut keskimääräiset lukumääräpitoisuudet hitsauksen aikana työpisteessä olivat välillä $83 \cdot 10^3 - 260 \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$. Hengitysvyöhykkeeltä DiSCmini:lla mitatut keskimääräiset lukumääräpitoisuudet hitsauksen aikana olivat välillä $83 \cdot 10^3 - 2002 \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$. Hengitysvyöhykkeellä lukumääräpitoisuuden keskiarvo hitsauksen aikana oli suurimmillaan yli 20-kertainen työpisteestä mitattuun keskiarvoon verrattuna. Korkeimmat hetkelliset lukumääräpitoisuudet hitsauksen aikana hengitysvyöhykkeellä olivat noin $18000 \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$ ja työpisteessä noin $5300 \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$. Kulmahiomakoneella hiomisen aikana keskimääräiset lukumääräpitoisuudet olivat yleensä vielä korkeampia kuin hitsauksen aikana.

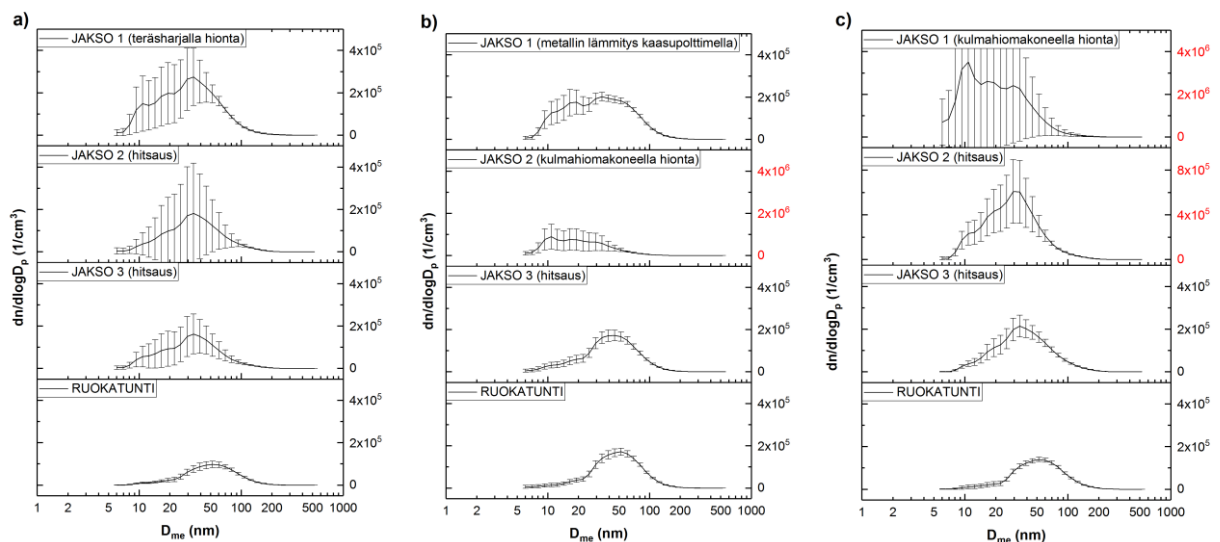
Taulukko 5. Lukumääräpitoisuuden (C_n) keskiarvot keskihajontoineen ($ka \pm SD$) hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä kunakin mittauspäivänä kuvaan 8 merkittyjen työskentelyjaksojen 1-3 aikana. Työskentelyjaksojen pituudet olivat 4-15 min.

| Mittauspäivä/jakso | Hiukkasten lukumääräpitoisuus ($1/cm^3$), $ka \pm SD$ | | | |
|---|---|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| | HV | Työpiste | | |
| | DiSCmini | CPC 3775 | CPC 3007 | FMPS |
| 1/jakso 1 (teräsharjalla hionta) | $(2629 \pm 2923) * 10^3$ | $(143 \pm 77) * 10^{3,a}$ | - | $(195 \pm 99) * 10^3$ |
| 1/jakso 2 (hitsaus) | $(856 \pm 2217) * 10^3$ | $(207 \pm 439) * 10^3$ | - | $(108 \pm 124) * 10^3$ |
| 1/jakso 3 (hitsaus) | - | $(189 \pm 353) * 10^3$ | - | $(101 \pm 58) * 10^3$ |
| 2/jakso 1 (metallin lämmitys kaasupolttimella) | $(724 \pm 1697) * 10^3$ | $(110 \pm 16) * 10^3$ | $(134 \pm 20) * 10^{3,b}$ | $(173 \pm 30) * 10^3$ |
| 2/jakso 2 (kulmahiomakoneella hionta) | $(201 \pm 257) * 10^3$ | $(487 \pm 347) * 10^3$ | $(201 \pm 46) * 10^{3,b}$ | $(581 \pm 343) * 10^3$ |
| 2/jakso 3 (hitsaus) | $(2002 \pm 3448) * 10^3$ | $(83 \pm 16) * 10^3$ | $(89 \pm 16) * 10^3$ | $(108 \pm 19) * 10^3$ |
| 3/jakso 1 (kulmahiomakoneella hionta) | $(2421 \pm 2223) * 10^3$ | $(2423 \pm 3097) * 10^{3,a}$ | $(145 \pm 41) * 10^{3,b}$ | $(2198 \pm 2668) * 10^3$ |
| 3/jakso 2 (hitsaus) | $(83 \pm 49) * 10^3$ | $(260 \pm 98) * 10^{3,a}$ | $(183 \pm 45) * 10^{3,b}$ | $(365 \pm 143) * 10^3$ |
| 3/jakso 3 (hitsaus) | $(275 \pm 822) * 10^3$ | $(96 \pm 21) * 10^3$ | $(104 \pm 20) * 10^{3,b}$ | $(132 \pm 28) * 10^3$ |

^aCPC 3775:n edessä käytettiin esierotinta

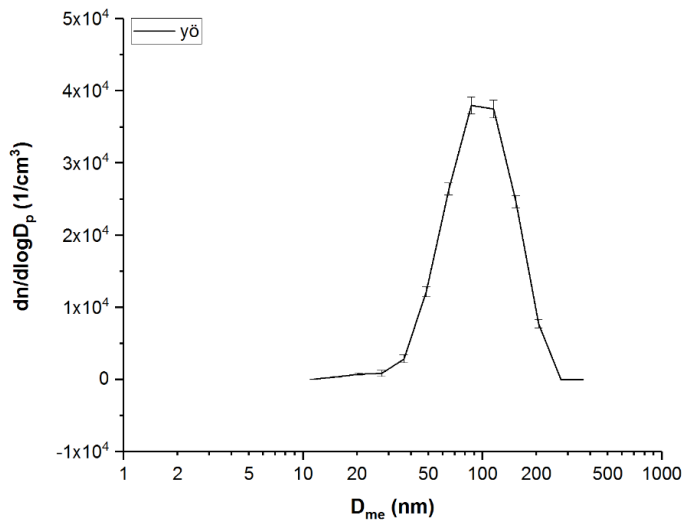
^bYlittää CPC 3007:n pitoisuusalueen ylärajan ($1 * 10^5$ $1/cm^3$)

Koska NanoScan mittasi työpisteessä vain osan päivästä, eri työskentelyjaksoilta esitetään vain FMPS:n mitaamat lukumääräkokojakaumat (Kuva 9). Ruokatunnin aikana lukumääräkokojakauma oli yksihuippuinen ja hiukkasten GMD noin 50 nm. Kaikista työvaiheista (hitsaus, kulmahiomakoneella hionta, teräsharjalla hionta, ja kaasupolttimen käyttö muodostui runsaasti pieniä, alle 50 nm:n hiukkasia, jolloin lukumääräkokojakauma muuttui monihuippuiseksi. Erityisesti kulmahiomakoneen käyttö tuotti paljon aivan pienempiä hiukkasia, mikä voi osaltaan selittää sitä, että DiSCmini ja CPC 3007 mittasivat hiontajaksojen aikana välillä pienempiä lukumääräpitoisuuksia kuin CPC 3775 ja FMPS (Taulukko 5). DiSCmini:n ja CPC 3007:n mittausalueen alaraja on 10 nm, joten ne eivät havaitse kaikkein pienimpiä hiukkasia. CPC 3007:n osalta myös pitoisuusalueen yläraja ($1 * 10^5$ $1/cm^3$) ylittyi kulmahiomakoneella työskentelyn aikana.



Kuva 9. Konepajassa 2 FMPS:lla työpisteestä mitatut keskimääräiset lukumääräkokojakaumat keskihajontoineen työskentelyjaksojen 1-3 ja ruokatunnin aikana **a)** ensimmäisenä mittauspäivänä, **b)** toisena mittauspäivänä, **c)** kolmantena mittauspäivänä. Punaisella on merkitty kuviin b) ja c) muista poikkeavat y-akselin skaalat.

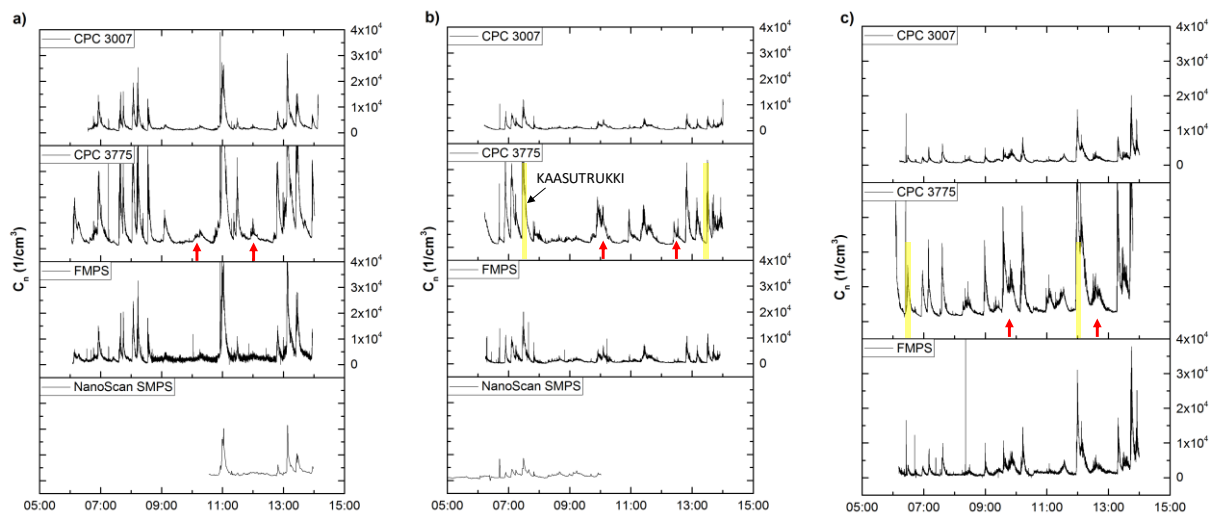
NanoScan SMPS:n mittaama keskimääräinen lukumääräkokojakauma työpisteessä toisena mittauspäivänä ennen toiminnan alkamista (klo 4:00-5:30) on esitetty kuvassa 10. Ennen toiminnan alkamista lukumääräkokojakauma oli yksihiippuinen ja hiukkasten geometrinen keskikoko (GMD) noin 94 nm (1.5).



Kuva 10. Konepajassa 2 NanoScan SMPS:lla työpisteestä mitattu keskimääräinen lukumääräkokojakauma keskihajontoineen toisena mittauspäivänä ennen toiminnan alkamista (klo 4:00-5:30).

Kalustetehdas:

Lukumääräpitoisuudet työpisteessä olivat melko pieniä ja suurimmat pitoisuuspiikit aiheutuivat mittauspisteen lähellä liikkuneista kaasutrukeista (Kuva 11, kuvaan on keltaisilla palkeilla merkitty muutama kaasutrukeista aiheutunut piikki). Työntekijän työskentely Multiax II -koneella (punaiset nuolet kuvassa 11) kuitenkin näkyi lukumääräpitoisuuden nousuna myös työpisteessä. CPC 3775:n edessä käytettiin välillä esierotinta. Esierotinten käyttö ei juurikaan vaikuttanut mitattuihin lukumääräpitoisuuksiin. CPC 3775 antoi korkeampia lukumääräpitoisuusarvoja kuin muut laitteet, riippumatta siitä oliko esierotin käytössä vai ei. NanoScan SMPS mittasi työpisteessä ensimmäisenä mittauspäivänä iltapäivällä ja toisena mittauspäivänä aamupäivällä.



Kuva 11. Lukumääräpitoisuuden (C_n) aikasarjat kalustetehtaalla työpisteessä **a)** ensimmäisenä ja **b)** toisena mitauspäivänä mitattuna CPC 3007:lla, CPC 3775:lla, FMPS:lla, ja NanoScan SMPS:lla, ja **c)** kolmantena mitauspäivänä mitattuna CPC 3007:lla, CPC 3775:lla, ja FMPS:lla. Muutama kaasutruckien aiheuttama pitoisuuspiikki on merkitty kuviin keltaisilla palkeilla. Kuviin on lisäksi punaisilla nuolilla merkitty niiden työskentelyjaksojen keskikohdat, joilta on laskettu lukumääräpitoisuuden keskiarvot taulukkoon 6 (työskentelyjaksot 1 ja 2, aikajärjestyksessä). Y-akselin skaala on sama kaikissa kuvissa.

Lukumääräpitoisuuden keskiarvo hengitysvyöhykkeellä vaihteli runsaasti eri mitauspäivien välillä. Ensimmäisenä mitauspäivänä lukumääräpitoisuuden keskiarvo oli $(11 \pm 21) \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$ ja keskimääräinen hiukkaskoko $46 \pm 26 \text{ nm}$. Toisena mitauspäivänä lukumääräpitoisuuden keskiarvo oli huomattavasti pienempi, $(2 \pm 2) \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$, ja keskimääräinen hiukkaskoko $65 \pm 32 \text{ nm}$. Kolmantena mitauspäivänä lukumääräpitoisuuden keskiarvo oli $(5 \pm 13) \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$ ja hiukkaskoko $52 \pm 30 \text{ nm}$. Lukumääräpitoisuus työntekijän hengitysvyöhykkeellä oli suurin Multiax II -koneella työskentelyn aikana ensimmäisenä ja kolmantena mitauspäivänä. Toisena mitauspäivänä Multiax II -koneella työskentely ei jostain syystä erottunut yhtä selvästi.

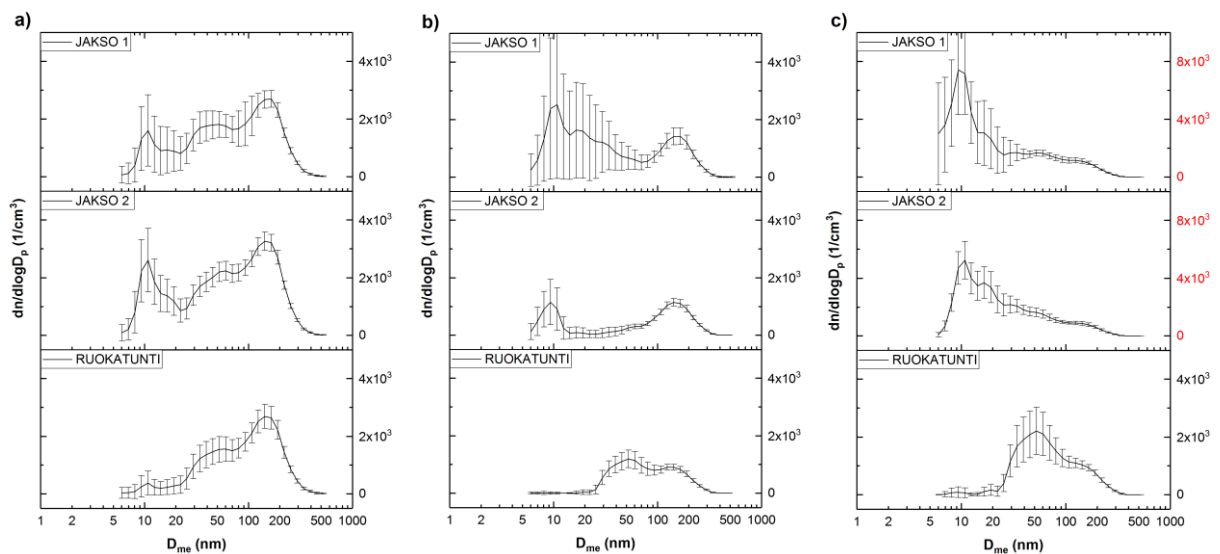
Taulukkoon 6 on koottu hiukkasten lukumääräpitoisuuksien keskiarvot keskihajontoineen kuvaan 11 merkittyjen työskentelyjaksojen 1 ja 2 aikana kunakin mitauspäivänä työpisteessä ja hengitysvyöhykkeellä. CPC 3775:n tuloksista lasketut lukumääräpitoisuuden keskiarvot työpisteessä Multiax II -koneella työskentelyn aikana olivat noin $4 \cdot 10^3$ – $11 \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$. Hengitysvyöhykkeellä lukumääräpitoisuuden keskiarvot Multiax II -koneella työskentelyn aikana olivat $6 \cdot 10^3$ – $27 \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$ ensimmäisenä ja kolmantena mitauspäivänä. Toisena mitauspäivänä lukumääräpitoisuus hengitysvyöhykkeellä Multiax II -koneella työskentelyn aikana oli jostain syystä matalampi kuin työpisteessä. Enimmillään keskimääräinen lukumääräpitoisuus Multiax II -koneella työskentelyn aikana oli hengitysvyöhykkeellä noin kuusi kertaa suurempi kuin työpisteessä. Korkeimmat hetkelliset CPC 3775:lla mitatut lukumääräpitoisuudet työpisteessä olivat noin $85 \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$ ja ne aiheutuivat kaasutruckeista. Korkeimmat hetkelliset lukumääräpitoisuudet hengitysvyöhykkeellä olivat noin $730 \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$.

Taulukko 6. Hiukkasten lukumääräpitoisuuden (C_n) keskiarvot keskihajontoineen ($ka \pm SD$) hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä kunakin mittauspäivänä kuvaan 11 merkittyjen työskentelyjaksojen 1 ja 2 aikana. Työskentelyjaksojen pituudet olivat 15-29 min.

| Mittauspäivä/jakso | Hiukkasten lukumääräpitoisuus ($1/cm^3$), $ka \pm SD$ | | | |
|--|---|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | H1 | Työpiste | | |
| | DiSCmini | CPC 3775 | CPC 3007 | FMPS |
| 1/jakso 1 (hionta Multiax II -koneella) | $(27 \pm 56) \cdot 10^3$ | $(4.6 \pm 1.0) \cdot 10^3$ | $(1.8 \pm 0.4) \cdot 10^3$ | $(2.6 \pm 0.6) \cdot 10^3$ |
| 1/jakso 2 (hionta Multiax II -koneella) | $(19 \pm 32) \cdot 10^3$ | $(5.8 \pm 1.1) \cdot 10^3$ | $(2.0 \pm 0.2) \cdot 10^3$ | $(3.2 \pm 0.5) \cdot 10^3$ |
| 2/jakso 1 (hionta Multiax II -koneella) | $(2.7 \pm 0.9) \cdot 10^3$ | $(5.7 \pm 3.5) \cdot 10^3$ | $(1.7 \pm 0.7) \cdot 10^3$ | $(2.0 \pm 1.1) \cdot 10^3$ |
| 2/jakso 2 (hionta Multiax II -koneella) | $(1.7 \pm 2.1) \cdot 10^3$ | $(4.1 \pm 1.4) \cdot 10^{3,a}$ | $(0.9 \pm 0.2) \cdot 10^3$ | $(0.8 \pm 0.3) \cdot 10^3$ |
| 3/jakso 1 (hionta Multiax II -koneella) | $(24 \pm 38) \cdot 10^3$ | $(11 \pm 3.8) \cdot 10^{3,a}$ | $(2.7 \pm 0.6) \cdot 10^3$ | $(3.9 \pm 1.3) \cdot 10^3$ |
| 3/jakso 2 (hionta Multiax II -koneella) | $(5.8 \pm 4.4) \cdot 10^3$ | $(8.2 \pm 1.3) \cdot 10^3$ | $(2.3 \pm 0.3) \cdot 10^3$ | $(3.2 \pm 0.7) \cdot 10^3$ |

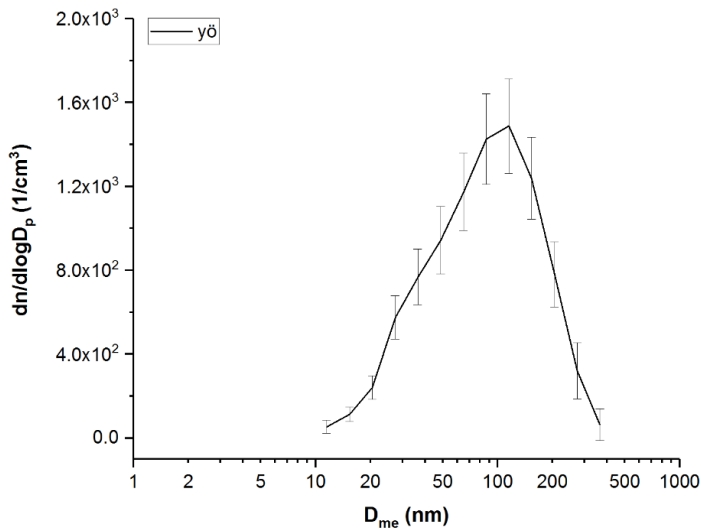
^aCPC 3775:n edessä käytettiin esierotinta

FMPS:n mitaamat lukumääräkokojakaumat työpisteessä työskentelyjaksojen 1 ja 2 sekä ruokatunnin aikana kunakin mittauspäivänä on esitetty kuvassa 12. Ruokatunnin aikana lukumääräkokojakauma työpisteessä oli kaksihuippuinen, moodit noin 50 nm:n ja 150 nm:n kohdalla. Multiax II -koneella työskentelyn aikana muodostui runsaasti pieniä, alle 50 nm:n hiukkasia, jotka näkyivät myös työpisteessä mitatussa lukumääräkokojakaumassa.



Kuva 12. FMPS:lla työpisteestä mitatut keskimääräiset lukumääräkokojakaumat keskihajontoineen työskentelyjaksojen 1 ja 2 sekä ruokatunnin aikana **a)** ensimmäisenä mittauspäivänä, **b)** toisena mittauspäivänä, **c)** kolmantena mittauspäivänä. Kuvaan c) on punaisella merkitty muista poikkeavat y-akselin skaalat.

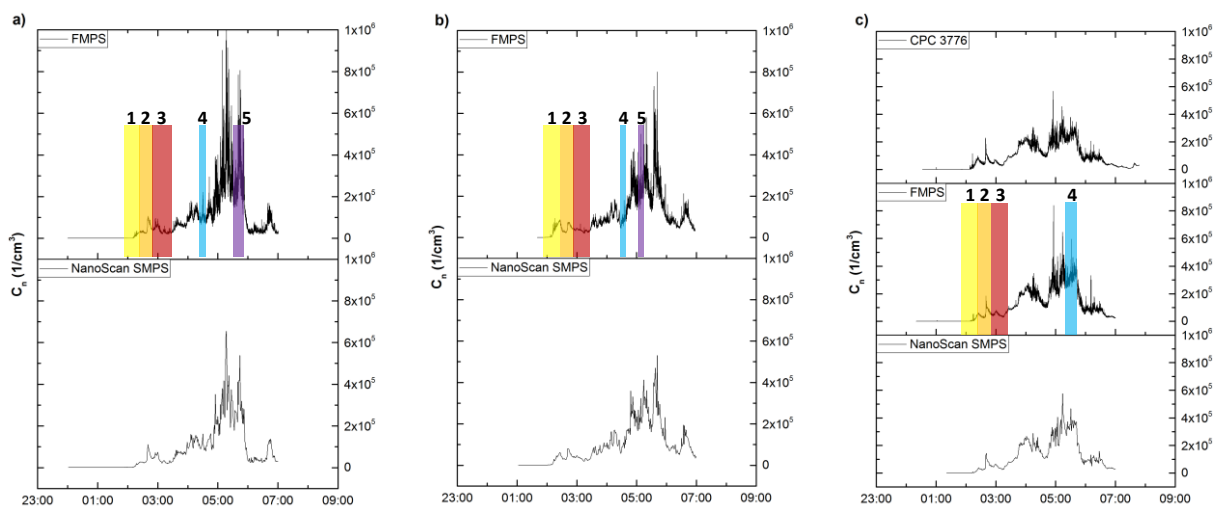
NanoScan SMPS mittasi työpisteessä toisen mittauspäivän vastaisen yön. Sen mitaama keskimääräinen lukumääräkokojakauma keskihajontoineen ennen toiminnan alkamista (klo 4:00-5:30) on esitetty kuvassa 13. Hiukkasten geometrinen keskihalkaisija (Geometric Mean Diameter, GMD) oli 82 nm (2.0).



Kuva 13. NanoScan SMPS:lla kalustetehtaassa työpisteestä mitattu keskimääräinen lukumääräkokojakauma keskihajontoineen toisena mittauspäivänä ennen toiminnan alkamista (klo 4:00-5:30).

Leipomo:

CPC 3775 mittasi työpisteessä kahtena ensimmäisenä mittausyönä, CPC 3776 kolmantena mittausyönä. CPC 3775:n virtausten kanssa oli leipomossa ongelmia, joten sen aikasarjoja ei ole piirretty kuvaan 14, ja tulokset on laskettu vain siltä ajalta, jolta data oli luotettavaa. Korkeimmat hetkelliset lukumääräpitoisuudet työpisteessä, noin 900×10^3 $1/cm^3$, mitattiin FMPS:lla ensimmäisenä yönä, kun kaikki paistamistoiminnot (pinnavaunu- ja arinauuneissa paistaminen, munkinpaisto) olivat käynnissä yhtä aikaa (Kuva 14a). Toisena ja kolmantena mittausyönä korkeimmat hetkelliset lukumääräpitoisuudet olivat hieman pienempiä.



Kuva 14. Lukumääräpitoisuuden (C_n) aikasarjat työpisteessä **a)** ensimmäisenä ja **b)** toisena mittausyönä mitattuna FMPS:lla ja NanoScan SMPS:lla, ja **c)** kolmantena mittausyönä mitattuna CPC 3776:lla, FMPS:lla, ja NanoScan SMPS:lla. Kuviin merkitty ne työskentelyjaksot, joilta on laskettu lukumääräpitoisuuden keskiarvot taulukkoon 7 (työskentelyjaksot 1-5 tai 1-4, aikajärjestyksessä).

DiSCmini:lla mitattu lukumääräpitoisuuden keskiarvo taikinantekijän hengitysvyöhykkeellä ensimmäisenä mittausyönä oli $(79 \pm 71) \times 10^3$ $1/cm^3$ ja keskimääräinen hiukkaskoko 101 ± 62 nm. Toisena mittausyönä lukumääräpitoisuuden keskiarvo oli $(90 \pm 92) \times 10^3$ $1/cm^3$ ja keskimääräinen hiukkaskoko 101 ± 63 nm. Lukumääräpitoisuuden keskiarvo työntekijän hengitysvyöhykkeellä oli suurin, $(109 \pm 102) \times 10^3$ $1/cm^3$, kolmantena mittausyönä. Keskimääräinen hiukkaskoko kolmantena mittausyönä oli 98 ± 56 nm.

Korkein hetkellinen lukumääräpitoisuus hengitysvyöhykkeellä, noin $1132 \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$, mitattiin toisena yönä, käsin leivonnan aikana.

Toinen DiSCmini mittasi työpisteessä. Hiukkasten lukumääräpitoisuuden keskiarvo oli ensimmäisenä mittaussyönä $(53 \pm 48) \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$, toisena mittaussyönä $(75 \pm 60) \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$ ja kolmantena mittaussyönä $(111 \pm 103) \cdot 10^3 \text{ 1/cm}^3$. Keskimääräiset hiukkaskoot olivat vastaavasti $80 \pm 36 \text{ nm}$, $80 \pm 35 \text{ nm}$ ja $71 \pm 39 \text{ nm}$. Nano hiukkasten keskimääräinen lukumääräpitoisuus oli kiinteässä pisteessä pienempi kuin työntekijän hengitysvyöhykkeellä ensimmäisenä ja toisena mittaussyönä, kolmantena mittaussyönä keskimääräiset lukumääräpitoisuudet olivat lähellä toisiaan. Keskimääräinen hiukkaskoko oli työpisteessä jokaisena mittaussyönä pienempi kuin työntekijän hengitysvyöhykkeellä.

Nano hiukkasten lukumääräpitoisuus kasvoi työvuoron edetessä sekä hengitysvyöhykkeellä että työpisteessä. Paistamistoiminnot, erityisesti leivän paistaminen arinauuneissa, joka sijoittui noin klo 4:00-6:00 välille, nostivat nano hiukkasten lukumääräpitoisuutta koko leipomotilassa.

Taulukkoon 7 on koottu hiukkasten lukumääräpitoisuuksien keskiarvot keskihajontoineen kuvaan 14 merkittyjen työskentelyjaksojen 1-5 tai 1-4 aikana kunakin mittaussyönä työpisteessä ja hengitysvyöhykkeellä. Työskentelyjaksot 1-3 olivat kaikkina öinä suunnilleen yhtä pitkiä ja niiden aikana taikinantekijä ei juurikaan osallistunut leipomon muihin töihin, vaan valmisti erilaisia taikinoita taikinante-kokoneilla. Jakso 1 ajoittui suunnilleen aikavälille klo 1:55-2:25, jakso 2 aikavälille klo 2:25-2:50 ja jakso 3 aikavälille klo 2:50-3:25. Työskentelyjaksot 4 ja 5 olivat lyhyempiä, eivätkä tapahtuneet joka yö samaan aikaan. Silloin taikinantekijä joko valmisti riisipiirakoiden kuoritaikinaa (ensimmäinen yö, jakso 4) tai kaulitsi riisipiirakoiden kuoritaikinaa (kaikki muut jaksot 4 ja 5). Lisäksi taulukossa 7 on lukumääräpitoisuuden keskiarvo heti pinnavaunu-uunien käynnistyksen jälkeen (5 min ajalta).

Lukumääräpitoisuus alkoi nousta työpisteessä heti pinnavaunu-uunien käynnistyksen jälkeen. Työpisteessä keskimääräiset lukumääräpitoisuudet olivat korkeimmat työskentelyjaksojen 4 ja 5 aikana, joihin tuen paistamistoiminnoista, jotka nostivat nano hiukkasten lukumääräpitoisuutta koko leipomotilassa.

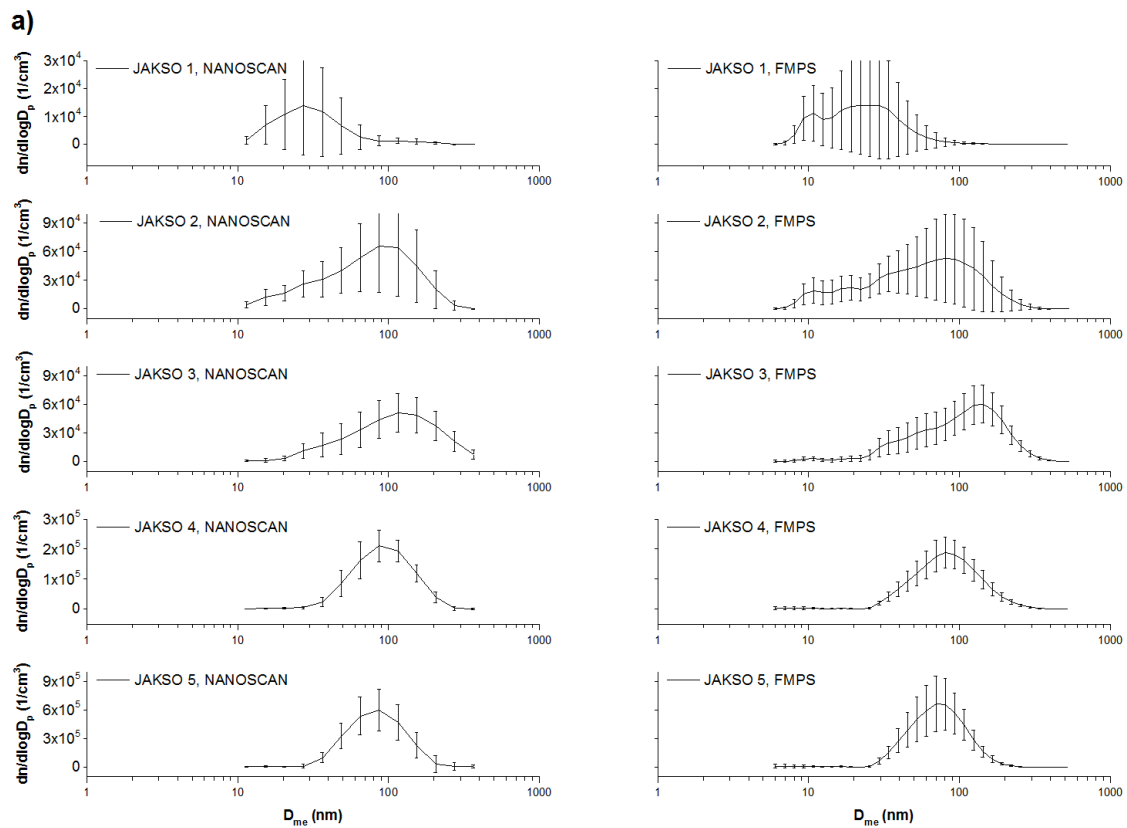
Myös työntekijän hengitysvyöhykkeellä suurimmat keskimääräiset lukumääräpitoisuudet mitattiin työskentelyjaksojen 4 ja 5 aikana. Ensimmäisen työskentelyjakson aikana, kun lukumääräpitoisuudet koko leipomotilassa olivat vielä melko matalia, nano hiukkasten lukumääräpitoisuus hengitysvyöhykkeellä oli suurempi kuin työpisteessä.

Taulukko 7. Lukumääräpitoisuuden (C_n) keskiarvot keskihajontoineen ($ka \pm SD$) hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä kunakin mittausyönä kuvaan 14 merkittyjen työskentelyjaksojen aikana. Työskentelyjaksojen pituudet olivat 8-38 min.

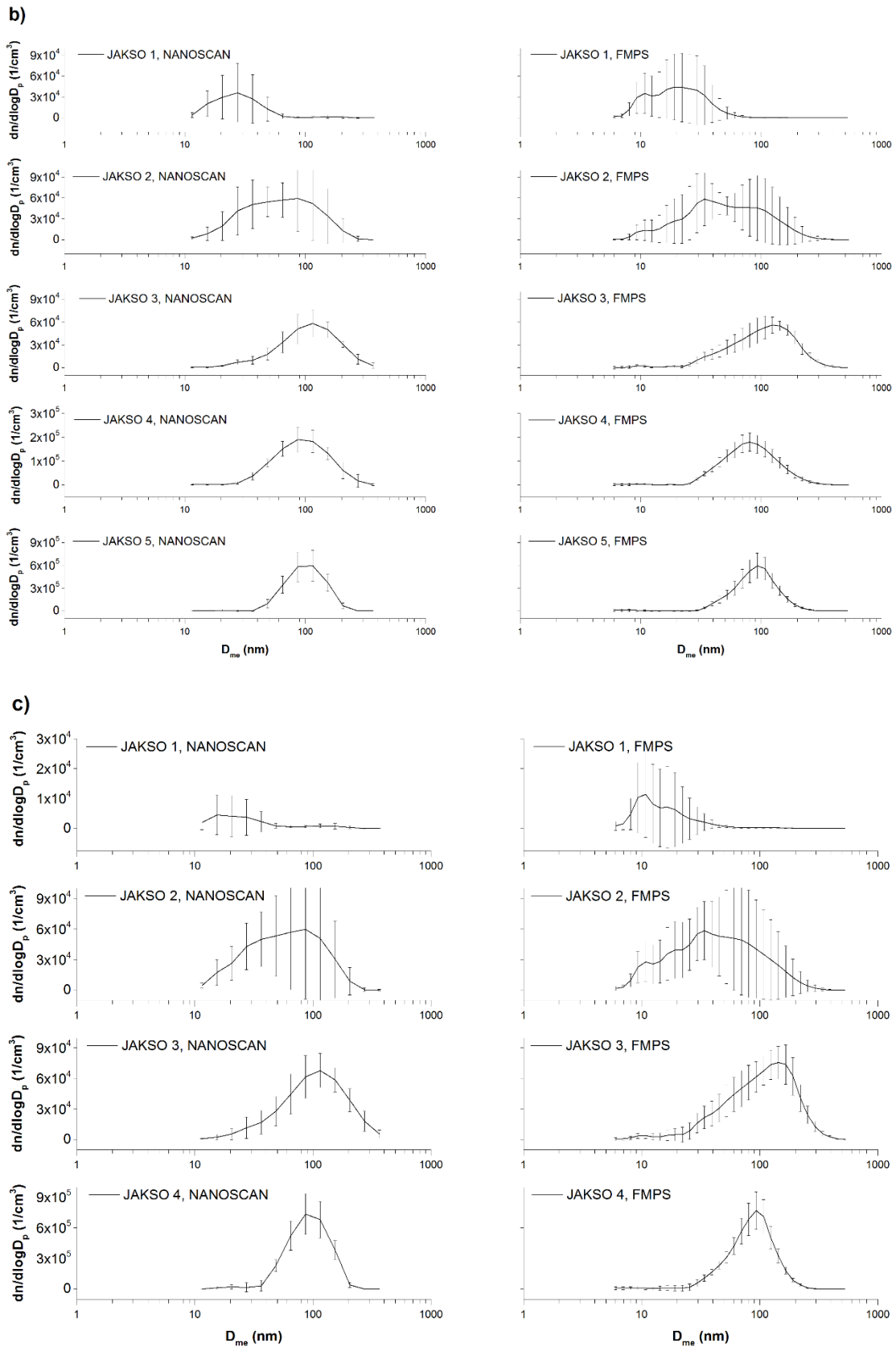
| Mittauspäivä/ jakso | Hiukkasten lukumääräpitoisuus ($1/cm^3$), $ka \pm SD$ | | | | |
|---|---|------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | HV | KP | | | |
| | DiSCmini | DiSCmini | CPC 3775 CPC 3776 | FMPS | NanoScan SMPS |
| 1/uunien käynnistys | $(7.8 \pm 36) * 10^3$ | $(1.2 \pm 0.5) * 10^3$ | $(1.2 \pm 0.6) * 10^{3,a}$ | $(0.4 \pm 0.1) * 10^3$ | $(0.7 \pm 0.1) * 10^3$ |
| 1/jakso 1 (taikinanteko) | $(52 \pm 36) * 10^3$ | $(34 \pm 19) * 10^3$ | $(12 \pm 13) * 10^{3,a}$ | $(9.4 \pm 11) * 10^3$ | $(7.3 \pm 8.4) * 10^3$ |
| 1/jakso 2 (taikinanteko) | $(47 \pm 20) * 10^3$ | $(56 \pm 29) * 10^3$ | - | $(46 \pm 23) * 10^3$ | $(48 \pm 26) * 10^3$ |
| 1/jakso 3 (taikinanteko) | $(26 \pm 14) * 10^3$ | $(40 \pm 16) * 10^3$ | - | $(39 \pm 14) * 10^3$ | $(38 \pm 16) * 10^3$ |
| 1/jakso 4 (riisipiirakoiden kuori- taikinan teko) | $(76 \pm 29) * 10^3$ | $(77 \pm 15) * 10^3$ | - | $(100 \pm 24) * 10^3$ | $(105 \pm 21) * 10^3$ |
| 1/jakso 5 (riisipiirakoiden kuori- taikinan kaulinta) | $(172 \pm 85) * 10^3$ | $(134 \pm 31) * 10^3$ | - | $(310 \pm 126) * 10^3$ | $(293 \pm 86) * 10^3$ |
| 2/uunien käynnistys | $(0.8 \pm 0.6) * 10^3$ | $(0.6 \pm 0.4) * 10^3$ | $(1.3 \pm 0.7) * 10^3$ | $(0.6 \pm 0.3) * 10^3$ | $(0.6 \pm 0.1) * 10^3$ |
| 2/jakso 1 (taikinanteko) | $(55 \pm 36) * 10^3$ | $(41 \pm 41) * 10^3$ | $(40 \pm 36) * 10^3$ | $(27 \pm 28) * 10^3$ | $(17 \pm 18) * 10^3$ |
| 2/jakso 2 (taikinanteko) | $(44 \pm 19) * 10^3$ | $(57 \pm 26) * 10^3$ | $(48 \pm 17) * 10^3$ | $(49 \pm 19) * 10^3$ | $(49 \pm 18) * 10^3$ |
| 2/jakso 3 (taikinanteko) | $(21 \pm 7.3) * 10^3$ | $(34 \pm 9.2) * 10^3$ | $(31 \pm 6.3) * 10^3$ | $(36 \pm 6.1) * 10^3$ | $(35 \pm 7.6) * 10^3$ |
| 2/jakso 4 (riisipiirakoiden kuori- taikinan kaulinta) | $(105 \pm 69) * 10^3$ | $(77 \pm 15) * 10^3$ | - | $(98 \pm 21) * 10^3$ | $(110 \pm 19) * 10^3$ |
| 2/jakso 5 (riisipiirakoiden kuori- taikinan kaulinta) | $(162 \pm 87) * 10^3$ | $(139 \pm 25) * 10^3$ | - | $(246 \pm 63) * 10^3$ | $(260 \pm 77) * 10^3$ |
| 3/uunien käynnistys | $(3.4 \pm 8.0) * 10^3$ | $(0.7 \pm 0.5) * 10^3$ | $(1.2 \pm 0.7) * 10^3$ | $(0.59 \pm 0.21) * 10^3$ | $(0.47 \pm 0.14) * 10^3$ |
| 3/jakso 1 (taikinanteko) | $(18 \pm 23) * 10^3$ | $(11 \pm 13) * 10^3$ | $(11 \pm 15) * 10^3$ | $(4.6 \pm 6.8) * 10^3$ | $(2.6 \pm 3.2) * 10^3$ |
| 3/jakso 2 (taikinanteko) | $(53 \pm 23) * 10^3$ | $(76 \pm 41) * 10^3$ | $(68 \pm 28) * 10^3$ | $(55 \pm 26) * 10^3$ | $(50 \pm 33) * 10^3$ |
| 3/jakso 3 (taikinanteko) | $(31 \pm 14) * 10^3$ | $(49 \pm 18) * 10^3$ | $(48 \pm 12) * 10^3$ | $(51 \pm 11) * 10^3$ | $(45 \pm 11) * 10^3$ |
| 3/jakso 4 (riisipiirakoiden kuori- taikinan kaulinta) | $(262 \pm 95) * 10^3$ | $(279 \pm 44) * 10^3$ | $(258 \pm 39) * 10^3$ | $(331 \pm 59) * 10^3$ | $(334 \pm 68) * 10^3$ |

^aCPC 3775:n edessä käytettiin esierotinta

FMPS:n ja NanoScan SMPS:n mitaamat nanohiukkasten keskimääräiset lukumääräkokojakaumat keskihajontoineen työpisteessä kuvaan 14 merkittyjen työskentelyjaksojen 1-5 tai 1-4 aikana on esitetty kuvassa 15. Työskentelyjakson 1 aikana lukumääräpitoisuus kiinteässä pisteessä oli vielä matala, varsinkin ensimmäisenä ja kolmantena mittausyönä. Ensimmäisen työskentelyjakson aikana uuneista peräisin olevat pienet hiukkaset näkyivät selvästi lukumääräkokojakaumissa. NanoScan SMPS:n jakaumista määritetyt hiukkasten GMD:t ensimmäisen työskentelyjakson aikana kunakin yönä olivat 43 nm (2.0), 34 nm (1.9), ja 42 nm (2.1). Toisen työskentelyjakson aikana hajonta oli suurta ja hiukkasten GMD oli noin 50-70 nm (1.6-1.9). Kolmannen työskentelyjakson aikana tuotteiden leipominen leivontapöydillä oli alkanut. Hiukkasten GMD oli noin 100-110 nm (1.8-1.9). Neljännen ja varsinkin viidennen työskentelyjakson aikana lukumääräpitoisuus leipomossa oli jo korkea, kun kaikki paistamistoiminnot olivat käynnissä. Hiukkasten GMD oli neljännen ja viidennen työskentelyjakson aikana kiinteässä pisteessä 80-100 nm (1.5-1.6).

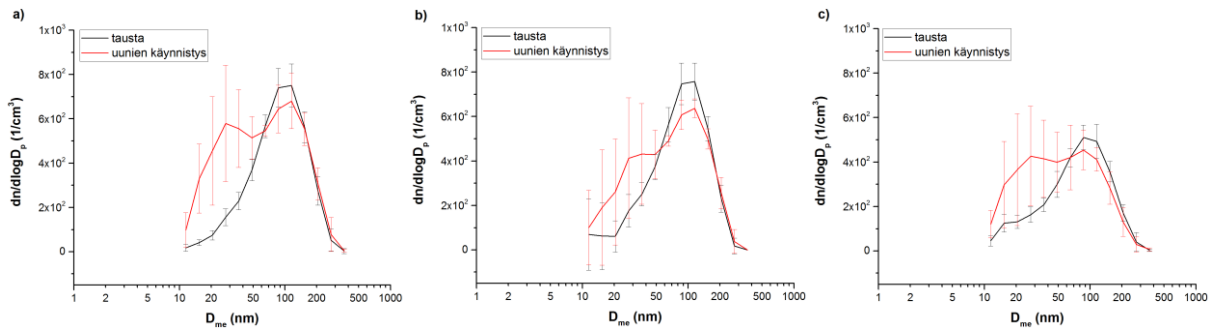


Kuva 15. FMPS:lla ja NanoScan SMPS:lla leipomossa työpisteestä mitatut keskimääräiset lukumääräkokojakaumat keskihajontoineen kuvaan 14 merkittyjen työskentelyjaksojen 1-5 tai 1-4 aikana **a)** ensimmäisenä mittausyönä, **b)** toisena mittausyönä, ja **c)** kolmantena mittausyönä. **Kuva jatkuu seuraavalla sivulla.**



Kuva 15 (jatkuu). FMPS:lla ja NanoScan SMPS:lla leipomossa työpisteestä mitatut keskimääräiset lukumääräkojakaumat keskihajontoineen kuvaan 14 merkittyjen työskentelyjaksojen 1-5 tai 1-4 aikana **a)** ensimmäisenä mittausyönä, **b)** toisena mittausyönä, ja **c)** kolmantena mittausyönä.

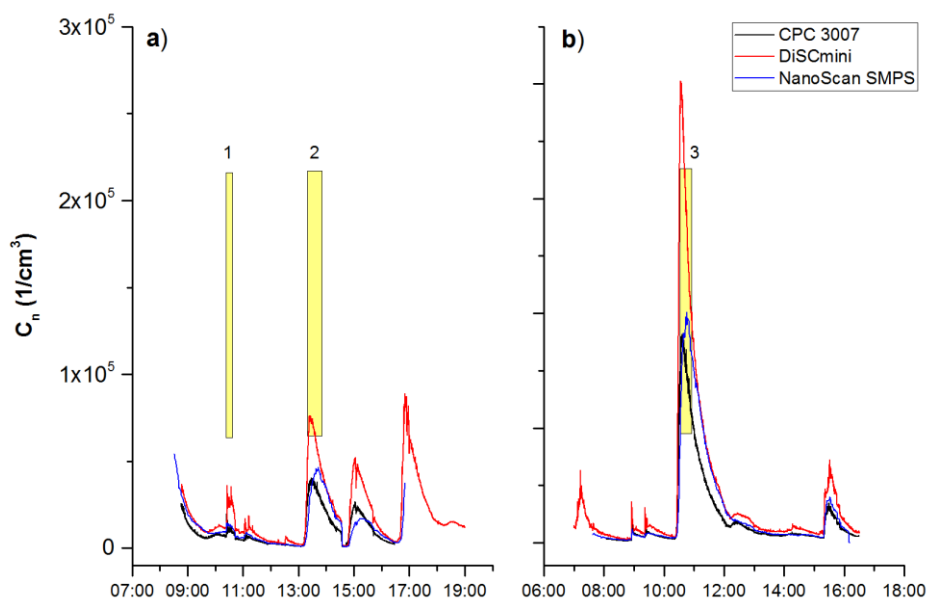
NanoScan SMPS:n mitaama keskimääräinen lukumääräkokojakauma keskihajontoineen ennen toiminnan alkamista kunakin yönä on esitetty kuvassa 16. Hiukkasten GMD ennen toiminnan alkamista kunakin mittausyönä oli 85 nm (1.8), 81 nm (1.8), ja 72 nm (2.0), tässä järjestyksessä. Samaan kuvaan taustajakauman kanssa on piirretty keskimääräinen lukumääräkokojakauma viiden minuutin ajanjaksoilta pinnavaunu-uunien käynnistyksen jälkeen. Välittömästi uunien käynnistyttyä leipomon ilmassa havaittiin hyvin pieniä hiukkasia ja lukumääräkokojakauma muuttui kaksihuippuiseksi.



Kuva 16. NanoScan SMPS:lla leipomossa työpisteestä mitattu keskimääräinen lukumääräkokojakauma keskihajontoineen ennen toiminnan alkamista (klo 1:00-1:30, vähintään 10 min ajalta), ja pinnavaunu-uunien käynnistyksen jälkeen (5 min ajalta) **a)** ensimmäisenä mittausyönä, **b)** toisena mittausyönä, ja **c)** kolmantena mittausyönä.

Kampaamo:

Kampaamossa eri työvaiheet näkyivät hiukkasten lukumääräpitoisuudessa selvästi työpisteessä (Kuva 17). CPC 3007:n ja NanoScan SMPS:n mitaamat lukumääräpitoisuudet vastasivat melko hyvin toisiaan. DiSCmini antoi suurempia lukumääräpitoisuusarvoja kuin kaksi muuta laitetta. Hengitysvyöhykkeeltä toisella DiSCmini:lla mitattu nanohiukkasten lukumääräpitoisuuden keskiarvo mittauspäivien aikana oli $14 \cdot 10^3$ – $15 \cdot 10^3$ $1/\text{cm}^3$ ja keskimääräinen hiukkaskoko (D_p) noin 50–70 nm. Keskimääräinen hiukkaskoko oli pienempi ensimmäisenä mittauspäivänä.



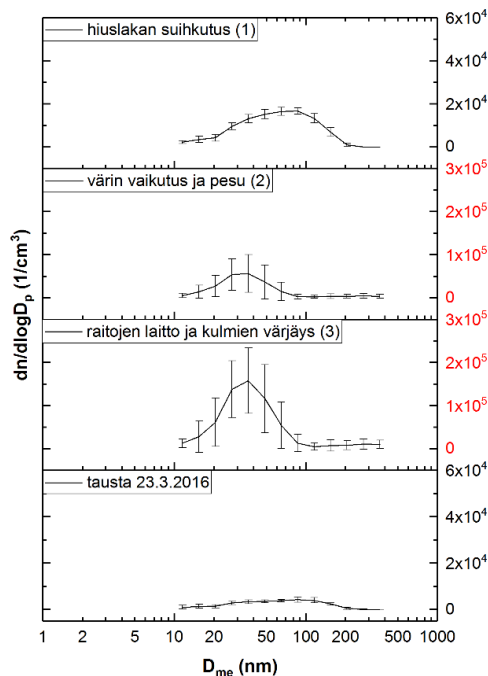
Kuva 17. Hiukkasten lukumääräpitoisuuden (C_n) aikasarjat kampaamossa työpisteessä mitattuna kolmella eri mittalaitteella (CPC 3007, NanoScan SMPS, DiSCmini) **a)** ensimmäisenä mittauspäivänä, **b)** toisena mittauspäivänä. Työskentelyjaksot 1-3 (1 = hiuslakan suihkutusta, 2 = värin vaikutus ja pesu, 3 = raitojen laitto ja kulmien värjäys) on merkitty kuvaan keltaisilla palkeilla.

Taulukkoon 8 on koottu hiukkasten lukumääräpitoisuuksien keskiarvot keskihajontoineen kuvaan 17 merkittyjen työskentelyjaksojen 1-3 aikana työpisteessä ja hengitysvyöhykkeellä. Työntekijän hengitysvyöhykkeeltä mitattu lukumääräpitoisuus oli korkein hiusten raidoituksen aikana työskentelyjaksolla 3. Lukumääräpitoisuus hengitysvyöhykkeellä oli pääsääntöisesti samalla tasolla CPC 3007:n kiinteästä pisteestä mitaamaan pitoisuuden kanssa, vain työskentelyjakson 1 (hiuslakan suihkutusta) aikana hengitysvyöhykkeeltä mitattu pitoisuus oli noin neljä kertaa suurempi. Verrattaessa kahta DiSCmini:a, hengitysvyöhykkeeltä mitatut lukumääräpitoisuudet olivat kiinteästä pisteestä mitattuja pitoisuuksia pienempiä työskentelyjaksojen 2 ja 3 aikana. Lukumääräpitoisuuden keskiarvot työskentelyjaksojen aikana hengitysvyöhykkeellä olivat noin 2–5 kertaa suurempia kuin koko työpäivän ajalle lasketut keskiarvot.

Taulukko 8. Hiukkasten lukumääräpitoisuuden (C_n) keskiarvot keskihajontoineen ($ka \pm SD$) hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä kuvaan 17 merkittyjen työskentelyjaksojen 1-3 aikana (1 = hiuslakan suihkutusta, 2 = värin vaikutus ja pesu, 3 = raitojen laitto ja kulmien värjäys).

| Mittauspäivä/ jakso | C_n ($1/cm^3$), $ka \pm SD$ | | | |
|------------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | HV | KP | | |
| | DiSCmini | DiSCmini | CPC 3007 | NanoScan SMPS |
| 1/jakso 1 | $(37 \pm 71) * 10^3$ | $(24 \pm 6.3) * 10^3$ | $(10 \pm 2.3) * 10^3$ | $(13 \pm 1.3) * 10^3$ |
| 1/jakso 2 | $(28 \pm 14) * 10^3$ | $(50 \pm 24) * 10^3$ | $(28 \pm 12) * 10^3$ | $(29 \pm 17) * 10^3$ |
| 2/jakso 3 | $(68 \pm 14) * 10^3$ | $(141 \pm 38) * 10^3$ | $(70 \pm 13) * 10^3$ | $(79 \pm 21) * 10^3$ |

Väri- ja vaalennusaineista vapautui ilmaan yhdisteitä, joista muodostui paljon pieniä hiukkasia (Kuva 18). Työskentelyjaksoilla 2 ja 3 hiukkasten GMD työpisteessä oli 36 nm (1.9) ja 38 nm (1.8). Hiuslakan suihkutuksessa vapautuneet hiukkaset (työskentelyjakso 1) olivat suurempia, GMD oli 57 nm (1.9). Toisen mittauspäivän iltapäivällä olleen pitkän tauon aikana hiukkasten GMD oli noin 57 nm (2.0).



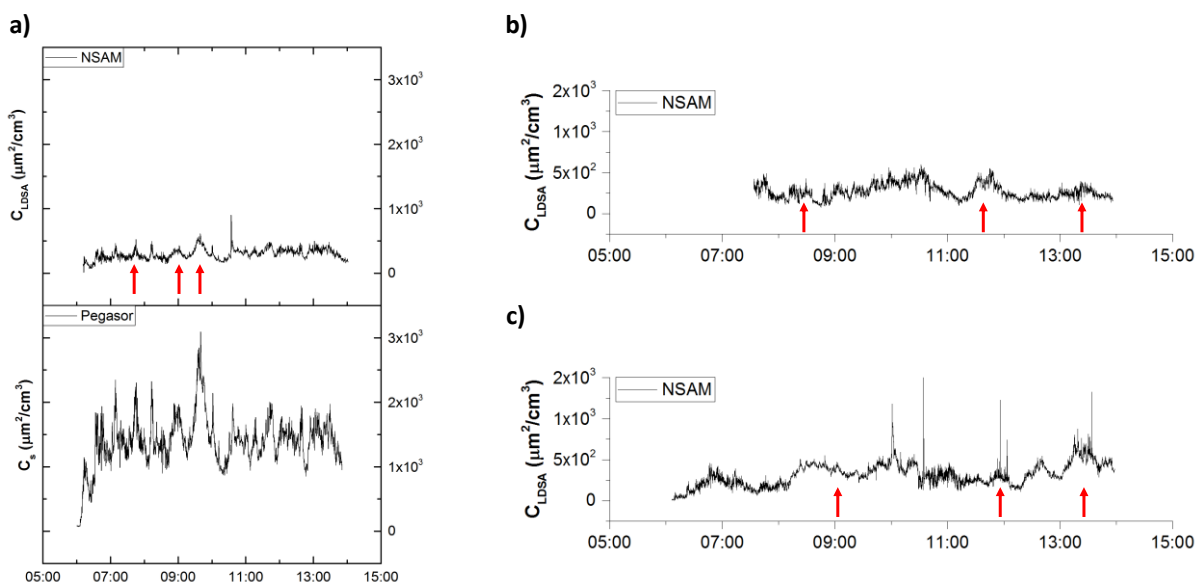
Kuva 18. NanoScan SMPS:llä kampaamossa työpisteestä mitattu hiukkasten lukumääräkokojakauman keskiarvo keskihajontoineen työskentelyjaksojen 1-3 (1 = hiuslakan suihkutusta, 2 = värin vaikutus ja pesu, 3 = raitojen laitto ja kulmien värjäys) ja toisen mittauspäivän iltapäivällä olleen pitkän tauon aikana (tausta). Punaisella on merkitty y-akselin poikkeava asteikko.

2.3 Pinta-alapitoisuudet

Työpisteessä keuhkojen alveolialueelle teoreettisesti deponoituvien hiukkasten pinta-alapitoisuutta (C_{LDSA}) mitattiin NSAM:lla ja kokonaispinta-alapitoisuutta (C_s) Pegasor AQTM Indoor -laitteella. NSAM:n edessä käytettiin välillä esierotinta. Hengitysvyöhykkeeltä C_s - ja C_{LDSA} -pitoisuuksia monitoroitiin DiSCmini- ja PartectorTEM-nanohiukkasmonitoreilla. PartectorTEM:n edessä käytettiin välillä SMPS:n impaktoria. Konepajassa 2 PartectorTEM ei ollut mukana. Kunkin työpaikan tulokset on esitetty erikseen alla. Työskentelyjaksojen aikana mitatut keskimääräiset pinta-alapitoisuudet työntekijän hengitysvyöhykkeellä olivat suurimpia konepajassa 2 ja leipomossa kaikkien paistamistoimintojen ollessa käynnissä yhtä aikaa.

Konepaja 1:

Pinta-alapitoisuuksien aikasarjoissa käsin hionta ei erottunut yhtä selvästi kuin lukumääräpitoisuuden aikasarjoissa sen enempää työpisteessä (Kuva 19) kuin hengitysvyöhykkeelläkään. Hengitysvyöhykkeellä DiSCmini-nanohiukkasmonitorin mittaustuloksista koko työpäivän ajalle (lounastauko vähennetty) lasketut keskiarvopitoisuudet ensimmäisenä mittauspäivänä olivat C_s (3019 ± 1538) $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja C_{LDSA} (263 ± 148) $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Toisena mittauspäivänä vastaavat arvot olivat C_s (1067 ± 755) $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja C_{LDSA} (126 ± 61) $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, ja kolmantena mittauspäivänä C_s (805 ± 1359) $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja C_{LDSA} (119 ± 224) $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. PartectorTEM:n mittaustuloksista koko työpäivän ajalle (lounastauko vähennetty) lasketut C_{LDSA} keskiarvot mittauspäiville 1-3 olivat (263 ± 146) $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, (182 ± 81) $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, ja (319 ± 1212) $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, tässä järjestyksessä. Esierottimen ja SMPS:n impaktorin käytöllä ei ollut vaikutusta NSAM:lla ja PartectorTEM:lla mitattuihin pitoisuuksiin. Pegasor AQTM Indoor mittasi työpisteessä vain ensimmäisenä mittauspäivänä.



Kuva 19. Kokonaispinta-alapitoisuuden (C_s) ja/tai teoreettisesti keuhkojen alveolialueelle deponoituvien hiukkasten pinta-alapitoisuuden (C_{LDSA}) aikasarjat konepajassa 1 työpisteessä **a)** ensimmäisenä mittauspäivänä mitattuna NSAM:lla ja Pegasor AQTM Indoor -laitteella, **b)** toisena mittauspäivänä mitattuna NSAM:lla, ja **c)** kolmantena mittauspäivänä mitattuna NSAM:lla. Kuviin on punaisilla nuolilla merkitty niiden työskentelyjaksojen keskikohdat, joilta on laskettu pinta-alapitoisuuden keskiarvot taulukkoon 9 (työskentelyjaksot 1-3, aikajärjestyksessä).

Taulukkoon 9 on koottu hiukkasten pinta-alapitoisuuksien keskiarvot keskihajontoineen kuvaan 19 merkittyjen työskentelyjaksojen 1-3 aikana kunakin mittauspäivänä työpisteessä ja hengitysvyöhykkeellä. Toisin kuin lukumääräpitoisuudet, pinta-alapitoisuudet olivat yleensä suurempia työstökoneella

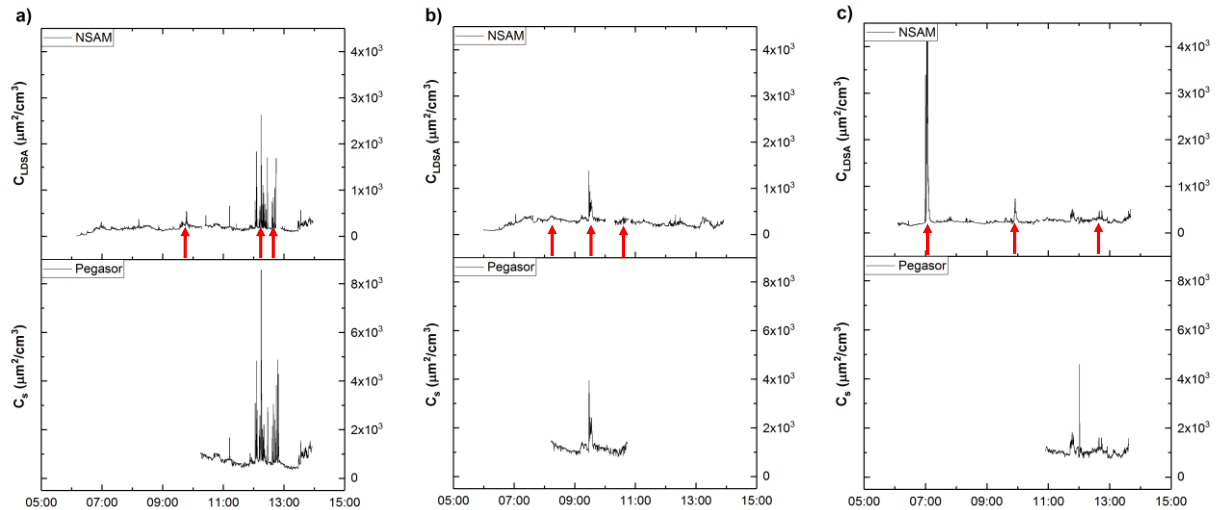
työskentelyn aikana kuin käsin hionnan aikana. Käsin hionnan aikana keskimääräinen C_s hengitysvyöhykkeellä vaihteli välillä noin 300–3500 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, ja keskimääräinen C_{LDSA} välillä noin 80–380 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ (DiSCmini) ja välillä noin 180–580 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ (PartectorTEM). Vastaavasti työstökoneella työskentelyn aikana keskimääräinen C_s vaihteli välillä noin 1400–2200 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, ja keskimääräinen C_{LDSA} välillä noin 160–570 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ (DiSCmini) ja välillä noin 200–580 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ (PartectorTEM).

Taulukko 9. Hiukkasten kokonaispinta-alapitoisuuden (C_s) ja keuhkojen alveolialueelle teoreettisesti deponoituvien hiukkasten pinta-alapitoisuuden (C_{LDSA}) keskiarvot keskihajontoineen ($ka\pm SD$) hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä kunakin mittauspäivänä kuvaan 19 merkittyjen työskentelyjaksojen 1-3 aikana. Työskentelyjaksojen pituudet olivat 6-34 min.

| Mittauspäivä/jakso <i>suure</i> | Hiukkasten pinta-alapitoisuus ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$), $ka\pm SD$ | | | | |
|---|---|-----------|--------------|------------|---------------------------------|
| | HV | | | Työpiste | |
| | DiSCmini | | PartectorTEM | NSAM | Pegasor AQ TM Indoor |
| | C_{LDSA} | C_s | C_{LDSA} | C_{LDSA} | C_s |
| 1/jakso 1 (käsin hionta) | 305±112 | 2189±838 | 229±113 | 351±65 | 1832±260 |
| 1/jakso 2 (käsin hionta) | 384±61 | 3484±931 | 354±45 | 332±32 | 1730±127 |
| 1/jakso 3 (työstökoneella työskentely) | 565±143 | 6451±1249 | 583±250 | 488±48 | 2516±238 |
| 2/jakso 1 (käsin hionta) | 158±62 | 717±226 | 204±78 | 248±55 | - |
| 2/jakso 2 (työstökoneella työskentely) | 158±73 | 1589±913 | 198±91 | 334±104 | - |
| 2/jakso 3 (käsin hionta) | 130±28 | 985±203 | 177±33 | 282±51 | - |
| 3/jakso 1 (työstökoneella työskentely) | 170±47 | 1395±400 | 350±92 | 356±45 | - |
| 3/jakso 2 (käsin hionta) | 75±27 | 294±79 | 187±65 | 302±97 | - |
| 3/jakso 3 (käsin hionta) | 160±27 | 842±101 | 584±98 | 601±93 | - |

Konepaja 2:

Konepajassa 2 työskentelyjaksot erottuivat hieman paremmin myös pinta-alapitoisuuksien aikasarjoista (Kuva 20). Pegasor AQTM Indoor mittasi työpisteessä ensimmäisenä ja kolmantena mittauspäivänä iltapäivällä, toisena mittauspäivänä aamupäivällä. NSAM:n edessä käytettiin välillä esierotinta. Esierottimen käytöllä ei ollut vaikutusta pitoisuuksiin. Hengitysvyöhykkeeltä koko työpäivän ajalle (tauot vähennetty) lasketut keskiarvopitoisuudet ensimmäisenä mittauspäivänä olivat C_s (1149±2879) $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja C_{LDSA} (289±844) $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Toisena mittauspäivänä vastaavat arvot olivat C_s (1919±3746) $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja C_{LDSA} (446±1005) $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, ja kolmantena mittauspäivänä C_s (1521±2785) $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja C_{LDSA} (299±741) $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$.



Kuva 20. Keuhkojen alveolialueelle teoreettisesti deponoituvien hiukkasten pinta-alapitoisuuden (C_{LDSA}) ja kokonaispinta-alapitoisuuden (C_S) aikasarjat konepajassa 2 työpisteessä mitattuna NSAM:lla ja Pegasor AQ™ Indoor -laitteella **a)** ensimmäisenä mittauspäivänä, **b)** toisena mittauspäivänä, ja **c)** kolmantena mittauspäivänä. Kuviin on punaisilla nuolilla merkitty niiden työskentelyjaksojen keskipohdat, joilta on laskettu pinta-alapitoisuuden keskiarvot taulukkoon 10 (työskentelyjaksot 1-3, aikajärjestyksessä).

Taulukkoon 10 on koottu hiukkasten pinta-alapitoisuuksien keskiarvot keskihajontoineen kuvaan 20 merkittyjen työskentelyjaksojen 1-3 aikana kunakin mittauspäivänä työpisteessä ja hengitysvyöhykkeellä. Työskentelyjaksojen aikana keskimääräinen C_S hengitysvyöhykkeellä vaihteli välillä noin 800–12500 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja keskimääräinen C_{LDSA} välillä noin 200–3300 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Hengitysvyöhykkeellä pinta-alapitoisuudet olivat enimmillään noin 7–8 kertaa suurempia kuin työpisteessä.

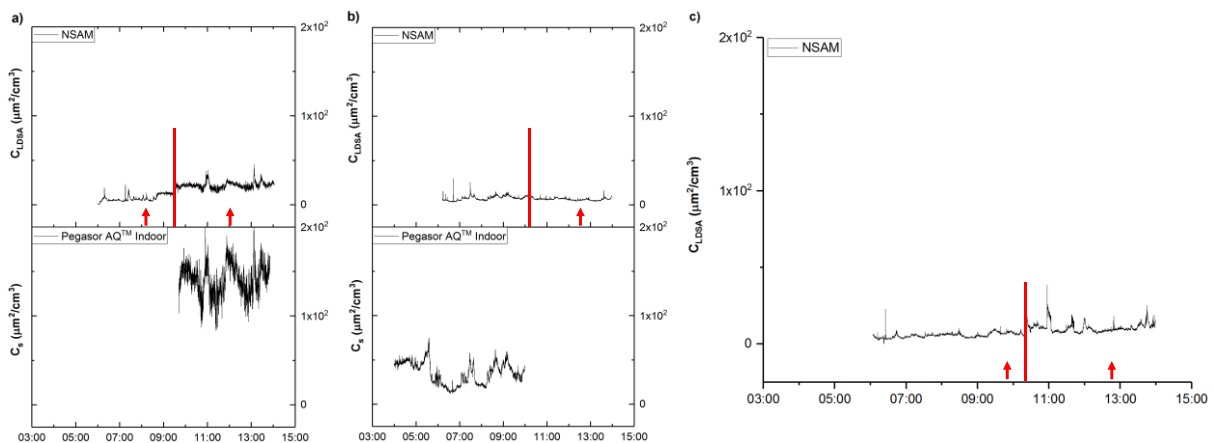
Taulukko 10. Hiukkasten kokonaispinta-alapitoisuuden (C_S) ja keuhkojen alveolialueelle teoreettisesti deponoituvien hiukkasten pinta-alapitoisuuden (C_{LDSA}) keskiarvot keskihajontoineen ($ka \pm SD$) hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä kunakin mittauspäivänä kuvaan 20 merkittyjen työskentelyjaksojen 1-3 aikana. Työskentelyjaksojen pituudet olivat 4-15 min.

| <i>Mittauspäivä/jakso</i> <i>suure</i> | Hiukkasten pinta-alapitoisuus ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$), $ka \pm SD$ | | | |
|---|--|-------------|------------|--------------------|
| | HV | | Työpiste | |
| | DiSCmini | | NSAM | Pegasor AQ™ Indoor |
| | C_{LDSA} | C_S | C_{LDSA} | C_S |
| 1/jakso 1 (teräsharjalla hionta) | 2416±2497 | 6949±8592 | 308±77 | - |
| 1/jakso 2 (hitaus) | 569±1347 | 1447±4194 | 448±396 | 1528±1260 |
| 1/jakso 3 (hitaus) | - | - | 407±402 | 1176±866 |
| 2/jakso 1 (metallin lämmitys kaasupolttimella) | 501±463 | 1652±190 | 372±24 | 1343±95 |
| 2/jakso 2 (kulmahiomakoneella hionta) | 231±170 | 813±415 | 630±222 | 2032±662 |
| 2/jakso 3 (hitaus) | 2084±2922 | 7960±12229 | 298±37 | 1098±113 |
| 3/jakso 1 (kulmahiomakoneella hionta) | 3303±3020 | 12527±12394 | 1922±1734 | - |
| 3/jakso 2 (hitaus) | 157±86 | 766±401 | 485±136 | - |
| 3/jakso 3 (hitaus) | 340±638 | 1336±1652 | 325±45 | 1174±133 |

Kalustetehtäs:

Esierottimen käytöllä oli vaikutusta NSAM:lla mitattuun LDSA-pitoisuuteen kalustetehtaassa (Kuva 21). Keskimääräinen C_{LDSA} ensimmäisenä ja kolmantena mittauspäivänä aamupäivällä esierottimen kanssa mitattuna oli $7.4 \pm 3.6 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja $5.7 \pm 1.5 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, tässä järjestyksessä. Toisena mittauspäivänä ilta-päivällä esierottimen kanssa mitattu keskimääräinen C_{LDSA} oli $6.3 \pm 1.2 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Vastaavasti ilman esierotinta mitattu C_{LDSA} oli ensimmäisenä ja kolmantena mittauspäivänä ilta-päivällä $22 \pm 3.6 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja $11 \pm 3.0 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, ja toisena mittauspäivänä aamupäivällä $7.5 \pm 2.5 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Ilman esierotinta mitattu C_{LDSA} oli ensimmäisenä ja kolmantena mittauspäivänä noin 2–3 kertaa suurempi kuin esierottimen kanssa mitattu. Toisena mittauspäivänä ilman esierotinta ja sen kanssa mitatuissa keskiarvopitoisuuksissa ei ollut juurikaan eroa. Ensimmäisenä mittauspäivänä ilmankostuttimet olivat päällä, mikä voi vaikuttaa diffuusiovaraajien toimintaan, mutta kolmantena mittauspäivänä ilmankostuttimia ei käytetty.

Pegasor AQTM Indoor mittasi työpisteessä ensimmäisenä mittauspäivänä ilta-päivällä, toisena mittauspäivänä aamupäivällä. Sen mittaama kokonaispinta-alapitoisuuden keskiarvo oli ensimmäisenä mittauspäivänä $143 \pm 19 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja toisena mittauspäivänä $36 \pm 12 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Ilmankostuttimien käyttö ensimmäisenä mittauspäivänä selittää eron.



Kuva 21. Kokonaispinta-alapitoisuuden (C_s) ja/tai keuhkojen alveolialueelle teoreettisesti deponoituvien hiukkasten pinta-alapitoisuuden (C_{LDSA}) aikasarjat kalustetehtaassa työpisteessä mitattuna NSAM:lla ja Pegasor AQTM Indoor -laitteella **a)** ensimmäisenä mittauspäivänä, **b)** toisena mittauspäivänä, ja **c)** kolmantena mittauspäivänä. Kuviiin on punaisilla nuolilla merkitty niiden työskentelyjaksojen keskikohtat, joilta on laskettu pinta-alapitoisuuden keskiarvot taulukkoon 11 (työskentelyjaksot 1 ja 2, aikajärjestyksessä). Punaisella pystyviivalla on merkitty, milloin esierotin on otettu pois tai laitettu paikoilleen. Esierotin oli NSAM:n edessä ensimmäisenä ja kolmantena mittauspäivänä aamupäivällä (kuvat a ja c), toisena mittauspäivänä ilta-päivällä (kuva b).

Työskentelyjaksot Multiax II -koneella eivät erottuneet pinta-alapitoisuuden aikasarjoista yhtä selvästi kuin lukumääräpitoisuuden aikasarjoista hengitysvyöhykkeelläkään. DiSCmini:lla mitatut pinta-alapitoisuuksien keskiarvot ensimmäisenä mittauspäivänä olivat: C_s $100 \pm 51 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja C_{LDSA} $19 \pm 16 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Toisena ja kolmantena mittauspäivänä pinta-alapitoisuudet olivat matalampia. Toisena mittauspäivänä keskimääräinen C_s oli $58 \pm 26 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja C_{LDSA} $7 \pm 2 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, ja kolmantena mittauspäivänä C_s oli $49 \pm 25 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja C_{LDSA} $8 \pm 8 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. PartectorTEM:n C_{LDSA} tulokset olivat vastaavasti $24 \pm 17 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, $10 \pm 4 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja $12 \pm 7 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. SMPS:n impaktorin käyttö näkyi PartectorTEM:lla työntekijän hengitysvyöhykkeeltä mitatuissa aikasarjoissa ensimmäisenä ja kolmantena mittauspäivänä.

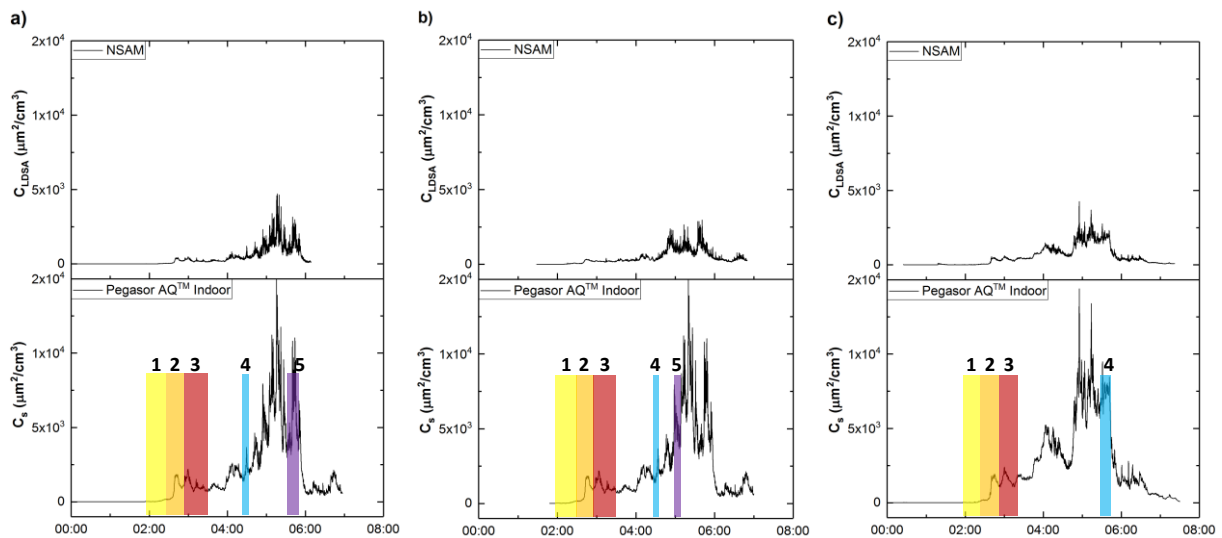
Taulukkoon 11 on koottu hiukkasten pinta-alapitoisuuksien keskiarvot keskihajontoineen kuvaan 21 merkittyjen työskentelyjaksojen 1 ja 2 aikana kunakin mittauspäivänä työpisteessä ja hengitysvyöhykkeellä.

Taulukko 11. Hiukkasten kokonaispinta-alapitoisuuden (C_s) ja keuhkojen alveolialueelle teoreettisesti deposoituvien hiukkasten pinta-alapitoisuuden (C_{LDSA}) keskiarvot keskihajontoineen ($ka\pm SD$) hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä kunakin mittauspäivänä kuvaan 21 merkittyjen työskentelyjaksojen 1 ja 2 aikana. Työskentelyjaksojen pituudet olivat 15-29 min.

| Mittauspäivä/jakso <i>suure</i> | Hiukkasten pinta-alapitoisuus ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$), $ka\pm SD$ | | | | |
|--|---|--------|--------------|------------|---------------------------------|
| | HV | | | Työpiste | |
| | DiSCmini | | PartectorTEM | NSAM | Pegasor AQ TM Indoor |
| | C_{LDSA} | C_s | C_{LDSA} | C_{LDSA} | C_s |
| 1/jakso 1 (hionta Multiax II -koneella) | 35±35 | 148±49 | 35±27 | 22±1 | 152±9 |
| 1/jakso 2 (hionta Multiax II -koneella) | 27±25 | 117±47 | 35±28 | 26±1 | 168±8 |
| 2/jakso 1 (hionta Multiax II -koneella) | 8±1 | 64±18 | 10±2 | - | - |
| 2/jakso 2 (hionta Multiax II -koneella) | 6±2 | 66±21 | 8±2 | 6±1 | - |
| 3/jakso 1 (hionta Multiax II -koneella) | 20±21 | 56±28 | 19±11 | 8±1 | - |
| 3/jakso 2 (hionta Multiax II -koneella) | 8±3 | 34±5 | 18±12 | 9±1 | - |

Leipomo:

Leipomossa NSAM:n edessä käytettiin esierotinta ensimmäisenä ja toisena mittausyönä. Esierottimen käytöllä ei ollut vaikutusta mitattuun LDSA-pitoisuuteen (Kuva 22). Keskimääräinen C_{LDSA} työpisteessä taikinantekijän työvuoron aikana oli ensimmäisenä mittausyönä $494\pm 607 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, toisena $470\pm 457 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, ja kolmantena $661\pm 647 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Vastaavat C_s -arvot mitattuna Pegasor AQTM Indoor -laitteella olivat $2138\pm 2369 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, $2114\pm 2368 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, ja $2608\pm 2543 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Keskimääräiset pinta-alapitoisuudet olivat suurimmat kolmantena mittausyönä.



Kuva 22. Keuhkojen alveolialueelle teoreettisesti deposoituvien hiukkasten pinta-alapitoisuuden (C_{LDSA}) ja kokonaispinta-alapitoisuuden (C_s) aikasarjat leipomossa työpisteessä mitattuna NSAM:lla ja Pegasor AQTM Indoor -laitteella **a)** ensimmäisenä mittausyönä, **b)** toisena mittausyönä, ja **c)** kolmantena mittausyönä. Kuviiin merkittävät työskentelyjaksot, joilta on laskettu pinta-alapitoisuuden keskiarvot taulukkoon 12 (työskentelyjaksot 1-5 tai 1-4, aikajärjestyksessä).

Taikinantekijän hengitysvyöhykkeellä keskimääräinen C_{LDSA} ensimmäisenä mittausyönä oli DiSCmini:lla mitattuna $379 \pm 320 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja PartectorTEM:llä mitattuna $325 \pm 283 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Toisena ja kolmantena mittausyönä vastaavat arvot olivat $464 \pm 483 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ (DiSCmini) ja $450 \pm 434 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ (PartectorTEM), ja $627 \pm 674 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ (DiSCmini) ja $598 \pm 622 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ (PartectorTEM). PartectorTEM:n edessä käytettiin ensimmäisenä yönä SMPS:n impaktoria. Impaktorin käyttö ei vaikuttanut mitattuun LDSA-pitoisuuteen. Kokonaispinta-alapitoisuuden (C_s) keskiarvo hengitysvyöhykkeellä oli ensimmäisenä yönä $5406 \pm 5509 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, toisena $7089 \pm 9433 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja kolmantena $9939 \pm 13566 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$.

Työpisteessä keskimääräinen C_{LDSA} DiSCmini:lla mitattuna oli ensimmäisenä yönä $263 \pm 273 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, toisena yönä $374 \pm 359 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja kolmantena yönä $562 \pm 607 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Kokonaispinta-alapitoisuuden keskiarvo ensimmäisestä yönä oli $3015 \pm 5509 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, toisena $4269 \pm 4998 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja kolmantena $6372 \pm 7979 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Mittalaitteita verrattaessa NSAM antoi hieman suurempia C_{LDSA} -keskiarvoja ja Pegasor AQTM Indoor selvästi pienempiä C_s -keskiarvoja työvuoron ajalle kuin DiSCmini.

Molempien pinta-alapitoisuuksien keskiarvot olivat suurempia hengitysvyöhykkeellä kuin työpisteessä. Kokonaispinta-alapitoisuuden osalta työpisteen pitoisuus oli 56–64 % hengitysvyöhykkeen pitoisuudesta, LDSA-pitoisuuden osalta työpisteen pitoisuus oli 69–90 % hengitysvyöhykkeen pitoisuudesta (DiSCminillä mitatut pitoisuudet).

Taulukkoon 12 on koottu hiukkasten pinta-alapitoisuuksien keskiarvot keskihajontoineen kuvaan 22 merkittyjen työskentelyjaksojen aikana kunakin mittausyönä työpisteessä ja hengitysvyöhykkeellä. Kuten lukumääräpitoisuudetkin, myös pinta-alapitoisuudet kasvoivat sekä hengitysvyöhykkeellä että työpisteessä työvuoron edetessä. Työskentelyjakson 1 aikana keskimääräinen C_{LDSA} oli hengitysvyöhykkeellä hieman suurempi kuin työpisteessä. Kaikkien muiden työskentelyjaksojen aikana keskimääräinen C_{LDSA} oli suunnilleen samaa suuruusluokkaa sekä hengitysvyöhykkeellä että työpisteessä.

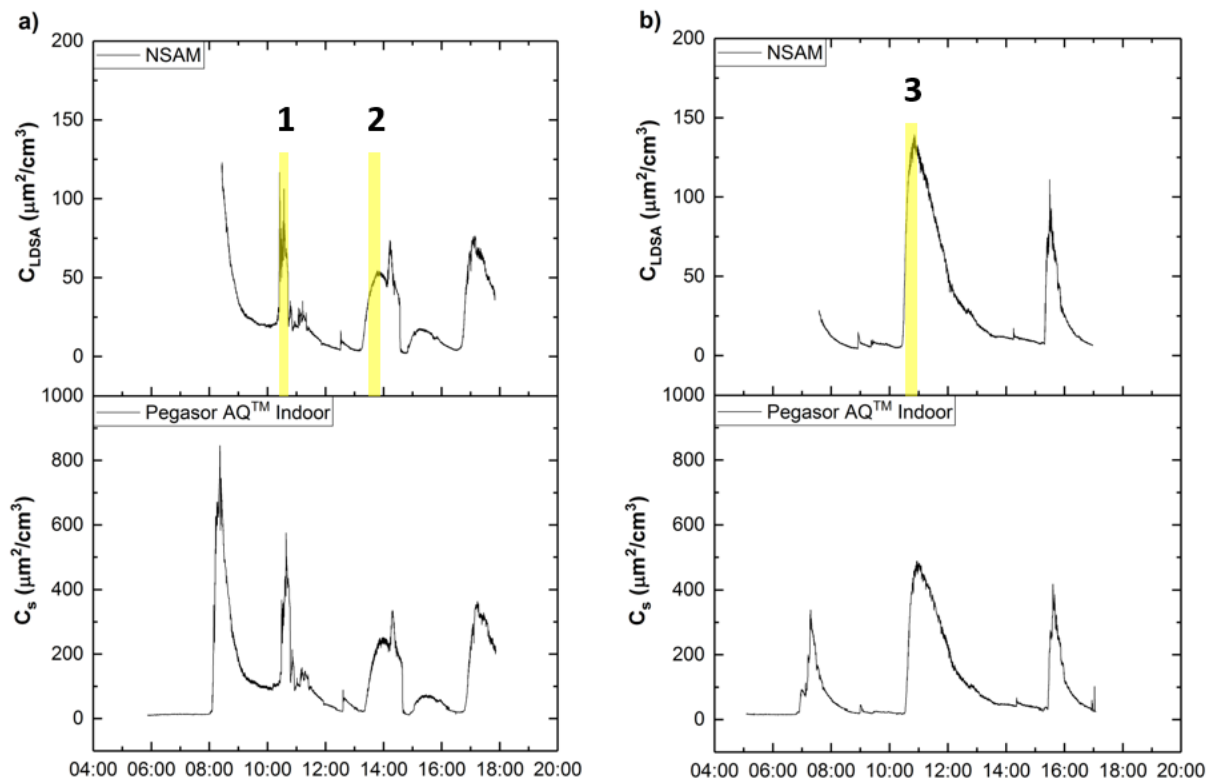
Taulukko 12. Hiukkasten kokonaispinta-alapitoisuuden (C_s) ja keuhkojen alveolialueelle teoreettisesti deposoituvien hiukkasten pinta-alapitoisuuden (C_{LDSA}) keskiarvot keskihajontoineen ($ka\pm SD$) hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä kunakin mittausyönä kuvaan 22 merkittävien työskentelyjaksojen aikana. Työskentelyjaksojen pituudet olivat 8-38 min.

| <i>Mittauspäivä/jakso</i> <i>suure</i> | Hiukkasten pinta-alapitoisuus ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$), $ka\pm SD$ | | | | | |
|--|---|------------|------------|------------|------------|--------------------|
| | HV | | Työpiste | | | |
| | DiSCmini | | DiSCmini | | NSAM | Pegasor AQ™ Indoor |
| | C_{LDSA} | C_s | C_{LDSA} | C_s | C_{LDSA} | C_s |
| 1/uunien käynnistys | 7±20 | 31±33 | 3±1 | 21±8 | 2±1 | 12±4 |
| 1/jakso 1 (taikinanteko) | 50±34 | 144±113 | 30±17 | 77±49 | 10±11 | 47±47 |
| 1/jakso 2 (taikinanteko) | 208±130 | 2752±2483 | 216±168 | 2135±2071 | 166±133 | 804±636 |
| 1/jakso 3 (taikinanteko) | 234±82 | 5224±2168 | 278±91 | 3913±1468 | 228±77 | 1135±351 |
| 1/jakso 4 (riisipiirakoiden kuoritaikinan teko) | 444±119 | 6669±3037 | 442±98 | 5296±1696 | 488±186 | 2252±383 |
| 1/jakso 5 (riisipiirakoiden kuoritaikinan kaulinta) | 619±123 | 6801±2829 | 619±123 | 6030±1106 | 1323±535 | 5433±1942 |
| 2/uunien käynnistys | 2±1 | 17±9 | 3±1 | 18±16 | 1.3±0.3 | 8±2 |
| 2/jakso 1 (taikinanteko) | 50±31 | 130±84 | 34±33 | 89±78 | 22±23 | 30±27 |
| 2/jakso 2 (taikinanteko) | 168±101 | 2164±2075 | 202±143 | 2006±1995 | 153±111 | 664±662 |
| 2/jakso 3 (taikinanteko) | 192±24 | 4354±1163 | 239±35 | 3378±535 | 207±25 | 1191±351 |
| 2/jakso 4 (riisipiirakoiden kuoritaikinan kaulinta) | 529±186 | 7026±3903 | 428±87 | 4858±1146 | 467±100 | 2313±394 |
| 2/jakso 5 (riisipiirakoiden kuoritaikinan kaulinta) | 1081±241 | 19638±7996 | 907±111 | 11806±1569 | 1096±323 | 6781±2084 |
| 3/uunien käynnistys | 5±9 | 23±27 | 2±1 | 14±11 | 1.3±0.3 | 7±2 |
| 3/jakso 1 (taikinanteko) | 17±17 | 49±41 | 10±8 | 30±16 | 6±5 | 15±9 |
| 3/jakso 2 (taikinanteko) | 183±141 | 1995±2024 | 219±200 | 1886±2141 | 185±174 | 710±687 |
| 3/jakso 3 (taikinanteko) | 285±76 | 6624±2595 | 384±100 | 6088±2191 | 376±85 | 1534±331 |
| 3/jakso 4 (riisipiirakoiden kuoritaikinan kaulinta) | 1553±409 | 22938±8400 | 1598±342 | 18946±5424 | 1761±389 | 6890±1360 |

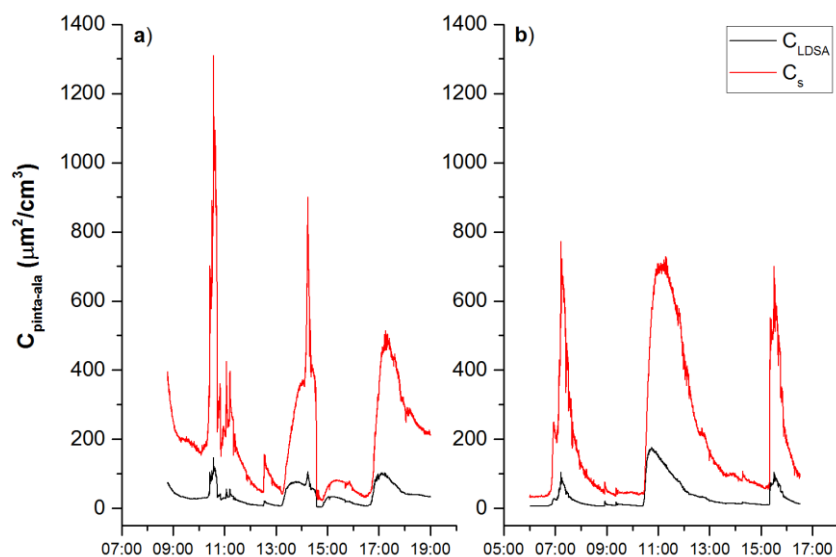
Kampaamo:

Pegasor AQ™ Indoor:n, NSAM:n ja DiSCmini:n mitaamat hiukkasten kokonaispinta-alapitoisuuden (C_s) ja/tai keuhkojen alveolialueelle teoreettisesti deposoituvien hiukkasten pinta-alapitoisuuden (C_{LDSA}) aikasarjat työpisteessä on esitetty kuvissa 23 ja 24. Mittalaitteiden vasteet olivat samansuuntaisia, mutta DiSCmini antoi suurempia kokonaispinta-alapitoisuuksia kuin Pegasor AQ™ Indoor. DiSCmini:n ja NSAM:n mitaamat LDSA-pitoisuudet olivat kohtuullisen lähellä toisiaan. NSAM mittasi ensimmäisen

päivän esierottimen kanssa ja toisen päivänä ilman sitä. Esierottimen käytöllä ei ollut vaikutusta mitattuun pitoisuuteen.



Kuva 23. Keuhkojen alveolialueelle teoreettisesti deponoituvien hiukkasten pinta-alapitoisuuden (C_{LDSA}) ja kokonaispinta-alapitoisuuden (C_s) aikasarjat kampaamossa työpisteessä mitattuna NSAM:lla ja Pegasor AQ™ Indoor -laitteella **a)** ensimmäisenä mittauspäivänä, **b)** toisena mittauspäivänä. Kuviin merkitty työskentelyjaksot 1-3 (1 = hiuslakan suihkutus, 2 = värin vaikutus ja pesu, 3 = raitojen laitto ja kulumien värjäys), joilta on laskettu pinta-alapitoisuuden keskiarvot taulukkoon 13.



Kuva 24. DiSCmini:n mitaamat hiukkasten kokonaispinta-alapitoisuuden (C_s) ja keuhkojen alveolialueelle teoreettisesti deponoituvien hiukkasten pitoisuuden (C_{LDSA}) aikasarjat kampaamossa työpisteessä **a)** ensimmäisenä mittauspäivänä, **b)** toisena mittauspäivänä.

Työvaiheista LDSA-pitoisuutta nosti erityisesti hiusten muotoilu, jolloin suihkutettiin muotoilutuotteita. Myös hiusten suoristaminen nähtiin pinta-alapitoisuutta nostavana työvaiheena. C_{LDSA} -keskiarvot työntekijän hengitysvyöhykkeellä koko työpäivän aikana olivat samaa tasoa molempina päivinä. DiSCmini:lla mitattuna ensimmäisenä mittauspäivänä $28 \pm 43 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja toisena mittauspäivänä $26 \pm 28 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Vastaavat arvot PartectorTEM:lla mitattuna olivat $25 \pm 34 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja $22 \pm 24 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. PartectorTEM:n edessä oli SMPS:n impaktori toisena mittauspäivänä. Impaktorin käyttö ei vaikuttanut mitattuun LDSA-pitoisuuteen.

Työntekijän hengitysvyöhykkeeltä mitatut LDSA-pitoisuudet olivat suurimpia työskentelyjakson 1 aikana, jolloin suihkutettiin hiuslakkaa (Taulukko 13). Pienimmät LDSA-pitoisuudet mitattiin työskentelyjakson 2 aikana hiusten värjäyksen jälkeen värin vaikuttaessa. Työpisteessä LDSA-pitoisuudet olivat sen sijaan suurimmat työskentelyjakson 3 aikana. Verrattaessa kahta DiSCmini:a, hengitysvyöhykkeeltä mitatut LDSA-pitoisuudet olivat työpisteestä mitattuja pitoisuuksia pienempiä työskentelyjaksojen 2 ja 3 aikana. Työskentelyjaksojen 1-3 aikana LDSA-pitoisuus työntekijän hengitysvyöhykkeellä oli enimmillään noin 5 kertaa suurempi kuin koko työpäivän keskiarvopitoisuus.

Taulukko 13. Hiukkasten pinta-alapitoisuuksien (C_s tai C_{LDSA}) keskiarvot keskihajontoineen ($ka \pm SD$) hengitysvyöhykkeellä ja työpisteessä kuvaan 23 merkittyjen työskentelyjaksojen 1-3 aikana (1 = hiuslakan suihkutusta, 2 = värin vaikutus ja pesu, 3 = raitojen laitto ja kulmien värjäys).

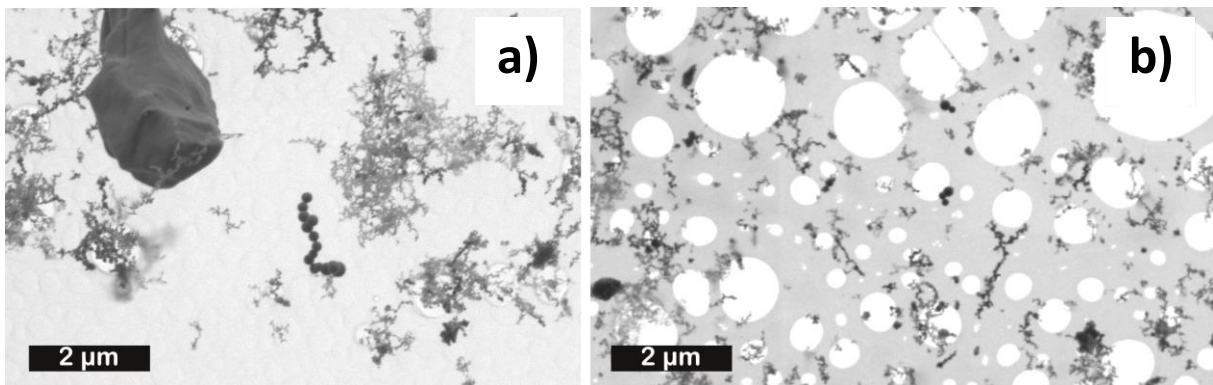
| <i>Mittauspäivä/ jakso</i> | Hiukkasten pinta-alapitoisuus ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$), $ka \pm SD$ | | | | | |
|--------------------------------|---|---------------------|-----------------|---------|-------------|---------------------------|
| | HV | | Työpiste | | | |
| | <i>DiSCmini</i> | <i>PartectorTEM</i> | <i>DiSCmini</i> | | <i>NSAM</i> | <i>Pegasor AQ™ Indoor</i> |
| | C_{LDSA} | C_{LDSA} | C_{LDSA} | C_s | C_{LDSA} | C_s |
| 1/jakso 1 | 143±191 | 113±154 | 81±22 | 615±187 | 64±19 | 218±99 |
| 1/jakso 2 | 30±15 | 32±16 | 53±25 | 162±91 | 32±18 | 110±77 |
| 2/jakso 3 | 74±17 | 76±18 | 152±28 | 493±184 | 112±31 | 309±169 |

3 HIUKKASTEN MUOTO JA KOOSTUMUS

3.1 Konepaja 1

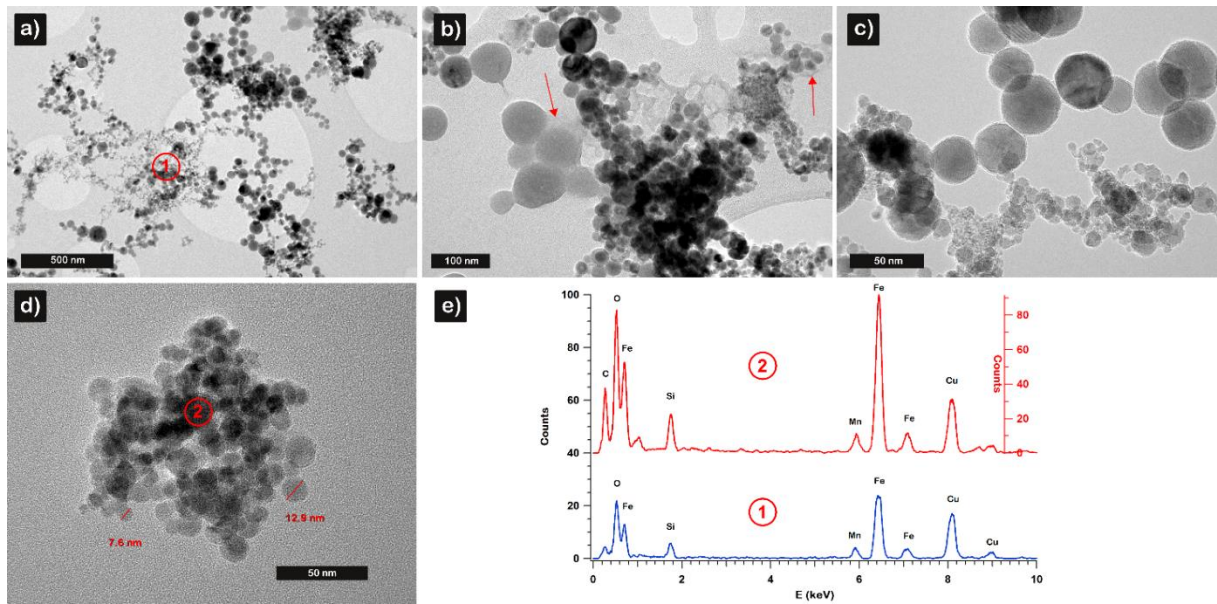
Elektronimikroskooppinäytteet kerättiin suoraan reiällisille hiilikalvoille (S147-4 Holey Carbon Film 400 Mesh Cu, Agar Scientific) käyttäen imukeräintä (Lyyränen ym., 2009) näytevirtauksella $0.4 \text{ dm}^3/\text{min}$. Osassa näytteistä imukeräimen eteen asennettiin SMPS:n impaktori, jonka leikkausraja virtauksella $0.4 \text{ dm}^3/\text{min}$ on noin $0.5 \mu\text{m}$, estämään suurten hiukkasten pääsy näytealustalle.

Konepajan 1 ilmassa esiintyi pienten hiukkasten lisäksi suuria, mikrometrien kokoisia hiukkasia (Kuva 25a). Tässä hankkeessa keskityttiin nanohiukkasiin, joten elektronimikroskopiaa ei tehty suurista hiukkasista.



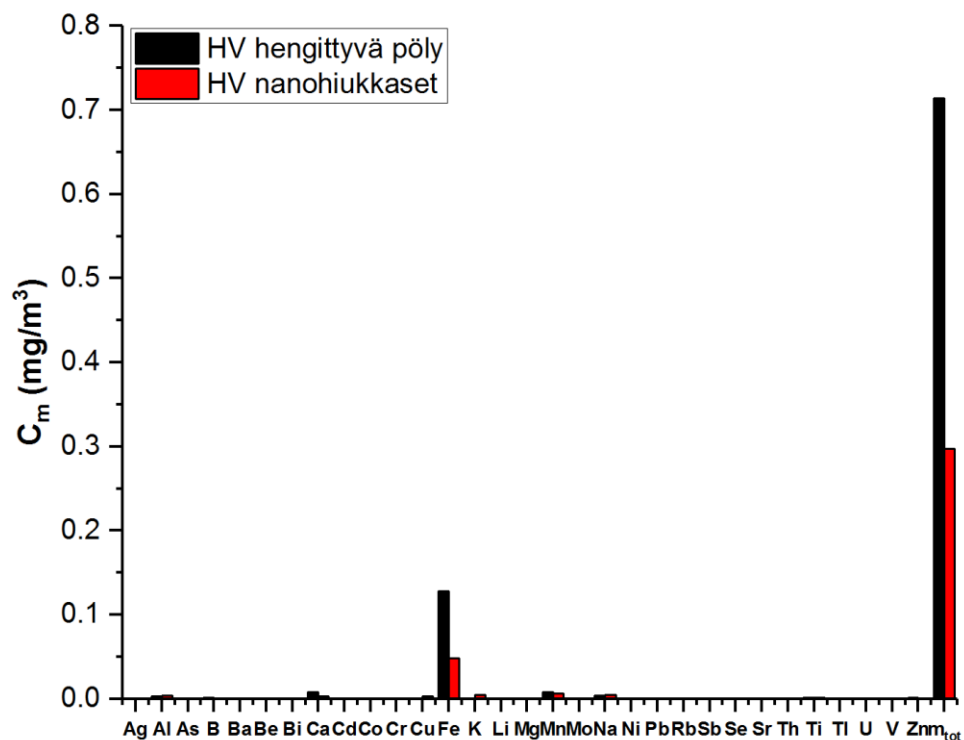
Kuva 25. SEM-kuvia konepajassa 1 esiintyvistä hiukkasista: **a)** työpiste, näyte kerätty ilman impaktoria. Kuvassa näkyy vasemmalla ylhäällä suurempi hiukkanen. Muut kuvassa näkyvät hiukkaset ovat nanohiukkasten muodostamia agglomeraatteja. **b)** hengitysvyöhyke, näyte kerätty impaktorin kanssa käsin hionnan aikana.

Käsin hionnassa hengitysvyöhykkeellä esiintyi sekä pienistä primaarihiukkasista koostuvia agglomeraatteja että suuremmista primaarihiukkasista koostuvia agglomeraatteja (Kuva 26a-d). Agglomeraatti on yhteen kasautuneista/ketjuuntuneista hiukkasista (primaarihiukkasista) muodostunut ryväs. Osa hiukkasista oli päällystynyt kevyemmällä aineella (nuolet kuvassa 26b), josta ei saatu EDS-analyysillä signaalia. Luultavasti kyseessä on lastuamisneste, jota käytetty analyysimenetelmä ei havaitse. Aiemmin esitettyjen lukumääräkojakaumien (Kuva 6) perusteella pienemmistä primaarihiukkasista koostuvat agglomeraatit ovat todennäköisesti peräisin käsin hionnasta. Primaarihiukkasten koko näissä agglomeraateissa oli noin 5–15 nm (Kuva 26d). EDS-analyysin perusteella agglomeraatit sisälsivät rautaa (Fe), mangaania (Mn), piitä (Si), happea (O) ja hiiltä (C) (Kuva 26e). Kuparin (Cu), ja osittain myös hiilen piikit aiheutuvat näytealustasta ja näytteen pitimestä.



Kuva 26. TEM-kuvia (a-d) konepajassa 1 käsin hionnan aikana hengitysvyöhykkeellä esiintyvistä hiukkasista, e) EDS-spektrit pisteistä 1 (a-kuva) ja 2 (d-kuva). Kuvaan d) on merkitty kahden primaarihiukkasen halkaisijat.

ICP-MS analyysillä määritettyjen 31 alkuaineen osuus hengitysvyöhykkeeltä kerätylle IOM-suodattimelle kertyneestä kokonaismassasta hengittävissä pölyssä oli noin 22 % ja nanohiukkasfraktiossa noin 27 %. Eniten alkuaineista esiintyi rautaa, mangaania, kalsiumia (Ca) ja natriumia (Na) (Kuva 27). ICP-MS -analyysi tehtiin myös puhtaalta IOM-suodattimelta, joka sisälsi muun muassa alumiinia (Al), magnesiumia (Mg), kaliumia (K), titaania (Ti), ja sinkkiä (Zn).



Kuva 27. Konepajassa 1 työntekijän hengitysvyöhykkeeltä esierottimen kanssa (nanohiukkaset) ja ilman (hengittävää pöly) kerätyiltä IOM-suodattimilta ICP-MS -analyysillä määritetyt 31 alkuaineen massapitoisuudet. Lisäksi kuvassa on suodattimilta määritetyt kokonaismassapitoisuudet.

Metallien pitoisuudet työntekijän hengitysvyöhykkeellä eivät ylittäneet HTP_{8h}-arvoja (STM, 2016). Hengitysvyöhykenäytteitä kerättiin pääsääntöisesti koko työvuoron ajan, ja näytteenotto keskeytettiin lounastauon ajaksi. Määritettyjä pitoisuuksia verrattiin suoraan HTP_{8h}-arvoihin. Verrattuna HTP-arvoihin, mangaanin pitoisuudet olivat selkeästi suurimpia, esierottimen kanssa kerätyltä suodattimelta määritetty Mn-pitoisuus oli noin 32 % alveolijakeelle annetusta HTP_{8h}-arvosta (Taulukko 14).

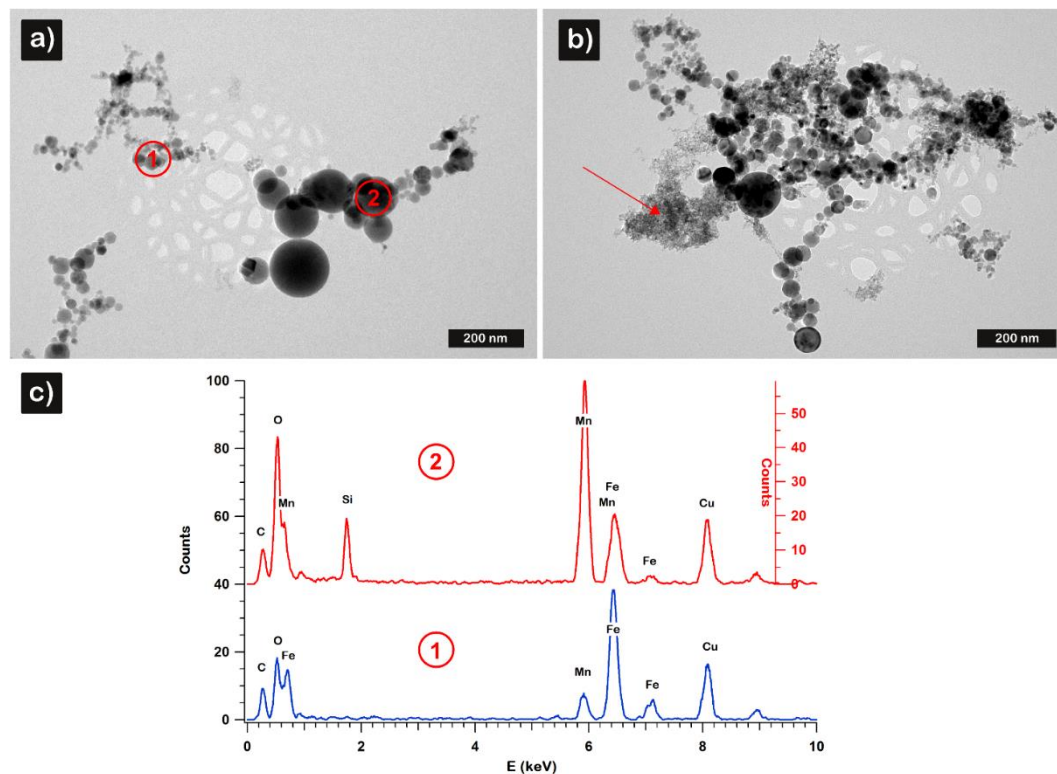
Taulukko 14. Konepajassa 1 hengitysvyöhykkeeltä kerätyiltä IOM-suodattimilta määritetyt kromin (Cr), raudan (Fe), mangaanin (Mn) ja nikkelin (Ni) massapitoisuudet (mg/m³), metalleille voimassa olevat HTP_{8h}-arvot (hengittävää pölyä tai alveolijakea), ja määritettyjen pitoisuuksien osuus HTP-arvoista (%).

| Näyte | Metalli | massapitoisuus (mg/m ³) | | Osuus HTP-arvosta (%) |
|-------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| | | Määritetty | HTP _{8h} | |
| Hengittävää pölyä | Cr _{tot} | 0.00061 | 0.5 | 0.1 |
| Hengittävää pölyä | Fe | 0.12800 | 5 | 2.6 |
| Hengittävää pölyä | Mn | 0.00800 | 0.2 | 4.0 |
| Nanohiukkaset | Mn | 0.00634 ^a | 0.02 ^b | 32 |
| Hengittävää pölyä | Ni | 0.00020 | 0.05 | 0.4 |
| Nanohiukkaset | Ni | 0.00010 ^a | 0.01 ^b | 1.0 |

^aKeräysaika tässä näytteessä 225 min

^bAlveolijake

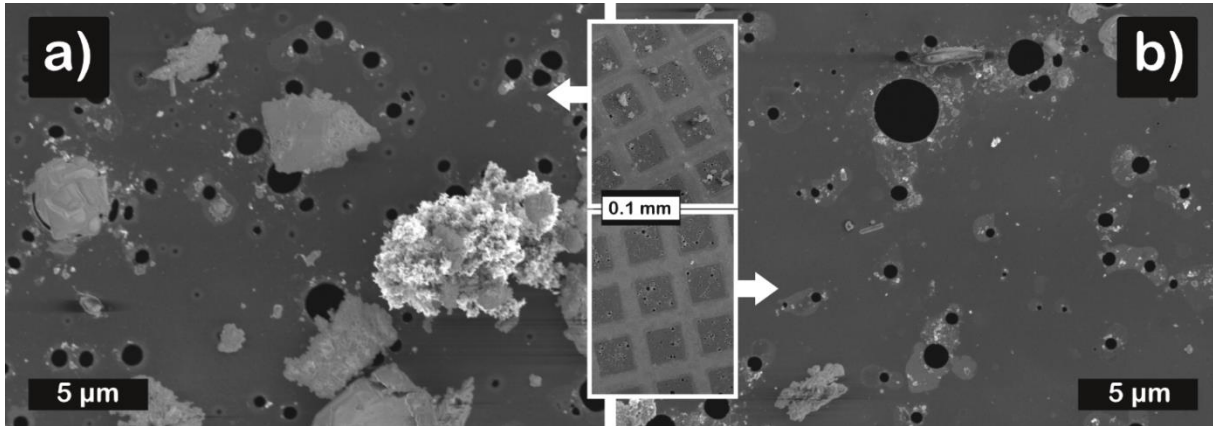
Myös taustapisteessä esiintyi samanlaisia agglomeraatteja kuin hengitysvyöhykkeellä (Kuva 28a-b), joten eri prosesseissa muodostuvat hiukkaset näyttäisivät leviävän koko tehdashalliin. Tämän kokoluokan hiukkaset seuraavat tehokkaasti ilmavirtoja.



Kuva 28. TEM-kuvia (a, b) taustapisteessä esiintyvistä hiukkasista. Nuoli b-kuvassa osoittaa pienemmistä primaarihiukkasista koostuvaa agglomeraattia. c) EDS-spektrit kuvaan a) merkityistä pisteistä 1 ja 2.

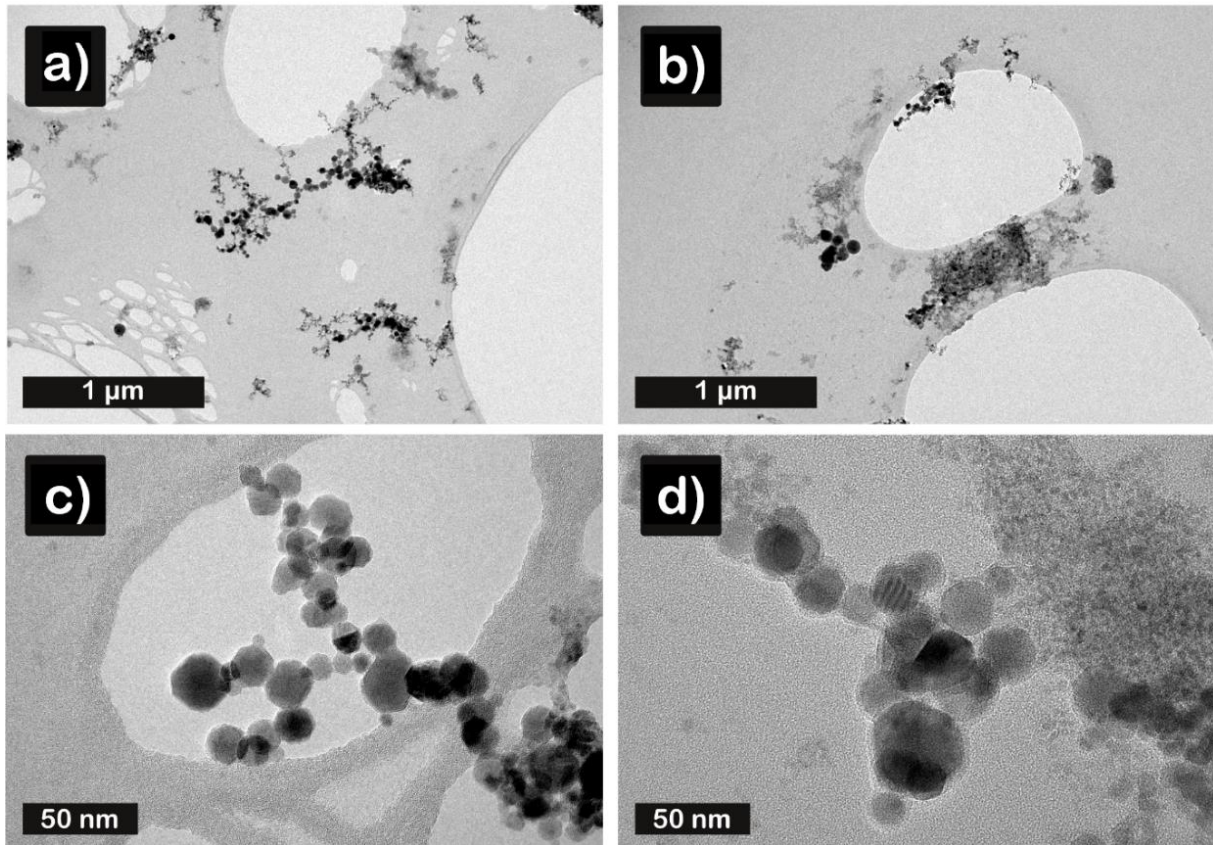
3.2 Konepaja 2

Myös hitsauksessa muodostui nanokokoluokan hiukkasten lisäksi suuria, useiden mikrometrien kokoisia hiukkasia, mikä näkyy hyvin kuvassa 29, jossa on esitetty SEM-kuvat samasta hitsaustapahtumasta ilman impaktoria ja sen kanssa kerätyistä näytteistä.



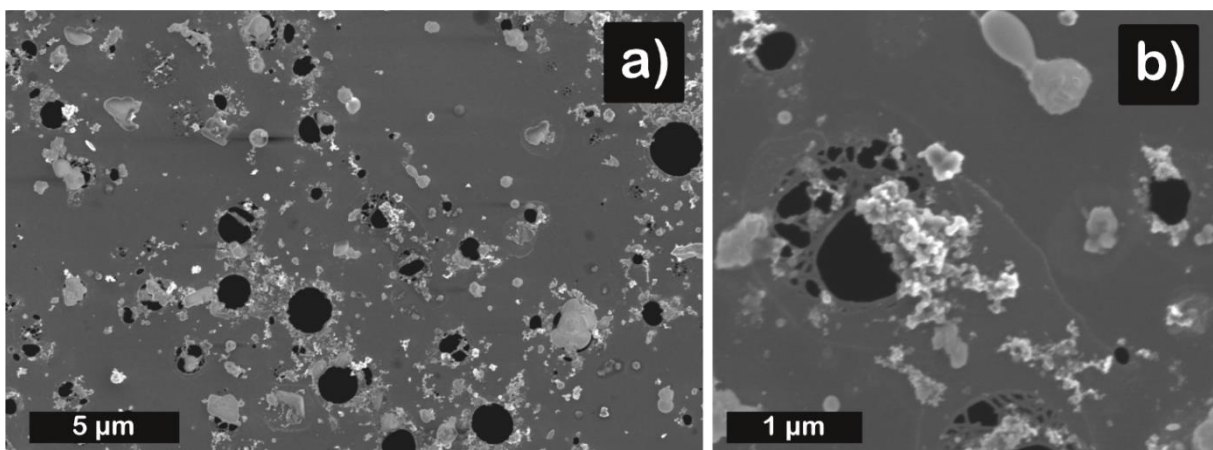
Kuva 29. SEM-kuvia konepajassa 2 TIG-hitsauksessa muodostuvista hiukkasista; **a)** näyte kerätty ilman impaktoria, **b)** näyte kerätty impaktorin kanssa.

Mittauskampanjan aikana hitsattavana oli kahta erilaista materiaalia (316L ja 304L). Molemmista materiaaleista muodostuneet nanohiukkaset olivat muodoltaan pääasiassa agglomeraatteja (Kuva 30) ja sisälsivät rautaa, kromia (Cr), mangaania, nikkeliä (Ni), happea, ja hiiltä. Kuten aiemmassakin tutkimuksessa (Miettinen ym., 2016), TIG-hitsaushuurussa esiintyi ainakin kahdentyyppisiä agglomeraatteja. Tyypin 1 agglomeraattien primaarihiukkaskoko oli noin 5–40 nm, tyypin 2 agglomeraatit koostuivat hyvin pienistä primaarihiukkasista. Molempia agglomeraattityyppejä esiintyi sekä 316L että 304L materiaalia hitsattaessa kerätyissä näytteissä.



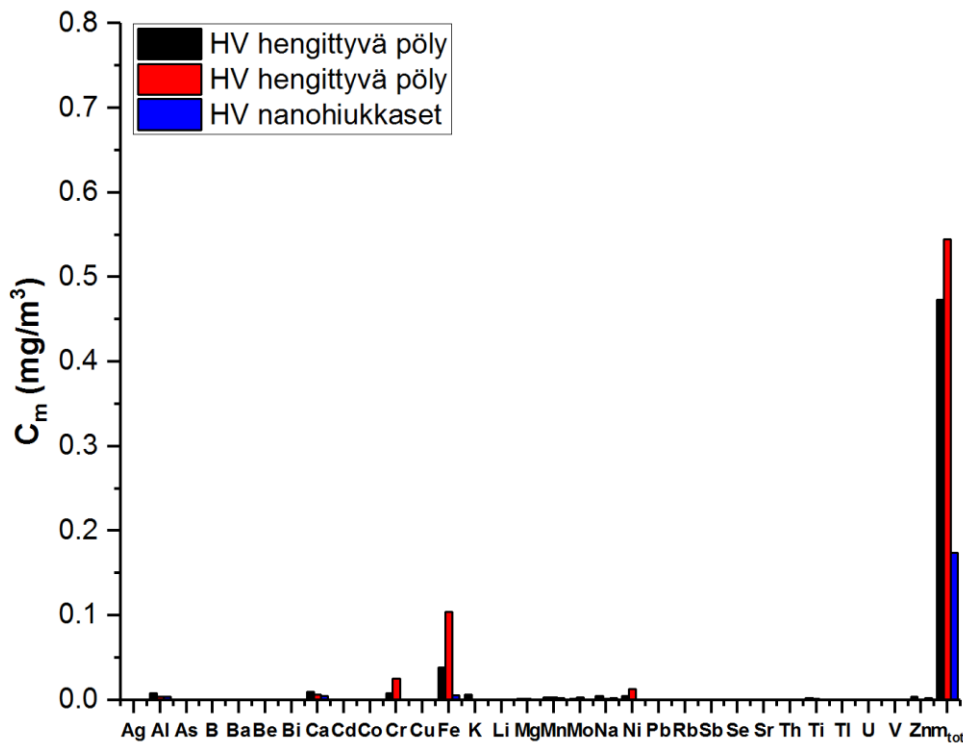
Kuva 30. TEM-kuvia materiaaleista 316L ja 304L muodostuneista hiukkasista. Kuvat **a)** ja **c)** ovat materiaalista 316L, kuvat **b)** ja **d)** materiaalista 304L. Näytteet kerättiin hengitysvyöhykkeeltä käyttäen impaktoria leikkamassa pois suurimmat hiukkaset.

Myös taustapisteestä kerätty näyte sisälsi hitsauksessa muodostuneita agglomeraatteja (Kuva 31). Näyte kerättiin ensimmäisenä mittauspäivänä, jolloin taustapisteen läheisyydessä ei ollut hitsaustointia. Hitsauksessa muodostuneet hiukkaset leviävät siis ainakin koko hallin siihen pätyyn, jossa hitsauspisteet sijaitsevat, kun ilmastointi hallissa ei toimi normaalisti, kuten tämän mittauskampanjan aikana oli tilanne.



Kuva 31. SEM-kuvia konepajassa 2 taustapisteestä kerätystä näytteestä; **a)** yleiskuva, **b)** lähikuva. Näyte kerättiin ilman impaktoria.

ICP-MS analyysillä määritettyjen 31 alkuaineen osuus hengitysvyöhykkeeltä kerätylle IOM-suodattimelle kertyneestä kokonaismassasta hengittävissä pölyssä oli noin 20–30 % ja nanohiukkasfraktiossa noin 15 %. Eniten alkuaineista esiintyi rautaa, kromia, nikkeliä, ja kalsiumia (Kuva 32).



Kuva 32. Konepajassa 2 työntekijän hengitysvyöhykkeeltä esierottimen kanssa (nanohiukkaset) ja ilman (hengittävää pölyä) kerätyiltä IOM-suodattimilta ICP-MS -analyysillä määritetyt 31 alkuaineen massapitoisuudet. Lisäksi kuvassa on suodattimilta määritetyt kokonaismassapitoisuudet.

Metallien pitoisuudet työntekijän hengitysvyöhykkeellä eivät ylittäneet HTP_{8h}-arvoja (STM, 2016). Verattuna HTP-arvoihin, nikkelin pitoisuus oli suurin, 25 % hengittävän jakeen HTP_{8h}-arvosta (Taulukko 15). Hengitysvyöhykkeeltä määritetyt Cr_{tot}- ja Ni-pitoisuudet (hengittävää pölyä) olivat samaa suuruusluokkaa ruostumattoman teräksen TIG-hitsauksessa aiemmin määritettyjen pitoisuuksien kanssa (Työterveyslaitos, 2011; Coldwell ja Keen, 2010).

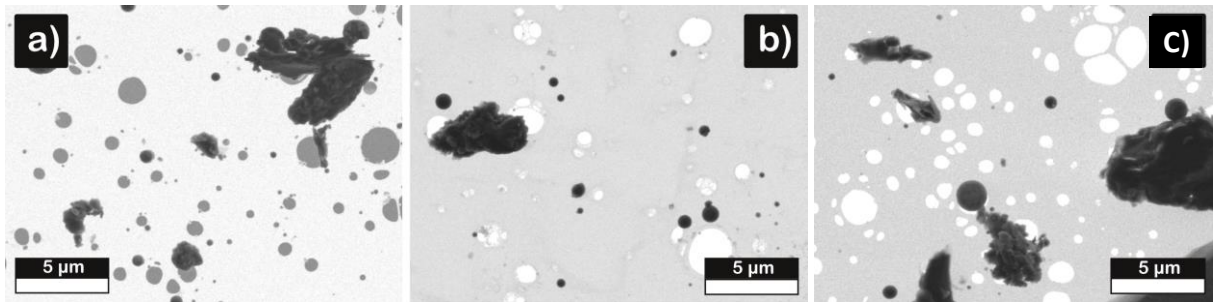
Taulukko 15. Hengitysvyöhykkeeltä kerätyiltä IOM-suodattimilta määritetyt kromin (Cr), raudan (Fe), mangaanin (Mn) ja nikkelin (Ni) suurimmat määritetyt massapitoisuudet (mg/m³), metalleille voimassa olevat HTP_{8h}-arvot (hengittävää pölyä tai alveolijae), ja määritettyjen pitoisuuksien osuus HTP-arvoista (%).

| Näyte | Metalli | massapitoisuus (mg/m ³) | | Osuus HTP-arvosta (%) |
|-------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| | | Määritetty | HTP _{8h} | |
| Hengittävää pölyä | Cr _{tot} | 0.02505 | 0.5 | 5.0 |
| Hengittävää pölyä | Fe | 0.10411 | 5 | 2.1 |
| Hengittävää pölyä | Mn | 0.00318 | 0.2 | 1.6 |
| Nanohiukkaset | Mn | 0.00225 | 0.02 ^a | 11 |
| Hengittävää pölyä | Ni | 0.01259 | 0.05 | 25 |
| Nanohiukkaset | Ni | 0.00051 | 0.01 ^a | 5.1 |

^aAlveolijae

3.3 Kalustetehtas

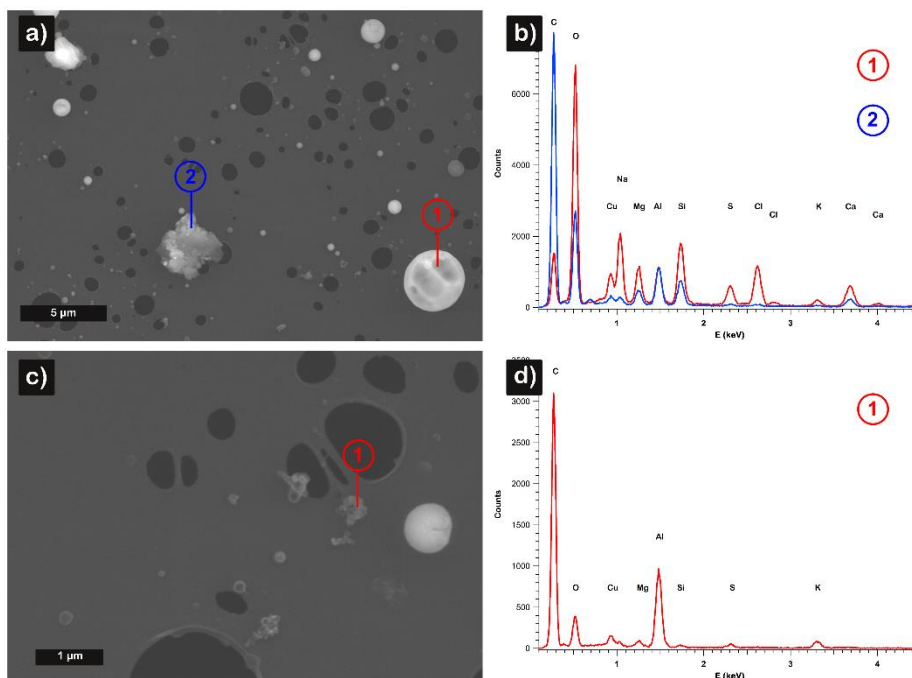
Kalustetehtaassakin ilman impaktoria kerätyissä näytteissä esiintyi suuria, useiden mikrometrien kokoisia hiukkasia (Kuva 33).



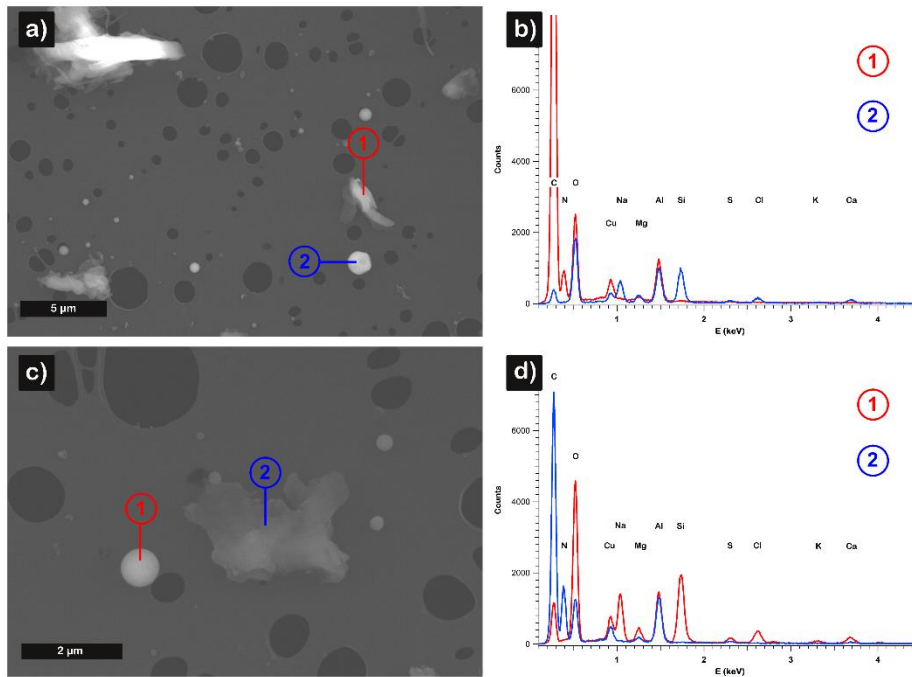
Kuva 33. SEM-kuvia suurista, useiden mikrometrien kokoisista hiukkasista, joita esiintyi kalustetehtaassa ilman impaktoria kerätyissä näytteissä. **a)** taustapiste, **b)** työpiste, **c)** hengitysvyöhyke.

Työpisteessä esiintyi pallomaisia hiukkasia, jotka sisälsivät happea, natriumia, piitä, rikkiä (S), klooria (Cl), kaliumia ja kalsiumia (Kuva 34a-b, piste 1). Kuparin, magnesiumin, alumiinin, ja osittain myös hiilen ja hapen piikit aiheutuvat näytteenpitimestä ja näytealustasta. Lisäksi työpisteessä esiintyi hiukkasia, jotka sisälsivät pääasiassa hiiltä, happea, ja piitä (Kuva 34a-b, piste 2). Kuvassa 34c näkyvät pienet, agglomeroituneet hiukkaset (piste 1) ovat todennäköisesti peräisin kaasutrukeista. EDS-analyysin perusteella agglomeraatit sisälsivät hiiltä, rikkiä ja kaliumia (Kuva 34d).

Hengitysvyöhykkeeltä kerätyissä näytteissä esiintyi myös pallomaisia hiukkasia (Kuva 35a, piste 2; Kuva 35c, piste 1), joiden koostumus oli sama kuin työpisteestä kerätyissä näytteessä. Lisäksi hengitysvyöhykkeeltä kerätyissä näytteissä esiintyi suurempia hiukkasia, jotka sisälsivät lähinnä hiiltä ja typpeä (N) (Kuva 35a, piste 1; Kuva 35c, piste 2). Nämä hiukkaset ovat peräisin työstetyistä MDF-levyistä.

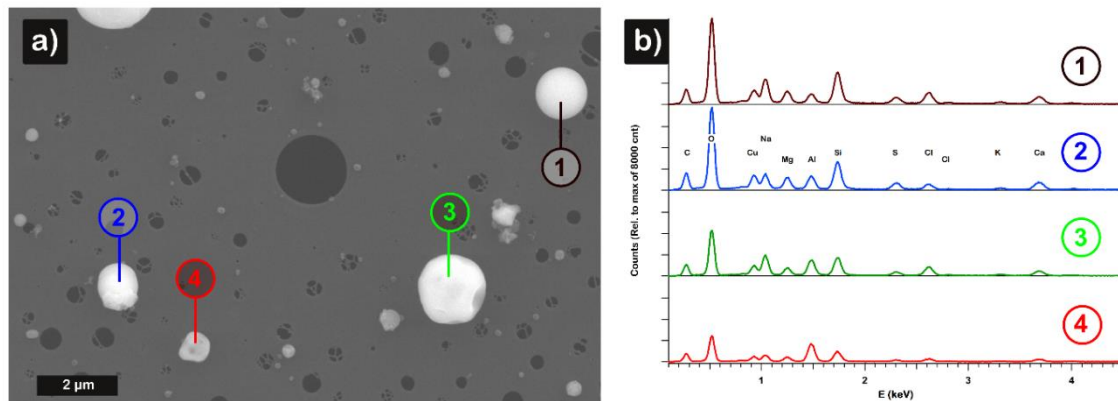


Kuva 34. SEM-kuvia (a ja c) kalustetehtaassa työpisteessä esiintyneistä hiukkasista. **b)** EDS-spektrit a-kuvaan merkityistä pisteistä 1 ja 2, **d)** EDS-spektri c-kuvaan merkitystä pisteestä 1.



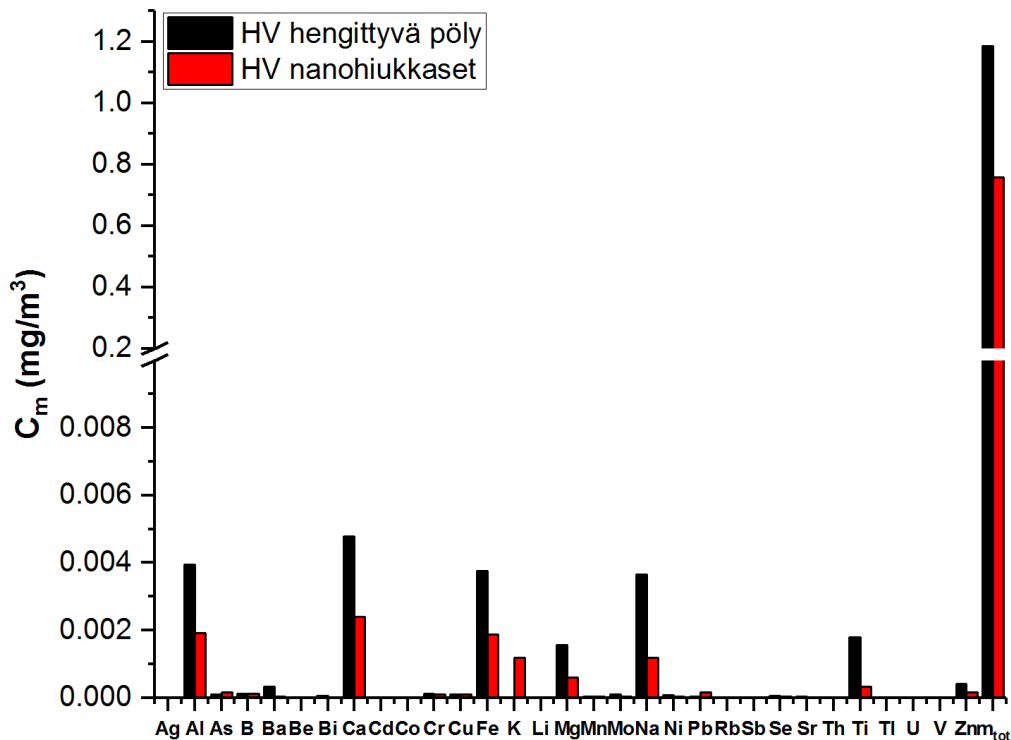
Kuva 35. SEM-kuvia (a ja c) kalustetehtaassa työntekijän hengitysvyöhykkeellä esiintyneistä hiukkasista. **b)** EDS-spektrit a-kuvaan merkityistä pisteistä 1 ja 2, **d)** EDS-spektri c-kuvaan merkityistä pisteistä 1 ja 2.

Taustapisteessä esiintyi pääasiassa pallomaisia hiukkasia, joiden koko vaihteli (Kuva 36a), mutta koostumus pysyi samana kuin työpisteessä. Kuvassa 36b esitetään neljän eri kokoisien hiukkasen EDS-spektrit. Pallomaisia hiukkasia esiintyi kalustetehtaassa kaikissa mittauspisteissä, ja ne lienevät ainakin osittain lähtöisin ulkoilmasta.



Kuva 36. a) SEM-kuva kalustetehtaassa taustapisteessä esiintyneistä hiukkasista. **b)** EDS-spektrit a-kuvaan merkityistä pisteistä 1-4.

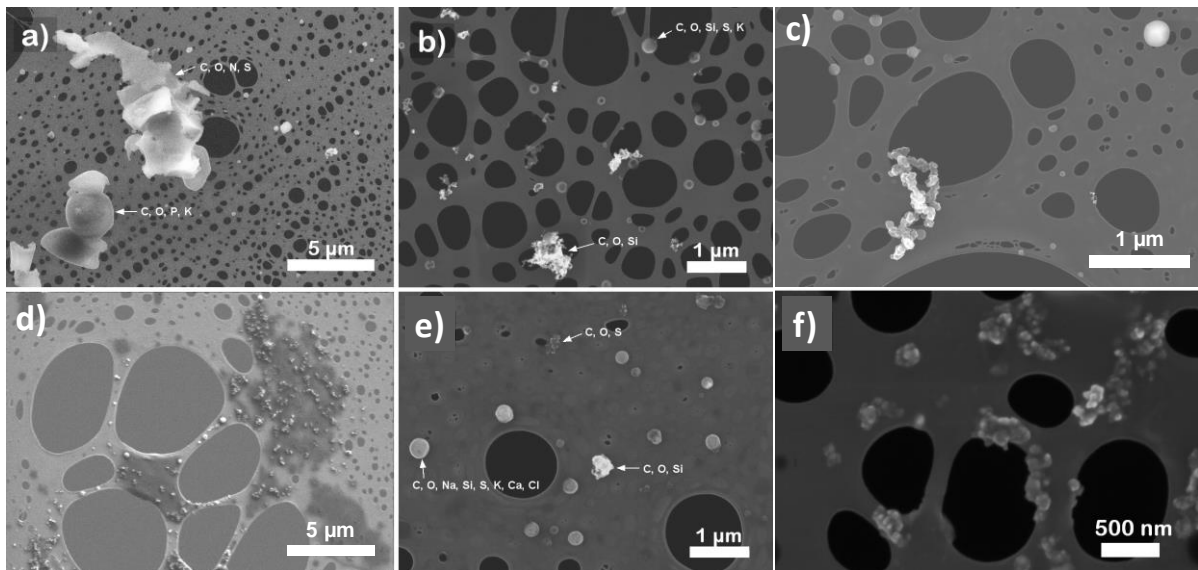
ICP-MS analyysillä määritettyjen 31 alkuaineen osuus hengitysvyöhykkeeltä kerätylle IOM-suodattimelle kertyneestä kokonaismassasta hengittyvässä pölyssä oli noin 1.8 % ja nanohiukkasfraktiossa noin 1.4 %, eli molemmissa melko pieni. Eniten alkuaineista esiintyi kalsiumia, rautaa ja natriumia (Kuva 37). Alumiinin, magnesiumin, kaliumin, titaanin ja sinkin mitatut pitoisuudet aiheutuvat suodatinmateriaalista.



Kuva 37. Kalustetehtaassa työntekijän hengitysvyöhykkeeltä esierottimen kanssa (nanohiukkaset) ja ilman (hengittävä pöly) kerätyiltä IOM-suodattimilta ICP-MS -analyysillä määritetyt 31 alkuaineen massapitoisuudet. Lisäksi kuvassa on suodattimilta määritetyt kokonaismassapitoisuudet.

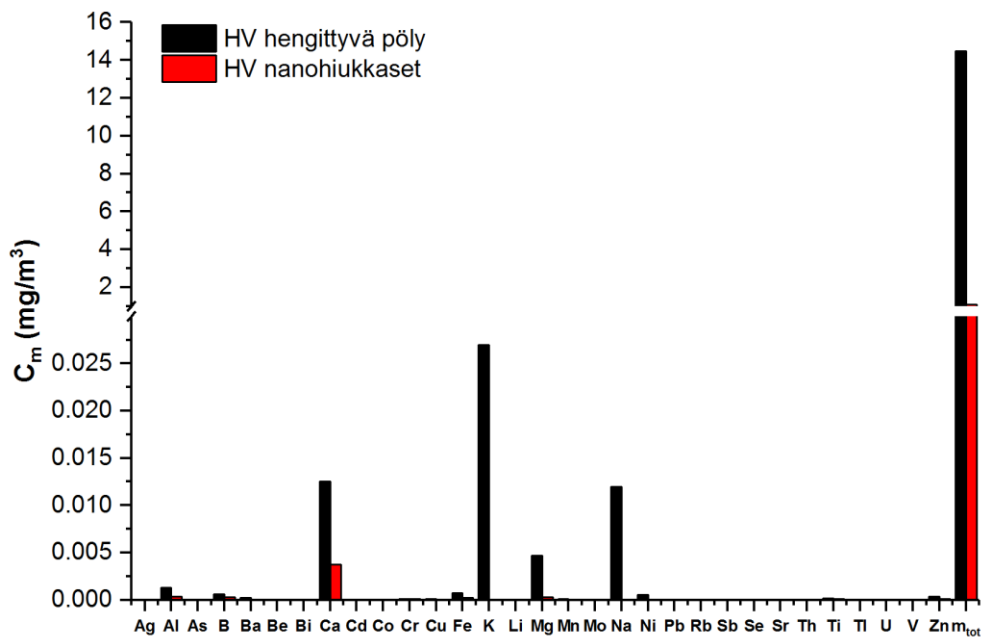
3.4 Leipomo

Taikinantekijän hengitysvyöhykkeeltä ilman impaktoria kerätyissä näytteissä esiintyi useiden mikrometrien kokoisia jauhohiukkasia, jotka EDS-analyysin perusteella sisälsivät hiiltä, happea, typpeä, rikkiä, fosforia (P) ja kaliumia (Kuva 38a). Impaktorin kanssa kerätyissä näytteissä isoja hiukkasia ei esiintynyt (Kuva 38b). Hengitysvyöhykkeeltä impaktorin kanssa kerätyissä näytteissä ja työpisteestä kerätyissä näytteissä jauhopöly esiintyi agglomeraattityyppisinä hiukkasina, jotka koostuivat pääasiassa hiilestä ja hapesta, sekä pienestä määrästä rikkiä tai piitä (Kuva 38b, d-f). Jauhopöly sisälsi myös nanokoluokan hiukkasia (Kuva 38f). Jauhopölyn lisäksi leipomon ilmassa esiintyi pallomaisia hiukkasia, jotka sisälsivät hiiltä, happea, rikkiä, kaliumia, piitä, natriumia, kalsiumia, ja klooria. Ainakin osa pallomaisista hiukkasista on todennäköisesti peräisin ulkoilmasta. Lisäksi leipomossa esiintyi palamisperäisiä noki-agglomeraatteja (Kuva 38c), jotka koostuivat hiilestä, ja hyvin pieniä pallomaisia hiukkasia (Kuva 38c), jotka todennäköisesti muodostivat uunien lämmityksen aikana lukumääräkokojakaumassa havaitun alle 50 nm:n hiukkasten moodin. EDS-analyysin perusteella nämä hiukkaset sisälsivät rikkiä, kaliumia, ja hiiltä.



Kuva 38. SEM-kuvia leipomossa esiintyvistä hiukkasista: **a)** suuria jauhohiukkasia taikinantekijän hengitysvyöhykkeellä, näyte kerätty ilman impaktoria, **b)** jauhoagglomeraatteja ja pallomaisia hiukkasia, näyte kerätty impaktorin kanssa taikinantekijän hengitysvyöhykkeeltä, **c)** lähikuva nokiagglomeraatista ja pieniä pallomaisia hiukkasia samassa kuvassa (kuvan oikeassa alalaidassa), **d)** jauhoagglomeraatteja, näyte kerätty ilman impaktoria työpisteestä, **e)** jauhoagglomeraatteja ja pallomaisia hiukkasia, näyte kerätty impaktorin kanssa työpisteestä, **f)** lähikuva nanokoluokan jauhohiukkasista.

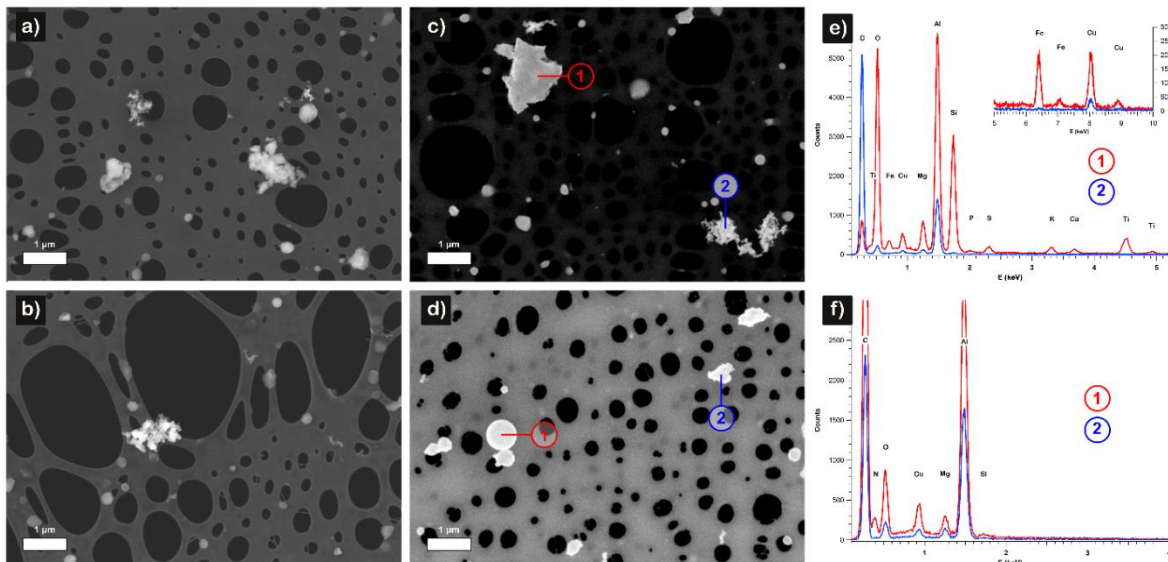
ICP-MS analyysillä määritettyjen 31 alkuaineen osuus hengitysvyöhykkeeltä kerätylle IOM-suodattimelle kertyneestä kokonaismassasta hengittyvässä pölyssä oli noin 0.4 % ja nanohiukkasfraktiossa noin 0.5 %, eli molemmissa hyvin pieni. Leipomossa suodattimille kerätyt kokonaismassapitoisuudet, varsinkin hengittyvän pölyn näytteessä, olivat tosin huomattavan suuria. Hengittyvässä pölyssä oli määritetyistä alkuaineista eniten kaliumia, kalsiumia, natriumia, ja magnesiumia (Kuva 39). Nanohiukkasjakeesta ei löytynyt kaliumia ja natriumia lainkaan, eniten oli kalsiumia.



Kuva 39. Leipomossa työntekijän hengitysvyöhykkeeltä esierottimen kanssa (nanohiukkaset) ja ilman (hengittyvä pöly) kerätyiltä IOM-suodattimilta ICP-MS -analyysillä määritetyt 31 alkuaineen massapitoisuudet. Lisäksi kuvassa on suodattimilta määritetyt kokonaismassapitoisuudet.

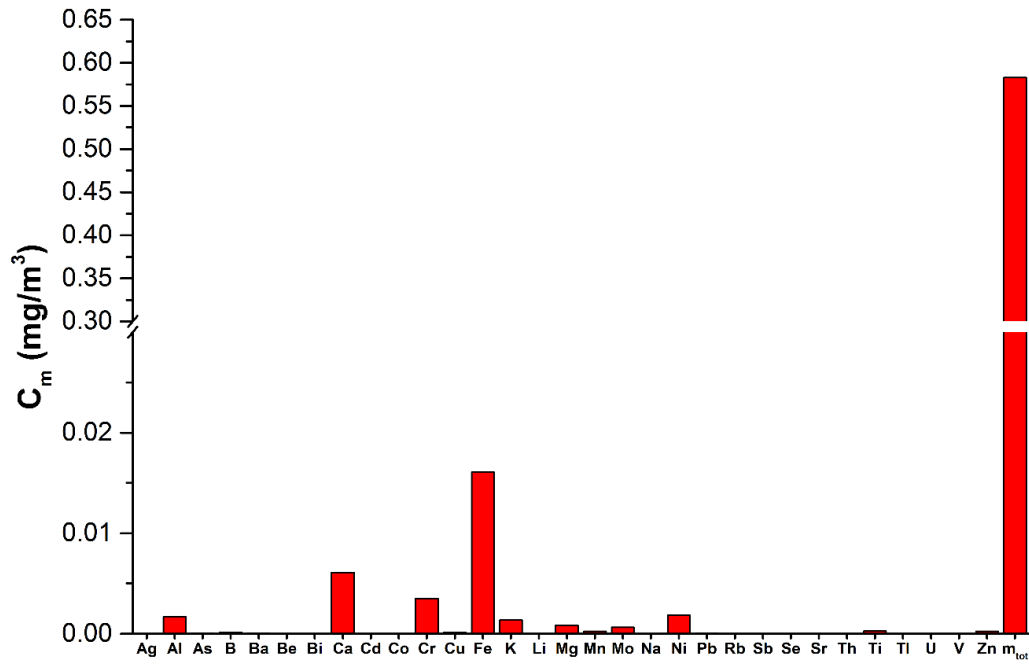
3.5 Kampaamo

Työpisteestä ja hengitysvyöhykkeeltä kerätyt elektronimikroskoopinäytteet eivät juurikaan eronneet toisistaan (Kuva 40a-d). Vaikutusta ei myöskään ollut sillä, käytettiinkö imukeräimen edessä impaktoria. Huoneilmassa esiintyi muodoltaan sekä pallomaisia että epäsäännöllisiä hiukkasia, ja agglomeraatteja. Agglomeraatteja esiintyi monen kokoisia ja EDS-analyysin perusteella ne sisälsivät pääasiassa hiiltä (Kuva 40e,f siniset käyrät) (Cu, Mg, ja Al piikit, kuten myös osa hapen piikistä, aiheutuvat taustasta eli keräysalustasta ja elektronimikroskoopin näytteenpidikkeistä). Pallomaiset hiukkaset sisälsivät hiilen lisäksi typpeä ja hieman happea (Kuva 40f, punainen käyrä). Epäsäännöllisen muotoiset hiukkaset olivat yleensä suurempia ja sisälsivät useampia alkuaineita, mm. titaania, rautaa, piitä, rikkiä, kaliumia, ja kalsiumia (Kuva 40e, punainen käyrä). Todennäköisesti kaikki kolme hiukkastyyppeä olivat enimmäkseen peräisin ulkoilmasta. Väri- ja vaalennusaineista vapautuneista haihtuvista yhdisteistä muodostuneet hiukkaset ovat luultavasti suurimmaksi osaksi niin kevyitä, että ne haihtuvat viimeistään elektronimikroskoopin sisällä vallitsevan vakuumin vaikutuksesta. Mittausten aikana kampaamossa käytetyt väri- ja vaalennusaineet sisälsivät lähinnä hiiltä, happea, typpeä, rikkiä, natriumia, kaliumia, piitä, fosforia, ja klooria.



Kuva 40. SEM-kuvia (a-d) ja EDS-spektrejä (e-f) kampaamossa esiintyvistä hiukkasista. Kuvat **a)** ja **c)**: näyte kerätty kiinteästä pisteestä värin levityksen ja vaikutuksen aikana, kuvat **b)** ja **d)**: näyte kerätty hengitysvyöhykkeeltä värjäytyjen hiusten kuivauksen aikana, **e)** ja **f)**: EDS-spektrit kuviin c ja d merkityistä hiukkasista 1 ja 2 (tässä järjestyksessä).

ICP-MS -analyysi hengitysvyöhykkeeltä kerätyltä IOM-suodattimelta (hengittyvä pöly) vahvisti, että hiukkaset sisälsivät mm. rautaa ja kalsiumia, mutta suodattimelta löytyi myös kromia ja nikkeliä, joita ei EDS-analyysissä havaittu (Kuva 41). ICP-MS analyysillä määritettyjen alkuaineiden osuus suodattimelle kerätystä kokonaismassasta oli 5.7 %.



Kuva 41. Kampaamossa työntekijän hengitysvyöhykkeeltä kerätyltä IOM-suodattimelta ICP-MS -analyysillä määritetyt alkuaineiden massapitoisuudet ja suodattimelta määritetty kokonaismassapitoisuus.

| MITTALAITE / KERÄIN | MITTAUSMENETELMÄ / MITATTAVA SUURE | MITTAUSALUE | MITTAUSPISTE | | |
|---|--|---|--------------|-----------------|-------------|
| | | | työpiste | hengitysvyöhyke | taustapiste |
| CPC 3775 (TSI Inc.) | kondensaatiohiukkaslaskuri / lukumääräpitoisuus | 4 nm – 3 µm | X | | |
| CPC 3776 (TSI Inc.) | kondensaatiohiukkaslaskuri / lukumääräpitoisuus | 2.5 nm – 3 µm | X | | |
| CPC 3007 (TSI Inc.) | kondensaatiohiukkaslaskuri / lukumääräpitoisuus | 10 nm – 1 µm | X | | X |
| P-Trak (TSI Inc.) | kondensaatiohiukkaslaskuri / lukumääräpitoisuus | 20 nm – 1 µm | | | X |
| DiSCmini (Testo AG) | diffuusiovaraaja / lukumääräpitoisuus, pinta-alapitoisuus (C_s ja C_{LDSA}), massapitoisuus, hiukkaskoko | 10 – 700 nm | | X | X |
| PartectorTEM (Naneos Particle Solutions GmbH) | diffuusiovaraaja / pinta-alapitoisuus (C_{LDSA}) | 10 nm → | | X | |
| NanoScan SMPS 3910 (TSI Inc.) | sähköinen hiukkaskokoluokittelija / lukumääräkokojakauma, lukumääräpitoisuus | 10 – 420 nm | X | | X |
| FMPS 3091 (TSI Inc.) | sähköinen hiukkaskokoluokittelija / lukumääräkokojakauma, lukumääräpitoisuus | 5.6 – 560 nm | X | | |
| Pegasor AQ™ Indoor | diffuusiovaraaja / pinta-alapitoisuus (C_s) | 10 nm – 2.5 µm | X | | X |
| NSAM 3550 (TSI Inc.) | diffuusiovaraaja / pinta-alapitoisuus (C_{LDSA} , alveolialue) | 20 nm – 1 µm | X | | |
| TEOM 1405 (Thermo Scientific) | gravimetri / massapitoisuus | 0 – 1x10 ⁶ µg/m ³ | X | | |
| DustTrak DRX 8533 (TSI Inc.) | optinen hiukkaslaskuri / eri hiukkasjakeiden osuus kokonaismassasta, massapitoisuus | 0.1 – 15 µm, 0.001 – 15 mg/m ³ | | | X |
| mini-LAS 11-R (GRIMM Aerosol Technik GmbH) | optinen hiukkaslaskuri / eri hiukkasjakeiden osuus kokonaismassasta, massapitoisuus | 0.3 – 20 µm | X | | |
| Dust Monitor 1.108 (GRIMM Aerosol Technik GmbH) | optinen hiukkaslaskuri / eri hiukkasjakeiden osuus kokonaismassasta, massapitoisuus | 0.3 – 30 µm | X | | |
| imukeräin | elektroni-mikroskooppinäytteet | | X | X | X |
| IOM-keräin | hengittyvän pölyn ($D_{50} = 100$ µm) massapitoisuus | | X | X | X |
| IOM-keräin + esierotin | nanohiukkasten ($D_{50} \approx 0.5$ µm) massapitoisuus | | X | X | |
| IOM-vahtokeräin | alveolijakeen ($D_{50} = 4$ µm) massapitoisuus | | X | | |

CPC. CPC:ssa hiukkasten kokoa kasvatetaan tiivistämällä hiukkasten pinnalle ylikylläistä butanoli- tai isopropanolihöyryä, jolloin ne voidaan havaita optisesti. Lukumääräpitoisuuden mitta-alueen yläraja riippuu mallista ja on $1 \cdot 10^5$ $1/\text{cm}^3$, $5 \cdot 10^5$ $1/\text{cm}^3$, $1 \cdot 10^7$ $1/\text{cm}^3$, ja $3 \cdot 10^5$ $1/\text{cm}^3$ tässä tutkimuksessa käytetyille malleille CPC 3007 (TSI), P-Trak 8525 (TSI), CPC 3775 (TSI), ja CPC 3776 (TSI) tässä järjestyksessä. CPC 3775 mittasi välillä esierottimen kanssa ja välillä ilman sitä.

NSAM. NSAM (TSI Model 3550) antaa laskentaohjelman tuloksena esimerkiksi keuhkojen alveolialueelle deponoituvien hiukkasten pinta-alapitoisuuden. Laitteen toiminta perustuu hiukkasten varaamiseen diffuusiovaraajalla, säädettävään ioniloukkuun ja hiukkasten varauksen mittaamiseen johtavalta suodattimelta elektrometrillä. Laite laskee elektrometrin mittaaman virran avulla pinta-alapitoisuuden käyttäen ICRP:n (International Commission on Radiological Protection) keuhkodepositiomallia (ICRP, 1994) ja tehden oletuksia hiukkasten ominaisuuksista (TSI, 2012). Laite ei mittaa hiukkasten kokonaispinta-alaa, vaan sen vaste on kalibroitu korreloimaan keuhkoihin deponoituvien hiukkasten pinta-alan kanssa. Kokoalue, jolla laitteen antamat tulokset ovat luotettavia on 20-400 nm (Asbach ym., 2009). NSAM mittasi välillä esierottimen kanssa ja välillä ilman sitä.

Pegasor AQTM Indoor. Pegasor AQTM Indoor -laitteen (CoorsTek Sensors) toiminta perustuu myös hiukkasten varaamiseen diffuusiovaraajalla. Laite antaa laskentaohjelman tuloksena hiukkasten kokonaispinta-alapitoisuuden, massapitoisuuden, lukumääräpitoisuuden ja hiukkaskoon. Hankkeessa käytössä oli laitteen prototyyppi.

DiSCmini. DiSCmini (Testo AG) varaa hiukkaset unipolaarisella diffuusiovaraajalla. Varatut hiukkaset menevät ensin diffuusioasteen läpi. Depoitusneiden hiukkasten kantama sähkövirta mitataan elektrometrillä. Toisessa vaiheessa loput hiukkaset kerätään suodattimelle, jolta myös mitataan sähkövirta elektrometrillä. Laitteen tallentama raakadata syötetään ohjelmistoon, jonka avulla saadaan hiukkasten kokonaispinta-alapitoisuus, keuhkojen alveolialueelle teoreettisesti deponoituvien hiukkasten pinta-alapitoisuus, lukumääräpitoisuus, laskennallinen massapitoisuus, ja keskimääräinen hiukkaskoko. DiSCminin edessä käytettiin laitteen mukana toimitettua impaktoria ($D_{50} = 0.7 \mu\text{m}$).

PartectorTEM. PartectorTEM (Naneos Particle Solutions GmbH) on diffuusiovaraaja. Se mittaa keuhkojen alveolialueelle teoreettisesti deponoituvien hiukkasten pinta-alapitoisuutta (C_{LDSA}). Koska PartectorTEM ei sisällä kiinteää esierotinta estämässä suurten hiukkasten pääsyä laitteeseen, eikä se toiminut hankkeessa kehitetyn esierottimen kanssa, sen edessä käytettiin välillä SMPS:n impaktoria estämään suurten hiukkasten pääsy mittalaitteeseen. SMPS:n impaktorin leikkausraja virtauksella $0.4 \text{ dm}^3/\text{min}$ on noin $0.5 \mu\text{m}$.

NanoScan SMPS. NanoScan SMPS (TSI Model 3910) koostuu syklonista ($D_{50} \approx 0.5 \mu\text{m}$), joka poistaa suuret hiukkaset, unipolaarisesta varaajasta, hiukkaskokoluokittelijasta, CPC:sta, ja laskentaohjelmasta. Varatut hiukkaset luokitellaan liikkuvuuskokonsa perusteella. CPC mittaa kunkin kokoluokan hiukkasten lukumääräpitoisuuden. Laskentaohjelman tuloksena saadaan lukumääräkokojakauma ja kokonaislukumääräpitoisuus.

FMPS. FMPS (TSI Model 3091) mittaa hiukkasten lukumääräkokojakauman yhden sekunnin välein. FMPS:n toiminta perustuu hiukkasten varaamiseen diffuusiovaraajalla ja sähköisen

liikkuvuuskoon mukaiseen luokitteluun. Hiukkaset havainnoidaan elektrometrieni avulla. Laskentaohjelma antaa lukumääräkokojakauman ja kokonaislukumääräpitoisuuden.

TEOM. TEOM (Thermo Scientific Model 1405) mittaa hiukkasten massapitoisuutta. Laitteen näytevirtaus pidetään vakiona (tässä mittauskampanjassa 2 dm³/min) ja hiukkaset kerääntyvät suodattimelle, jota punnitaan jatkuvatoimisesti, mikä mahdollistaa lähes reaaliaikaisen massapitoisuuden määrittämisen. TEOM mittasi välillä esierottimen kanssa välillä ilman sitä.

IOM-keräys. Hengittyvän pölyn ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$) ja nanohiukkasten ($D_{50} \approx 0.5 \mu\text{m}$) massapitoisuus määritettiin IOM-keräimillä (SKC Inc.) gravimetrisesti. Hiukkaset kerättiin nitroselluloosa-suodattimille (0.8 μm AAWP, Millipore) vetämällä ilmaa (2.0 dm³/min) suodattimen läpi pumpulla (SKC 224, SKC Inc.).

IOM-vahtokeräin. Pölyn hengittyvää jaetta ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$) ja alveolijaetta ($D_{50} = 4 \mu\text{m}$) kerättiin alveolijaevahtomuovilla (SKC) varustetulla IOM-keräimellä (Inhalable Dust Sampler SKC 225-70) selluloosaesterikalvosuodattimelle. Näytteitä kerättiin tilavuusvirtauksella 2.0 dm³/min. Näytteet analysoitiin Työterveyslaitoksen akkreditoitussa testauslaboratoriossa T013 (FINAS-akkreditointipalvelut, EN ISO/IEC 17025).

DustTrak DRX. DustTrak DRX (TSI Model 8533) mittaa reaaliaikaisesti eri hiukkasjakeiden (PM₁, PM_{2.5}, PM₄ (alveolijae), PM₁₀ (keuhkojoe), ja PM₁₅) massapitoisuudet. Mittaus perustuu hiukkasten optiseen havaitsemiseen. Laite kerää näytettä suodattimelle, joka punnitaan. Näin saadaan korjauskerroin, jonka avulla voidaan suhteuttaa laitteen antama tulos vastaamaan paremmin hiukkasten todellista massapitoisuutta.

Mini-LAS. Mini-LAS (GRIMM Aerosol Technik Model 11-R) on optinen hiukkaslaskuri, joka mittaa lukumäärää ja laskentaan perustuvaa massaa. Laite laskee tulokset työhygieenisille jakeille: hengittyvä pöly ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$), keuhkojoe ($D_{50} = 10 \mu\text{m}$), alveolijae ($D_{50} = 4 \mu\text{m}$). Laite kerää näytettä suodattimelle, joka punnitaan. Näin saadaan korjauskerroin, jonka avulla voidaan suhteuttaa laitteen antama tulos vastaamaan paremmin hiukkasten todellista massapitoisuutta.

Grimm Dust Monitor 1.108 (GRIMM Aerosol Technik) on optinen hiukkaslaskuri, joka mittaa lukumäärää ja laskentaan perustuvaa massaa. Laite laskee tulokset työhygieenisille jakeille: hengittyvä pöly ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$), keuhkojoe ($D_{50} = 10 \mu\text{m}$), alveolijae ($D_{50} = 4 \mu\text{m}$). Laite kerää näytettä suodattimelle, joka punnitaan. Näin saadaan korjauskerroin, jonka avulla voidaan suhteuttaa laitteen antama tulos vastaamaan paremmin hiukkasten todellista massapitoisuutta.

Hiukkasten koostumus. Osasta hengitysvyöhykkeeltä esierottimen kanssa (nanohiukkaset $D_{50} \approx 0.5 \mu\text{m}$) tai ilman (hengittyvä pöly $D_{50} = 100 \mu\text{m}$), tai työpisteeltä ilman esierotinta kerätyistä IOM-suodattimista määritettiin 31 alkuaineen (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Rb, Sb, Se, Sr, Th, Ti, Tl, U, V, Zn) massapitoisuudet induktiivisesti kytketty plasma-massa spektrometrillä (ICP-MS) (Model 7700, Agilent Technologies) standardin EN ISO 17294-2 mukaisesti. Analyysit teetettiin ostopalveluna Eurofins Scientific Finland Oy:ssä.

Hiukkasten morfologia. Hiukkasten muotoa ja koostumusta tutkittiin pyyhkäisy- (SEM; Sigma HD VP, Carl Zeiss NST) ja läpäisyelektronimikroskoopeilla (TEM, JEM-2100F, JEOL). SEM-kuvantamisessa käytettiin InLens-detektoria ja 2 kV kiihdytysjännitettä. Koostumusanalyysi tehtiin käyttäen energiaerotteista röntgenspektroskopiaa (Energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDS). Analyysissä käytettiin 10 kv kiihdytysjännitettä, kahta EDS-detektoria, ja Thermo NS7 analysaattoria (Thermo Scientific). TEM-kuvantamisessa käytettiin 200 kV kiihdytysjännitettä. EDS-analyysi tehtiin STEM-moodissa (scanning transmission electron microscope). Analyysissä käytettiin nestetyyppijäähdytteistä detektoria, jossa on Si(Li) kide ja Thermo NS7 analysaattoria (Thermo Scientific).

| | Materiaali, kemikaali, aine | Koje, laite, prosessi tai sovellus | Työtavat | Työympäristö |
|-----------------------------------|--|---|---|--|
| 1. Korvaaminen | Korvaaminen vähemmän haitallisella materiaalla jättämällä vähemmän hiukkasia tuottavalla materiaalla | Prosessin muuttaminen suljetuksi prosessiksi tai vähemmän hiukkasia tuottavaksi prosessiksi | Automaation lisääminen, robotit ja kauko-ohjaus | |
| 2. Vähentäminen | Olomuodon muuttaminen pastoja ja tahnoja käyttämällä Osittainen korvaaminen haitallisia aineita vähentämällä, pitoisuuksia pienentämällä ja laimentamalla | Prosessin säätö prosessiparametreja muuttamalla sekä prosessilämpötilaa säätämällä Kunnossapito säännöllisillä huoltotoimenpiteillä, siivoamisella ja järjestyksellä | Turvalliset työtavat, hyvät käytännöt, suunnitelmallisuus, työohjeet, perehdytys ja motivointi Työtahti sopivaksi, kaikille välineille oma paikka sekä työpiSTEEN siisteyden ja järjestyksen jatkuva ylläpito | |
| 3. Eristäminen | | Prosessin eristäminen siirtämällä prosessi toiseen tilaan, koteloidulla prosessi, suojavaerhoilulla, välineillä tai suojailevillä | Prosessin etävalvonta | Työtilan tilaratkaisut prosessin sijoittelulla, nanohiukkasia tuottavien prosessien erottamisella, osastoinnilla, kulkureittien suunnittelulla ja mahdollistamalla torjuntaratkaisujen toteuttamisen |
| 4. Vaikuttaminen leviämisseittiin | | Kohdeilmanvaihto | Kostuttaminen ja pölyämisen estoa-aineiden käyttö | Ilmanvaihdosta huolehtiminen: Ilmanvaihtojärjestelmä, sekoittava ilmanjako, syrjäytyksilmanvaihto, ilmajärjestelmä, ilmasuihkut, painesuhteet sekä kunnossapito, tarkastukset ja puhdistukset |
| 5. Altistumisen välttäminen | | | Altistumisajan vähentäminen työnkierroilla, altistuvien henkilöiden määrän vähentämisellä, prosessin sekä työtehtävien ajoituksella ja tilaan pääsyn estämisellä Puhdistusmenetelmät: paineilman käytön kieltäminen ja kostealla pyyhintä | Valvomot, joissa prosesseja seurataan, puhtaat taukotilat sekä turvallisen käyttäytymisen mahdollistaminen |
| 6. Henkilönsuojaimet | | | Henkilönsuojainten käyttö Hiukkasilta suojaavat hengityksensuojaimet suojaavat myös nanohiukkasilta | Henkilönsuojainten käytön tarpeen merkitseminen selvästi alueilla ja työtehtävittäin, joissa henkilönsuojaimia on käytettävä Tilat henkilönsuojainten puhdistusta ja säilytystä varten |

Buringh ym. (1992). Mukaillen.

Saatavilla www.tti.fi/nanoturvallisuus