



Työterveyslaitos | Arbetshälsöinstitutet
Finnish Institute of Occupational Health

Metallintyöstön kohdepoistoilman hallinta

TSR LOPPURAPORTTI NRO 113256

Arto Säämänen
Tomi Kanerva
Markku Linnainmaa
Ilpo Ahonen
Matti Lehtimäki
Matti Niemeläinen
Tapio Kalliohaka
Pirkko Pihlajamaa





Työterveyslaitos | Arbetshälsoinstitutet
Finnish Institute of Occupational Health

Metallintyöstön kohdepoistoilman hallinta

TSR LOPPURAPORTTI NRO 113256

Arto Säämänen, Tomi Kanerva, Markku Linnainmaa ja Ilpo Ahonen,
Työterveyslaitos

Matti Lehtimäki, Matti Niemeläinen ja Tapio Kalliohaka, Teknologian
tutkimuskeskus VTT Oy

Pirkko Pihlajamaa, Tampereen ammattikorkeakoulu

Työterveyslaitos

Työympäristö

PL 40

00251 Helsinki

www.ttl.fi

Toimitus: Arto Säämänen

Kansi: Ella Smeds

© 2016 Työterveyslaitos ja kirjoittajat

Julkaisu on toteutettu Työsuojelurahaston tuella.

Tämän teoksen osittainenkin kopiointi on tekijänoikeuslain (404/61, siihen myöhemmin tehdyne muutoksineen) mukaisesti kielletty ilman asianmukaista lupaa.

ISBN 978-952-261-669-2 (nid.)

ISBN 978-952-261-668-5 (PDF)

Juvenes Print - Suomen Yliopistopaino Oy, Tampere, 2016

TIIVISTELMÄ

Metallintyöstönesteille altistuminen aiheuttaa työntekijöille sekä iho- että hengitystieoireita. Metallien työstön aikana työstönesteistä muodostuu aerosolia, jossa on mukana sekä hiukkasmaisia että kaasumaisia terveydelle haitallisia yhdisteitä. Työstönesteistä peräisin oleville yhdisteille altistumisen vähentämiseksi työstökeskukset on yleensä varustettu kohdepoistoilla ja niihin liitetyillä suodatuslaitteistoilla. Tässä tutkimuksessa selvitettiin työstökeskuksissa yleisesti käytettävien kohdepoistoilman käsittelymenetelmien toimintaa sekä annettiin suosituksia työstönesteellä likaantuneen ilman käsittelemiseksi.

Tutkimuksessa selvitettiin neljässä metallien koneistusta tekevässä yrityksessä yhteensä 11:n eri suodatuslaitteiston toimintaa. Tarkoituksena oli selvittää, miten kohdepoistoilman eri käsittelytavat vaikuttavat työilman laatuun. Tutkittavia käsittelytapoja olivat: 1) kohdepoistoilman kierättäminen takaisin työtilaan hiukkassuodatuksen jälkeen, 2) kohdepoistoilman johtaminen ulos sekä 3) kohdepoistoilman suodattamisen tehostaminen lisäämällä hiukkassuodatuksen ohkeen myös kaasujen suodatus. Kaasujen suodatuksen tehostamiseksi innovoitiin uudentyyppinen metallintyöstön aerosolierotin, jonka toimintaa kokeiltiin yhdessä työstökeskuksessa. Ilman epäpuhtauksien pitoisuuksia sekä suodatusyksikköön menevästä että sieltä työtilaan palautettavasta ilmasta mitattiin varsin laajalla kirjolla: aerosolin massapitoisuus ja hiukkaskokojakauma, alkanoliamiinien kokonaispitoisuus, haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuus sekä formaldehydin pitoisuus. Näitä pitoisuuksia verrattiin työntekijän hengitysvyöhykkeeltä ja tuotantotilan yleisilmasta mitattuihin pitoisuuksiin. Endotoksiinien pitoisuus sekä työstönesteestä että työpaikan ilmasta mitattiin muutamassa yrityksessä.

Lukuun ottamatta alkanoliamiinien kokonaispitoisuutta ja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuutta (TVOC) ilman epäpuhtauksien pitoisuudet työilmassa olivat pieniä. Alkanoliamiinien kokonaispitoisuus työpaikan ilmassa vaihteli välillä 0,03 – 0,74 mg/m³ mediaanin ollessa 0,19 mg/m³. Hengitysvyöhykkeeltä mitatut pitoisuudet olivat keskimäärin samoja kuin työtilan yleisilmasta mitatut pitoisuudet. Työntekijöiden altistuminen ilman epäpuhtauksille tapahtui siis pääosin työtilan yleisilman kautta. Mitatuista ilman alkanoliamiinien kokonaispitoisuuksista 77 % ylitti Työterveyslaitoksen suositteleman tavoitetason 0,1 mg/m³. Kohdepoistoissa olevat HEPA-suodattimet pidättävät hyvin hiukkasmaisia epäpuhtauksia, mutta kaasumaisessa muodossa olevia epäpuhtauksia, kuten alkanoliamiineja ja VOC-yhdisteitä hiukkassuodattimet eivät pidättäneet juuri lainkaan. Suodatuslaitteistojen jälkeen mitatut alkanoliamiinipitoisuudet olivat selvästi korkeampia (1,2 – 3,7 -kertaisia) työtilan ilmasta mitattuihin pitoisuuksiin verrattuna. Tämä merkitsee sitä, että kohdepoistoilman kierrättäminen takaisin työtilaan liikaa sen ilmaa. Ilman laatutavoitteiden saavuttamiseksi suodattimien kautta työtilaan joutuvien epäpuhtauksien laimentaminen vaatii siis suurempia ulkoilmavirtoja, jolloin kierrättämisen avulla saavutettavat säästöt pienenevät.

Kohdepoistoilman ulosjohtamisen vaikutusta työilman pitoisuuksiin pystyttiin seuraamaan yhdessä tehtaassa. Sekä alkanoliamiinien että haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuudet työilmassa vähenivät 60–70 % työstökoneiden kohdepoistoilman ulosjohtamisen seurauksena. Yhdessä tehtaassa kokeiltiin aktiivihillisuodatuksen lisäämistä konekohtaisiin suodatusyksiköihin. Uutena aktiivihillisuodatin poisti myös kaasufaasissa olevat ilman epäpuhtaudet, kuten alkanoliamiinit ja haihtuvat orgaaniset yhdisteet. Kuitenkin jo muutaman viikon jälkeen suodattimet kuormittuivat ja ryhtyivät läpäisemään epäpuhtauksia. Uudentyyppisellä aerosolierottimella aktiivihillisuodattimen kuormittumista pystyttiin kuitenkin vähentämään ja myös kaasufaasissa olevat epäpuhtauksia pystyttiin suodattamaan entistä paremmin. Tämän raportin johtopäätöksissä ehdotetaan kohdepoistoilman käsittelytapoja eri tilanteisiin.

Metallintyöstönesteistä syntyvien ilman epäpuhtauksien hallinta on kokonaisuus, johon vaikuttavat myös monet muut tekijät kuin pelkästään kohdepoistoilman käsittelyn tehokkuus. Tutkimusten aikana havaittiin, että konekohtaiset poistoilmavirrat vaihtelivat paljon ja olivat usein varsin pieniä. Liian pieni poistoilmavirta työstökoneen koteloinnista ei pysty estämään työstössä syntyvän aerosolin leviämistä koteloinnin aukoista työtilan ilmaan. Pienistä konekohtaisista poistoilmavirroista aiheutui myös, että ilman virtausnopeudet kohdepoistolaitteisiin liittyvissä kanavistoissa olivat usein liian pieniä ja niinpä kanavistoihin olikin kertynyt paksu kerros likaa. Tästä saattaa puolestaan aiheutua mm. palovaara. Työntekijöiden altistumiseen ilman epäpuhtauksille vaikuttaa myös työstönesteen huolto. Johtopäätöksissä suositellaan myös muita toimenpiteitä, joita tarvitaan kokonaisvaltaiseen altistumisen hallintaan.

ABSTRACT

Exposure to metalworking fluids can cause skin and respiratory symptoms to workers. During machining metalworking fluid aerosol is formed containing both particulate and gaseous compounds harmful to health. Machining centers are usually equipped with air filtering units in order to reduce exposure to airborne contaminants. In this study, the performance of the exhaust air treatment methods commonly used in machining centers were examined, and recommendations for the handling of the contaminated air were given.

The study was performed in four metal machining companies where a total of 11 different air filtering units were examined. The aim of the study was to find out how the different air handling methods were influencing on the indoor air quality in machining shops. Studied air handling methods were: 1) the recirculation of the local exhaust ventilation air back to the workspace after particulate filtration, 2) leading the air from the local exhaust ventilation directly to outdoors, and 3) enhance the filtration by adding the filtration of gaseous compounds to the existing air filtering systems. In order to enhance gas filtration systems, a new type of air handling unit was developed. The performance of this new air handling unit was tested in one machining center. The airborne contaminant was measured in a very broad spectrum: the aerosol mass concentration and particle size distribution, the total concentration of alkanolamines, the total concentration of volatile organic compounds (TVOC), as well as the concentration of formaldehyde. The contaminant concentrations were measured both from the air before and after the air filtering units. These levels were compared to the concentrations measured at the workers' breathing zone and in the area samples in the production premises.

In general, the concentrations of air pollutants in the workplace were small. However, the total concentration of alkanolamines and VOCs made an exception. The concentration of alkanolamines ranged from 0.03 - 0.74 mg/m³, the median being 0.19 mg/m³. The measured breathing zone concentrations were on average at the same level as those measured in the area samples. Workers' exposure to air pollutants, therefore, was caused by the contamination of the general workplace air. From the measured concentrations of alkanolamines, 77% exceeded the target level of 0.1 mg/m³ recommended by the Finnish Institute of Occupational Health. The HEPA filters commonly used in air filtration units retain particulate contaminants but the contaminants found in the vapour phase, such as alkanolamines and volatile organic compounds penetrate the filters. The measured alkanolamine concentrations after filtering equipment were significantly higher (1.2 - 3.7 times) compared to the measured concentration in the general workplace air. This means that returning air from the local exhaust ventilations system back to the workspace air increased the contaminant levels and thus, increased the workers' exposure. In order to reach the target level for alkanolamines, more dilution ventilation is thus needed, which decreases the savings obtained by recycling.

In one factory it was possible to compare the difference between the recirculation of the LEV air back to the production hall and leading the LEV air out of the building. The concentrations of both alkanolamines and volatile organic compounds in workplace air decreased by 60-70% as a result of leading the LEV air out of the building. In another factory, the influence of activated carbon filters added to the existing air filtration units was examined. When the activated carbon filters were new, they removed also the gaseous air pollutants such as alkanolamines and volatile organic compounds. However, after a few weeks, the activated carbon filters overloaded and began to penetrate impurities. With a new type of air handling unit developed in this study it was possible to reduce the loading of the activated carbon filter and the impurities in the gas phase were able to filter out even better. The conclusions of this report proposes guidance on treatment of the local exhaust ventilation air from the machining centers.

However, the control of air pollutants generated during the metal machining is influenced also by many other factors than just the effectiveness of local exhaust air treatment. During this study it was found that the exhaust air flow rates from a single machining center varied greatly and were often quite low. Too low air flow rate cannot prevent the aerosol generated during machining spreading out from the enclosure of the machining center. Low air flow rates also caused that the air velocities in the exhaust ducts were often too small causing the accumulation of a thick layer of dirt inside the ductwork. This may in turn result in e.g. a risk of fire. The maintenance of the metalworking fluid also affects workers' exposure to airborne contaminants. In the conclusions also other measures needed for comprehensive exposure control is recommended.

ALKUSANAT JA KIITOKSET

"Kohdepoistoilman suodattaminen ja palauttaminen metallin työstössä - kannattavuus ja vaikutukset työilman laatuun" – hankkeessa selvitettiin nykyisin käytössä olevien kohdepoistojen suodatuslaitteiden toimintaa ja niiden vaikutusta työilman laatuun ja työntekijöiden altistumiseen sekä suodatuksen aiheuttamia vaikutuksia. Tarkasteluun otettiin mukaan myös vaihtoehdot kohdepoistoilman käsittelymenetelmät. Hankkeen tuloksena laadittiin suositukset metallintyöstönesteellä likaantuneen kohdepoistoilman käsittelylle eri tilanteissa.

Hanke toteutettiin Työterveyslaitoksen, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n ja Tampereen ammattikorkeakoulun yhteistyönä. Hankkeen rahoitukseen ovat osallistuneet lisäksi Työsuojelurahasto, Acgo Power Oy, Valtra Oy ja Sandvik Mining and Construction Oy. Hankkeen projektipäällikkönä on toiminut vanhempi asiantuntija Arto Säämänen Työterveyslaitokselta. Hankkeen ohjausryhmään ovat kuuluneet Anna-Maria Kurka Työsuojelurahastosta, Ville Yli-Jama Acgo Power Oy:stä, Kari Kiiskinen Valtra Oy:stä, Ville Ylinen Sandvik Mining and Construction Oy:stä, Johannes Hyrynen Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:stä, Perttu Heino Tampereen ammattikorkeakoulusta sekä Rauno Pääkkönen ja Tuula Oksanen Työterveyslaitokselta.

Tutkimustyön läpivientiin on ratkaisevasti vaikuttanut kohdeyritysten aktiivinen osallistuminen ja yrityksistä saatu monipuolinen tuki hankkeelle. Erityiskiitoksen ansaitsee myös Aisikon Oy:n toimitusjohtaja Arto Taisto, jonka apu kohdepoistoilman ulosviennin vaikutusten tutkimuksessa oli korvaamaton. Tutkijaryhmä haluaa kiittää kaikkia tutkimukseen osallistuneita myönteisestä suhtautumisesta ja arvokkaasta avusta tutkimuksen eri vaiheissa.

Tampereella syyskuussa 2016

LYHENTEET

BoxPlot	Ruutu- ja janakuvaaja, jossa havaintojen ylä- ja alaneljännes kuvataan ruudulla. Ruudun keskellä oleva viiva kuvaa havaintojen mediaania. Ruudun päissä olevat janat kuvaavat suurinta ja pienintä havaintoa.
CAS	Chemical Abstract Services, kemiallisten yhdisteiden tunnistenumerojärjestelmä
DOP	Di-oktyyliftalaatti, nykyisin korvattu mm. dietyyliheksyylibakaaatilla (DESH), suodatintestauksessa käytetty nestemäinen kemiallinen yhdiste, josta tuotetaan tarvittavat testihiukkaset
GESTIS	Saksalainen vaarallisten kemikaalien tietojärjestelmä
HTP	Haitalliseksi tunnettu pitoisuus
LC-MS/MS	Nestekromatografi, johon on yhdistetty tandem massaspektrometri
OEL	Occupational Exposure Limit, Työperäisen altistumisen raja-arvo
TVOC	Total volatile organic compounds, haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuus, n-heksaanin ja n-heksadekaanin välinen kromatogrammin alue
UPLC	Erittäin korkean suorituskyvyn nestekromatografi
VOC	Volatile organic compounds, haihtuvat orgaaniset yhdisteet

SISÄLLYS

1	Tausta.....	11
1.1	Metallintyöstönesteet.....	11
1.2	Aerosolin muodostuminen metallintyöstössä.....	11
1.3	Altistuminen	13
1.4	Terveysvaikutukset, raja-arvot ja tavoitetasot.....	13
1.5	Alkanoliamiinit leikkuunesteissä.....	15
1.6	Metallintyöstönesteelle altistumisen vähentäminen.....	16
1.6.1	Metallintyöstönesteaaerosolin suodattaminen.....	16
1.6.2	Nykyiset suodatusratkaisut ja niiden arviointi	18
2	Tavoitteet	20
3	Tutkimusasetelma, aineisto ja menetelmät	20
3.1	Tutkimuskohteet ja käytetyt työstönesteet.....	20
3.2	Ilman epäpuhtauksien mittaukset.....	23
3.3	Metallin työstön aerosolierotin.....	25
3.3.1	Laboratoriotestit.....	26
3.3.2	Kenttätestit.....	26
4	Tulokset ja niiden tarkastelu	27
4.1	Työstökeskusten kohdepoistojärjestelmien toiminta.....	27
4.2	Ilman laatu ennen suodatinyksikköä.....	29
4.2.1	Lämpötila ja kosteus.....	29
4.2.2	Aerosolit	31
4.2.3	Alkanoliamiinit ja muut amiinit	33
4.2.4	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet ja muut ilman epäpuhtaudet	35
4.3	Ilman laatu suodattimen jälkeen.....	36
4.3.1	Alkanoliamiinit ja muut amiinit	36
4.3.2	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet.....	38

4.4	Työilman laatu ja työntekijän altistuminen	39
4.5	Kohdepoistoilman käsittely ja altistumisen vähentäminen.....	42
4.5.1	Ulos johtamisen vaikutus.....	42
4.5.2	Aktiivihiihtisuodatuksen vaikutus.....	44
4.6	Kohdepoistoilman kierrättämisen vaikutus yleisilmanvaihdon tarpeeseen.....	47
4.6.1	Laimennusilmanvaihdon tarve.....	47
4.6.2	Kustannukset	48
4.7	Metallin työstön aerosolierotin.....	49
4.7.1	Laboratoriokokeet.....	49
4.7.2	Kenttäkokeet.....	52
5	Johtopäätökset	56
5.1	Yleiset johtopäätökset.....	56
5.2	Parannusehdotukset nykyratkaisuihin.....	57
5.3	Edellytykset epäpuhtauksien tehokkaaseen ja taloudelliseen hallintaan.....	59
6	Lähteet	60

1 TAUSTA

1.1 Metallintyöstönesteet

Suomessa on noin 20 000 metallintyöstäjää, jotka valmistavat koneistamalla erilaisia osia ja rakenteita metallista ja muista materiaaleista mm. sorvaamalla, poraamalla, jyrsimällä ja hiomalla. Työstöprosesseissa käytetään yleisesti metallintyöstönesteitä eli lastuamiskeinoja mm. jäähdyttämiseen ja voiteluun sekä poistamaan työstöerästä ja -kappaleista irronnutta kiinteää metallijätettä. Työstönesteet jaotellaan perinteisesti neljään eri tyyppiin: öljyperustaisiin lastuamiskeinoihin, synteettisiin lastuamiskeinoihin, puolisynteettisiin lastuamiskeinoihin sekä lastuamiskeinoihin (Gauthier 2003, Cohen & White 2006, KAMAT). Lastuamiskeinoet sisältävät paljon erilaisia yhdisteitä, kuten voitelevia mineraali-, kasvi- tai eläinöljyjä, erilaisia synteettisiä voiteluaineita sekä eri määrän lisäaineita, kuten pinta-aktiivisia aineita, korroosionestoaineita, biosidejä, pH:n säätäjiä ym. Keinoet laimennetaan vedellä ennen käyttöä. Useimmat metallintyöstönesteet sisältävät erilaisia hiilivetyjä, jotka höyrystyvät työstön aikana ainakin jossain määrin. Tyypillisesti höyrönpaineet ovat välillä 10^{-4} – 10^{-11} Pa (Leith ym. 2003).

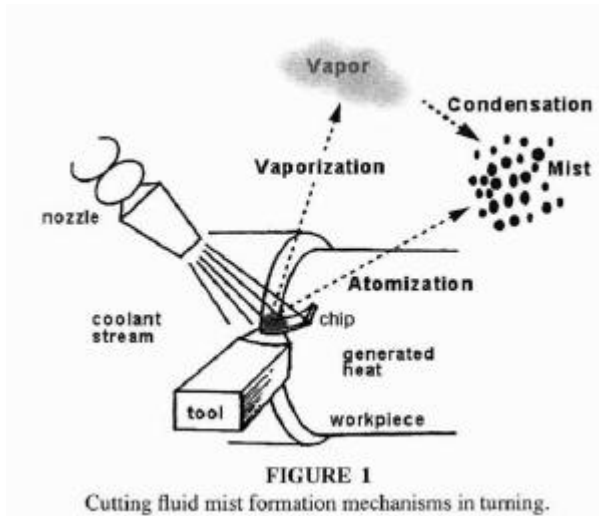
1.2 Aerosolin muodostuminen metallintyöstössä

Koneistamisen aikana metallintyöstönesteisiin kohdistuu erilaisia dynaamisia voimia, kuten keskipakovoimia, törmäysvoimia sekä korkean paineen ja lämpötilan aiheuttamaa työstönestesumun ja -höyrön muodostumista. Tämän seurauksena syntynyt aerosoli on jakaumaltaan polydispersiä. Syntynyt aerosoli saattaa sisältää erilaisia altisteita, kuten työkalusta ja/tai työstettävästä kohteesta peräisin olevia kiinteitä tai liuenneita metalleja, työstönesteeseen mahdollisesti syntyneitä mikrobeja tai niiden osia (esim. endotoksiineja) sekä työstönesteestä peräisin olevia tai työstönesteen kontaminoituessa syntyviä erilaisia kemiallisia yhdisteitä. Työstön aikana työkalun leikkauskohdassa esiintyy korkeita lämpötiloja, jolloin osa metallintyöstönesteessä olevista yhdisteistä höyrystyy ja esiintyy aerosolissa ainakin osittain kaasufaasissa (Michalek ym. 2003, Gauthier 2003). Työstönesteen haihtuminen ja uudelleen kondensoituminen onkin työstönestesumun muodostuksessa huomattavasti tärkeämpi mekanismi kuin nesteen sumutus (Michalek ym. 2003) (Kuva 1).

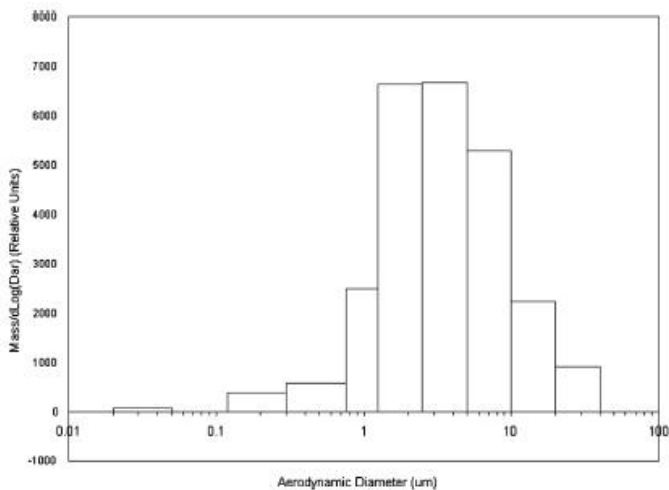
Heitbrink ym. (2000b) mukaan työkalun pyörimisnopeuden ja työstönesteen virtausnopeuden kasvattaminen lisäävät työstönesteaerosolin muodostumista. Pyörimisnopeuden vaikutus oli kehänopeuden toiseen tai kolmanteen potenssiin. Suurilla materiaalin poistonopeuksilla oli suurin aerosolin tuotto (Michalek ym. 2003).

Sen sijaan työkalun pyörimisnopeudella oli vain vähäinen vaikutus syntyvän aerosolin hiukkaskokoon (Heitbrink ym. 2000b). Koneistuskeskuksista työtilaan päässeeseen aerosolin massamediaanhalkaisijat ovat vaihdelleet välillä $0,6 \mu\text{m}$ – $3,3 \mu\text{m}$ (Sioutas 1999, Dasch ym. 2005) riippuen

konetyypistä, työstökeskuksen koteloinnista ja käytetystä kohdepoistoilman suodatuksesta (Kuva 2).



Kuva 1. Metallintyöstönesteaaerosolin muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä (Michalek ym.. 2003)



Kuva 2. Esimerkki MOUDI-impaktorilla mitatusta hiukkaskokojaukumasta työtilasta koneistuksen aikana (Dasch ym. 2005).

1.3 Altistuminen

Työntekijöillä esiintyy yleisesti oireita, vaikka työpaikkamittausten perusteella konepajojen ilmanlaatu on keskimäärin hyvä verrattuna työhygieenisiin raja-arvoihin. Työterveyslaitoksen Metallintyöstäjä-projektissa (Suuronen ym. 2005) mitattiin työntekijöiden altistumista ilman epäpuhtauksille 10 koneistustyöpaikassa (Taulukko 1). Myös muut tutkimukset osittavat, että yksittäisten altisteiden pitoisuudet koneistustöissä ovat yleensä pieniä. Altistumiseen vaikutti eniten työtehtävä, paineilman käyttö ja hiontatyövaiheiden esiintyminen työssä. Tärkeitä olivat myös katkaisutyövaiheiden esiintyminen ja koneen kotelointi (Lillienberg ym. 2008). Työntekijöiden altistuminen mikrobeille ja endotoksiineille voi olla suurta, jos työstöneste on saastunut mikrobeilla. Altistuminen on suurempaa sorvauksessa ja telojen hionnassa kuin muissa koneistustöissä (Laitinen ym. 1999).

Vaikka ilman epäpuhtauksien pitoisuudet konepajoissa olivat selvästi raja-arvoja pienemmät, havaittiin sekä ylä- että alahengitystieoireiden riskin olevan suurempi niillä työntekijöillä, jotka altistuivat keskimääräistä aerosolipitoisuutta suuremmalle pitoisuudelle (Suuronen 2009). Suojautumisessa havaittiin suuria vaihteluita, ja vain noin kolmasosassa koneista oli toimiva paikallispoisto ja kotelointi (Suuronen 2009).

Taulukko 1. Metallintyöstäjä-projektin altistumismittausten yhteenveto (Suuronen ym. 2005)

Altiste	Keskiarvo	Vaihteluväli
Hengittyvä pöly, mg/m ³	0,78	<0,14 – 2,0
Öljysumu, mg/m ³	0,14	<0,01 – 0,60
Aldehydit, mg/m ³	0,095	0,026 – 0,38
Kokonais-VOC, mg/m ³	1,9	0,34 – 4,5
Alkanoliamiinit, mg/m ³	0,11	<0,004-0,345
Endotoksiinit, EU/m ³	18	<1,3 – 290
Bakteerit, CFU/m ³	120	50 – 220
Sienet, CFU/m ³	550	<100 – 1600

1.4 Terveysvaikutukset, raja-arvot ja tavoitetasot

Käytettyjen metallintyöstönesteiden on todettu aiheuttavan työntekijöille ihottumaa ja hengitystieoireita (Linnainmaa ym. 2003, Cohen & White 2006, Suuronen 2009). Hengitystieoireita esiintyy metallintyöstäjillä runsaasti. Metallintyöstönesteiden on kuvattu aiheuttavan erilaisia hengitystieoireita, kuten nuhaa, yskää, hengenahdistusta, limannousua, kroonista bronkiittia, astmaa ja allergista alveoliittia (Henriks-Eckerman ja Suuronen 2009). Vuosina 2002-2003 toteutetussa puhelinhaastattelussa (n=726 koneistajaa) 31 % vastaajista ilmoitti kärsineensä työ-

hön liittyvistä hengitystie- ja silmäoireista (Suuronen 2009). Ylähengitystieoireiden riski metallintyöstönesteille altistuneilla onkin noin nelinkertainen vertailuryhmään nähden. Nuhien, nenä- ja silmäoireiden yleisyys viittaakin työperäisestä altistumisesta aiheutuvaan epäspesifiseen ylähengitysteiden ärsytykseen (Suuronen ym. 2005). Metallintyöstäjillä on havaittu myös jossain määrin kohonnut riski sairastua astmaan (Suuronen 2009). Oireiden ja tautien aiheuttajina voivat olla sekä metallintyöstönesteiden kemialliset ainesosat että niiden huono mikrobiologinen laatu (Linnainmaa ym. 2003, Cohen & White 2006, Suuronen 2009).

Metallintyöstönesteille ei ole määritelty omaa haitalliseksi tunnettua pitoisuutta tai muuta *työhygieenistä raja-arvoa*. Yleisesti altistumismittausten tulkinnessa on käytetty esimerkiksi öljysumun raja-arvoa (Cohen & White 2006, Suuronen 2009). Hengitystieoireita voivat aiheuttaa lukuisat eri metallintyöstöneste-aerosolien ainesosat tai niillä voi olla yhteisvaikutuksia. Esimerkiksi työpaikan ilman formaldehydipitoisuus korreloi hyvin työstönesteen triaatsiini-pitoisuuden kanssa (Linnainmaa ym. 2003). Joillekin metallintyöstönesteissä esiintyville yksittäisille yhdisteille on määritelty raja-arvot työperäiselle altistumiselle (Taulukko 2). Kuitenkin altistumista tulisi yksittäisten komponenttien vertailun sijasta arvioida kokonaisuutena. Metallintyöstönesteelle altistumisen arvioinnissa yleisesti käytetty öljysumun pitoisuus ei kuvaa luotettavasti altistumista veteen sekoitettaville työstönesteille. Työterveyslaitoksen tavoitetasomuistiossa Henriks-Eckerman ja Suuronen (2009) esittävät metallintyöstöneste-aerosolille altistumisen indikaattoriryhdisteeksi alkanoliamiinien yhteenlaskettua pitoisuutta ja sen *tavoitetasoksi* 0,1 mg/m³ (8h).

Taulukko 2. Metallintyöstönesteiden käytössä ilmaan vapautuvia kemiallisia altisteita sekä niiden työhygieenisia raja-arvoja.

Altiste	HTP-arvo tai TTL:n tavoitetaso
Öljysumu	5 mg/m ³
Hengittyvä pöly	5 mg/m ³ (orgaaninen pöly, 8h) 10 mg/m ³ (orgaaninen pöly, 15 min) 10 mg/m ³ (epäorgaaninen pöly) 2 mg/m ³ (TTL:n tavoitetaso yleiselle pölylle) (Hyytinen E-R ym. 2016)
Alveolijae	0,5 mg/m ³ (TTL:n tavoitetaso yleiselle pölylle) (Hyytinen E-R ym. 2016)
2-aminoetanoli (monoetanoliamiini)	2,5 mg/m ³ (8h) 7,6 mg/m ³ (15 min)
Dietanoliamiini	2 mg/m ³ (8h)
Trietanoliamiini	5 mg/m ³ (8h)
Morfoliini	36 mg/m ³ (8h) 72 mg/m ³ (15 min)

Altiste	HTP-arvo tai TTL:n tavoitetaso
Formaldehydi	0,37 mg/m ³ (8h) 1,2 mg/m ³ (kattoarvo)
Alkanoliamiinit (yhteenlaskettu pitoisuus)	0,1 mg/m ³ (Työterveyslaitoksen tavoitetaso)
Endotoksiinit	90 EU/m ³ (Alankomaiden ja Pohjoismaiden asiantuntijaryhmä)
TVOC	3000 µg/m ³ (Teollisuusilman viitearvo) 300 µg/m ³ (Työterveyslaitoksen tavoitetaso)

1.5 Alkanoliamiinit leikkuunesteissä

Alkanoliamiineja lisätään muiden amiini- ja boraattiyhdisteiden ohella työstönesteeseen yleensä suojaamaan metallipintoja korroosiolta (OECD 2004). Korroosio-inhibiittoreita on nestetiivisteessä yleensä 4-8 %. Käyttöliuokseksi neste laimennetaan vedellä noin 5 % liuokseksi.

Taulukko 3. Tutkimuksessa käsiteltyjen alkanoliamiinien ja eräiden muiden amiinien ominaisuuksia sekä työperäisen altistumisen raja-arvoja (OEL) (GESTIS).

Yhdiste	CAS nro	Höyryn- paine Pa	Kiehumis- piste °C	Henryn lain vakio molm ⁻³ Pa ⁻¹	OEL mgm ⁻³	Maa
Trietanoliamiini	102-71-6	alle 1	360	1,11E+07	5	FI
2-(2-Aminoetoksi)-etanoli	929-06-6	alle 10	n. 220	1,36E+06	0,87	D
N-Metyylidietanoliamiini	105-59-9	2,6	243	3,18E+05	-	
Dietanoliamiini	111-42-2	alle 1	269	2,52E+05	2	FI
2-Aminoetanoli	141-43-5	50	172	3,68E+04	2,5	FI
1-Amino-2-propanoli	78-96-6	alle 20	159	3,11E+04	5,8	D
2-Amino-2-metyylipropanoli	124-68-5	alle 10	165	1,52E+04	3,7	D
Dietylietanoliamiini	100-37-8	190	161	3,16E+03	49	FI (15 min)
2-Dimetyyliaminoetanoli	108-01-0	3990	131	1,87E+03	7,4	UK

Yhdiste	CAS nro	Höyryn- paine Pa	Kiehumis- piste °C	Henryn lain vakio molm ⁻³ Pa ⁻¹	OEL mgm ⁻³	Maa
Morfoliini	110-91-8	1070	129	8,21E+01	36	FI
N-Sykloheksyyliamiini	108-91-8	1300	134	1,83E+00	4,1	FI
Disykloheksyyliamiini	101-83-7	4	256	1,80E-01	5	D
N,N-dimetyylidekyliamiini	1120-24-7	7,2	237		-	

1.6 Metallintyöstönesteelle altistumisen vähentäminen

Keskeisimmät keinot metallintyöstäjien oireiden vähentämiseksi ovat tekniset toimenpiteet, kuten työstökoneiden koteloinnit ja kohdepoistot, turvallisten työtapojen edistäminen sekä työstönesteen kunnan valvonta ja ylläpitäminen (Cohen & White 2006, Suuronen 2009).

Kohdepoistojen merkitys altistumisen vähentämisessä on erittäin suuri. Hands ym. (1996) ja Sheehan & Hands (2007) havaitsivat tutkimuksissaan, että työstökoneeseen alun perin suunnitellut kohdepoistoilla varustetut koteloinnit olivat selvästi tehokkaampia altistumisen vähentämisessä kuin jälkepäin asennetut koteloinnit. Ensiasennuskoteloinneilla työntekijöiden aerosolille altistuminen pysyi selvästi alle 0,5 mg/m³, kun koteloitu työstökonekeskus oli varustettu kohdepoistolla. Uudet kohdepoistoilla varustetut koteloinnit ovatkin varsin tehokkaita sieppaamaan työstössä vapautuvat epäpuhtaudet kohdepoistojärjestelmään. Merkkiainetekniikalla mitattuna erään työstökoneen kohdepoiston sieppausasteeksi saatiin keskimäärin 98 % (Heitbrink ym. 1999).

1.6.1 Metallintyöstönesteaaerosolin suodattaminen

Työstökoneista poistettava ilma puhdistetaan varsin usein joko kuitusuodattimella ja/tai sähkösuodattimella ja puhalletaan takaisin työtilaan. Kuitenkaan kohdepoistoilman palauttamisen vaikutuksia työtilan ilmaan ja sen taloudellista kannattavuutta on tutkittu vain vähän. Enbom (1991) tutki hitsauksen ja hionnan kohdepoiston suodatuksen ja kierrätyksen taloudellisuutta. Yleisesti ajatellaan, että kohdepoistoilman kierrättämisen avulla voidaan vähentää työtilaan puhallettavan ulkoilman tilavuusvirtaa ja saavuttaa siten energian säästöä. Hänen mukaansa kohdepoistoilma voi suodatuksenkin jälkeen olla niin epäpuhdasta, että sen palauttaminen työtilaan vain lisää ilmanvaihdon tarvetta eikä mitään säästöä voi syntyä, mikäli ei samalla tingitä ilman laatutavoitteista. Kohdepoistoilman palautuksella saavutettava energian säästö riippuu

syntyvien epäpuhtauksien laadusta ja määrästä, suodattimien läpäisystä sekä työilman laadulle asetettavista vaatimuksista. Tutkimuksessa tehdyissä kenttäkokeissa osoittautuikin, että jo kohdepoistoilman suodatuksen käyttökustannukset ylittivät energian säästöt ainakin hitsauksessa ja vuoden 1991 energianhinnoilla. Tutkimuksensa yhteenvedossa Enbom (1991) toteaaakin, että kohdepoistoilman puhaltaminen ulos on käyttövarmempaa ja usein myös taloudellisempaa kuin kohdepoistoilman palauttaminen työtilaan. Samalla hän myös toteaa, että kohdepoistoilman kierrätykseen perustuvat laitteet ovat tarpeellisia kohteissa, joissa kohdepoistoilmaa ei voida johtaa ulos, kuten esimerkiksi asennustöissä.

Metallintyöstönesteiden kohdalla on havaittu, että kiinteät ja neste aerosolit voidaan poistaa varsin tehokkaasti kohdepoistoilmasta. Esimerkiksi mitatut endotoksiinien pitoisuudet kohdepoistojen ulospuhallusilmassa olivat pieniä, noin 1 ng/m^3 (vaihteluväli $<0,008 - 10 \text{ ng/m}^3$) (Linnainmaa ym. 2003). Ongelmaksi saattaakin muodostua suodattimien kuormittuminen. Pitkäaikaisissa käyttökokeissa havaittiin mm., että suodatinyksikköjen hienosuodattimista osa tukkeutui tai niiden erotusaste laski niin, että päätesuodattimena toiminut HEPA tukkeutui varsin nopeasti tai päätesuodattimena toimineen 95 % DOP –suodattimen erotusaste laski kuormittumisen myötä (Boundy ym. 2000). Työstökoneista poistettavan ilman suodatusta suunniteltaessa on tunnettava muodostuvan aerosolin hiukkaskokojakauma ja suodattimen tehokkuus. Lisäksi on tunnettava myös työstökoneen sisällä muodostuvan aerosolin määrä, joka on samalla arvio suodattimen kuormituksesta (Heitbrink ym. 2000b).

Osa työstönesteiden sisältämistä yhdisteistä on haihtuvia ja läpäisevät siten hiukkassuodattimet höyrymuodossa. Haihtuvien yhdisteiden määrä riippuu lämpötilasta koteloinnin sisäpuolella. Kokeissaan Cooper & Leith (1998) havaitsivat, että noin 8-13 % suodatuslaitteistoon tulevasta leikkuuöljystä tai emulsiosta (konsentraatiksi laskettuna) pääsee hiukkassuodattimien läpi höyrymuodossa. Lisäksi haihtuvien yhdisteiden päästö jatkuu suodattimista, vaikka suodatusyksikköön ei tulisikaan uutta aerosolia, jos suodatinyksikön läpi virtaa ilmaa. Suodattimen läpi päässeet yhdisteet (esim. formaldehydi) voivat jäädä työtilan ilmaan tai kondensoitua uudelleen esimerkiksi erilaisille pinnoille. Koneistusajoissa havaitaan usein koneiden ym. pinnoilla tiivistynyttä työstönestettä, vaikka käytössä olisivat HEPA-suodattimet (Leith ym. 2003). Heitbrink ym. (2000a) tutkimuksissa havaittiin muutaman kuukauden jälkeen kohdepoistoilman takaisinpuhallusaukolla leikkuunesteen kertymää. Samoin suodatinyksikön sisään oli kerääntynyt aerosolia, joka oli tukkinut mm. viemäriaukot.

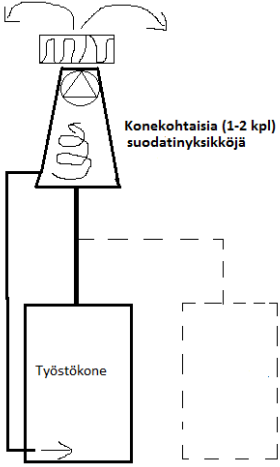
Työterveyslaitos on palvelutoiminnassaan altistumisselvitysten yhteydessä mitannut suodattimien palautusilman laatua muutamalla työpaikalla. Halliin takaisin palautettu ilma on kaasumaisten yhdisteiden osalta ollut lähes poikkeuksetta likaisempaa kuin työstöhallien yleisilma tai työntekijöiden hengitysvyöhykkeen ilma. Työstönesteiden sisältämien alkanoliamiinien pitoisuus on palautusilmassa ollut keskimäärin moninkertaisesti suurempi ja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuuskin puolitoista kertaa suurempi kuin hallin ilman pitoisuus.

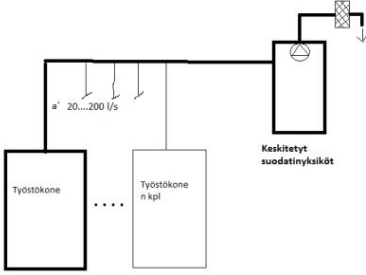
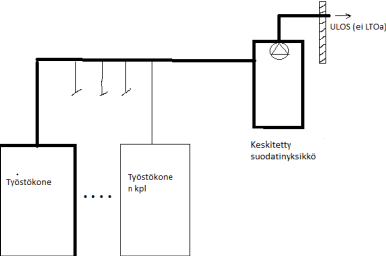
Alkanoliamiinien pitoisuus palautusilmassa on selvästi ylittänyt (ka. 0,45 mg/m³) Työterveyslaitoksen asettaman alkanoliamiinien tavoitetason 0,1 mg/m³ metallipajojen ilmassa. Sen sijaan suodatinyksiköt ovat pidättäneet hengittävän ja alveolijakeen hiukkasmaiset epäpuhtaudet hyvin. Niiden pitoisuus palautusilmassa on ollut selvästi hallin yleisilmaa pienempi, kun laitteistoja on käytetty ja huollettu ohjeiden mukaisesti.

1.6.2 Nykyiset suodatusratkaisut ja niiden arviointi

Nykyisin työstökeskusten kohdeilmanvaihdon käsittelyssä on käytössä kolme pääasiallista vaihtoehtoa (Taulukko 4). Yhden työstökoneen palauttavat suodatusratkaisut (ratkaisu A) ovat yleisiä, koska se mahdollistaa joustavimman muuntelumahdollisuuden. Useamman työstökeskusten poistoilman liittäminen yhteiseen suodatusyksikköön (ratkaisu B) vähentää huoltokohteita, mutta lisää kanavoinnin tarvetta ja hankaloittaa tuotantotilan muuntelua. Molemmissa tapauksissa yhtenä heikkona puolena on se, että työtilaan takaisin kierrätettävä kohdepoiston ilma, vaikkakin suodatettuna hiukkasista, kuormittaa sisäilman laatua. Mikäli kohdepoiston ilma johdetaan ulos (ratkaisu C), työstökeskuksesta poistettava ilma ei kuormita sisäilmaa, mutta tarvittava kanavisto lisää huoltotarvetta ja hankaloittaa tuotantotilan muunneltavuutta.

Taulukko 4. Nykyisin käytössä olevien työstökonekeskusten poistoilman käsittelyratkaisujen hyviä ja huonoja puolia.

Ratkaisu	Hyvät puolet	Huonot puolet
<p>A. Yksittäisten työstökoneiden poistoilman palauttaminen halliin</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kanavointitarve minimaalinen ja sitä kautta paloturvallisuus hallittavissa helposti ▪ Työstökoneiden siirtely helppoa: poistoilman käsittely-yksikkö kulkee mukana ▪ Hyvä energiatehokkuus mahdollinen saavuttaa ▪ Kohtalainen työstökonekohtainen materiaalitehokkuus mahdollinen saavuttaa 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kierrätysilma kuormittaa sisäilman laatua liikaa ▪ Työstökonekohtaiset poistoilman käsittely-yksiköt: huoltokohteita useita

Ratkaisu	Hyvät puolet	Huonot puolet
<p>B. Usean työstökoneen yhteinen ja kanavoitu poistoilman palauttaminen halliin tavanomaisesti keskitetysti käsiteltynä ja ilman työstökonepäässä olevaa esikäsitelyä</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keskitetty käsittely-yksikkö: huoltokohteita vähän kanavanuohousta lukuun ottamatta ▪ Hyvä energiatehokkuus on mahdollinen saavuttaa 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kierrätysilma kuormittaa sisäilman laatua liikaa ▪ Likaantuva ja palovaarallinen, puhdistamista vaativa kanavisto, joka vaikeuttaa työstökonesiirtoja ja on mm. siltanostureiden yms. käytön haittana
<p>C. Yhden tai useamman työstökoneen poistoilman johtaminen ulos käsittely-yksikön kautta ilman työstökonepäässä olevaa mitään esikäsitelyä</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Itse poistoilma ei kuormita sisäilman laatua ollenkaan ▪ Keskitetty poistoilman käsittely-yksikkö: huoltokohteita vähän kanavanuohousta lukuun ottamatta 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Likaantuva ja palovaarallinen, puhdistamista vaativa kanavisto, joka vaikeuttaa työstökonesiirtoja ja on mm. siltanostureiden yms. käytön haittana ▪ Energiatehokkuus huono: Lämmin kostea poistoilma sisältää paljon energiaa. Vaatii korvausilman järjestämisen.

2 TAVOITTEET

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää työpaikkamittauksin, liikaako kohdepoistoilman kierrättäminen työpaikan ilmaa ja arvioida sen merkitys työntekijöiden kannalta. Tulosten perusteella arvioitiin kohdepoistoilman kierrätyksen vaikutuksia yleisilmanvaihdon tarpeeseen ja energiankulutukseen sekä arvioitiin suodatuksen aiheuttamia kuluja ja verrattiin niitä mahdollisesti saataviin säästöihin energiankulutuksessa. Tutkimuksen tavoitteiden painopisteet olivat seuraavat:

- selvittää sisäilman laatu ja päästöistä aiheutuvat riskit, kun työstökoneiden kohdepoistojen ilmaa ei voida johtaa ulos
- selvittää, miten kohdepoistojen ilman johtaminen ulos vaikuttaa sisäilman laatuun
- selvittää ja vertailla eri mahdollisuuksia kohdepoistojen ilman käsittelyvaihtoehtoja
- kehittää kohdepoistoilman käsittelyä ja kokeilla uutta metallintyöstön aerosolierottimen prototyyppiä yhdessä koekohteessa

Tutkimuksen lopputuloksena laadittiin suositukset työstökeskuksen tehokkaaseen ja taloudelliseen kohdepoistoilman käsittelyyn eri tilanteissa.

3 TUTKIMUSASETELMA, AINEISTO JA MENETELMÄT

3.1 Tutkimuskohteet ja käytetyt työstönesteet

Työstökoneiden kohdepoistoilman eri käsittelytapojen toimintaa ja vaikutusta työpaikan ilman laatuun tutkittiin neljässä eri tehtaassa (Taulukko 5). Tehtaat 1-3 olivat suuria valmistusyksiköitä, jotka koostuivat sekä FMS-linjoista että useista yksittäisistä automaattisista valmistusyksiköistä. Tehtaan 4 oli erikoistunut tekemään koneistusta piensarjatuotannolla.

Tehtaissa 1 ja 2 keskityttiin erilaisten käytössä olevien suodatusjärjestelmien toiminnan selvittämiseen. Tuotantotiloissa tutkittiin sekä keskitettyjä, usean koneen suodatuslaitteistoja että yksittäisiä 1-2 työstökoneita palvelevia suodatuslaitteistoja. Tehtaassa 1 käsitelty ilma johdettiin pääasiassa takaisin työtilaan, kun taas tehtaassa 2 ilma johdettiin suodatuslaitteilta pääasiassa suoraan ulos.

Tehtaassa 3 tavoitteena oli selvittää aktiivihiihsuodatuksen käyttöä FMS-linjan kahdessa työstökonekeskuksessa. Työstökeskusten yhteensä neljään eri suodatusyksikköön asennettiin alkumittauksen jälkeen aktiivihiihsuodattimet, joiden toimintaa ja vaikutusta työilman epäpuhtauspitoisuuksiin selvitettiin mittauksin. Aktiivihiihsuodattimien kestoaikaa arvioitiin mittaamalla aktiivihiihsuodattimien läpi pääsien epäpuhtauksien pitoisuudet eri käyttöaikojen jälkeen.

Tehtaassa 4 alkumittauksen jälkeen tehtiin muutostyö, jonka jälkeen työstökoneiden kohdepoistojen ilma johdettiin kanavistoilla suodatuksen jälkeen ulos. Työntekijöiden altistuminen ja

työtilan yleisilman epäpuhtauspitoisuudet mitattiin sekä ennen muutostyötä että niiden jälkeen.

Taulukko 5. Perustiedot tutkituista tuotantotiloista.

Tehdas nro	Suodatinyksikkö nro	Kohdepoistoilman käsittely
1	1-3	Pääosin kierrätys, suodatinyksikkö 1 poistoilma johdettiin ulos, suodatinyksiköiden 2 ja 3 ilma palautettiin tuotantotilaan.
2	4-5	Pääosin johtaminen ulos. suodatinyksikön 4 ilma johdettiin ulos ja yksikö 5 ilma palautettiin tuotantotilaan.
3	6-9	Ensimmäisessä koesarjassa kaikkien yksiköiden ilma palautettiin tuotantotilaan pelkästään hiukkassuodattimien läpi. Toisessa vaiheessa yksiköihin asennettiin aktiivihillisuodattimet.
4	10-11	Aluksi ilma palautettiin tuotantotilaan. Muutoksen jälkeen ilma johdettiin ulos.

Käytetyt työstönesteet ja niiden koostumus on kuvattu taulukossa 6.

Taulukko 6. Mitatuissa tuotantotiloissa käytetyt työstönesteet ja niiden ainesosat siten kuin ne on käyttöturvallisustiedotteissa ilmoitettu.

Tehdas	Työstöneste	Komponentit	CAS-numero	Määrä %
1	BONDERITE L-MR B204 known as Multan B 204	(Z)-N-[2-(2-hydroksietoksi)etyyli]-9-oktadeseeniamidi	20429-33-8	5-10
		Oleyylialkoholi etoksyylaatti fosfaatti	39464-69-2	<3
		Disykloheksyyliamiini	101-83-7	<2,5
		Typpihappo, sykloodekanolin ja sykloodekanonin reaktiotuote, joiden sivutuote, korkealla kiehuva fraktio	72162-23-3	1-5
		Pyridiini-2-tioli-1-oksidinatriumsuola	3811-73-2	<0,25

Tehdas	Työstöneste	Komponentit	CAS- numero	Määrä %
	Quakercool 3750 BFF	Alkyyli alcohol	-	1-5
		Monoethanolamine	141-43-5	1-5
		1-Aminopropan-2-ol	78-96-6	1-5
		Sulfonate	-	1-5
2	Castrol Hysol 25 BF	Perusöljy - erittelemätön	-	25-35
		Amiiniineutraloidut karboksyylihapot	-	5-10
		3,3'-methylenebis[5-methyloxazolidine]	66204-44-2	3-5
		2-aminoetanoli	141-43-5	3-5
		Rasva-amidin johdannainen	-	1-5
		3-Iodo-2-propyynylibutylikarbamaatti	55406-53-6	0,1-1
		Multan B 204	(Z)-N-[2-(2-hydroksietoksi)etyyli]-9-oktadeseeniamidi	20429-33-8
	Diglykoliamiini	929-06-6	1-5	
	Oleyylialkoholi etoksylaatti fosfaatti	39464-69-2	1-5	
	Disykloheksyyliamiini	101-83-7	0,1-1	
	Typpihappo, syklo-dodekanolin ja syklo-dodekanonin reaktiotuote, joiden sivutuote, korkeallakiehuva fraktio	72162-23-3	0,25-2,5	
	Pyridiini-2-tioli-1-oksidinatriumsuola	3811-73-2	0,1-1	
3	Quakercool 3530	2,2'-Methyliminodiethanol	105-59-9	5-10
		3,3'-Methylenbis[5-methyloxazolidine]	66204-44-2	1-5
		Fatty acids, C-18 unsaturated....	173832-45-6	1-5
4	Ecocool Ultralife A	Distillates (petroleum), hydrotreated light naphthenic (nota L, -R45, < 3% DMSO extract)	64742-53-6	25-50
		Alkanolamine/carboxylic acid salt		2,5-10

Tehdas Työstöneste	Komponentit	CAS- numero	Määrä %
	N,N'-methylenbismorpholine	5625-90-1	2,5-10
	Oleic acid amidoethanol polyethoxylate	26027-37-2	2,5-10
	C12-C13 Primary alcohols blend	75782-86-4	1-2,5
	Fatty acid amide	70131-54-3	1-2,5
	Primary alkanolamine condensate containing boron		1-2,5
	Poly(oxy-1,2-ethanediyl),a-hydroxy-w-hydroxy-,mono-C12-14-alkyl ethers, phosphates	68511-37-5	1-2,5
	2-(2-aminoethoxy)ethanol	929-06-6	1-2,5
	Alkali metal salts of carboxylic acids		1-2,5
	Alkyl ether carboxylic acid		1-2,5
	3-Iodo-2-propynylbutylcarbamate	55406-53-6	<0,25

3.2 Ilman epäpuhtauksien mittaukset

Mittauksilla selvitettiin työpaikan ilman laatua metallintyöstökoneiden läheisyydessä sekä työn-tekijän hengitysvyöhykkeeltä että työpisteeltä kiinteistä mittauspisteistä (Taulukko 7). Ilman-vaihtokanaviston mittauksilla tarkasteltiin työstökoneiden kohdepoiston ilmasta keräämien epäpuhtauksien määrää ja laatua ja arvioitiin olemassa olevien suodatusjärjestelmien toimi-vuutta.

Hengittävän pölyn pitoisuudet mitattiin keräävällä menetelmällä (AR2303-TY-003) käyttäen IOM-keräintä (SKC 225-70) ja pumppua (SKC 224-PCTX4), jonka virtausnopeus oli 2,0 l/min. Keräimessä olevalle selluloosaesterisuodattimelle (Millipore AAWP) kertyneen pölyn massa punnittiin vakio-olosuhteissa eksikaattorissa tapahtuneen kuivauksen jälkeen.

Hiukkasten kokojakautumaa mitattiin Berner-tyyppisellä kaskadi-impaktorilla, joka luokitteli ae-rosolihiukkaset kahdeksaan kokoluokkaan välillä <0,35 ... > 14,9 µm. Näytteet kerättiin ilmavir-ralla 25 l/min. Päätesuodatin ja impaktioasteiden alumiiniset keräysalustat punnittiin vakio-olo-suhteissa näytteiden vakioinnin jälkeen.

Työpaikan ilman endotoksiinit määritettiin standardin SFS-EN 14031:2003 mukaisesti. Näytteet kerättiin IOM-keräimessä olevalle lasikuitusuodattimelle pumpulla (SKC 224-PCTX4), jonka tilavuusvirta oli 2 l/min. Näytteessä olevien gram-negatiivisten bakteerien soluseiniin sisältämien endotoksiinien pitoisuudet määritettiin kineettisesti LAL, Limulus Amebocyte Lysate –menetelmällä. Näytteenottopisteet valittiin ennalta mitattujen leikkuunesteiden endotoksiinipitoisuuksien perusteella. Leikkuunesteiden endotoksiinipitoisuudet määritettiin samalla menetelmällä kuin pitoisuudet ilmassakin TTL:n työohjeen AR2304-TY-070 mukaisesti.

Alkanoliamiinien pitoisuudet määritettiin ilmasta suodatinmenetelmällä ionikromatografisesti massaselektiivisellä detektorilla (AR2303-TY-018). Ilmassa olevat höyryt ja sumut kerättiin pumpulla (SKC 224) Swinnex 25 -suodatinoktelossa olevalle, rikkihapolla käsitetylle lasikuitusuodattimelle. Näytteen keräysnopeus oli 2 l/min. Näytteet desorboitiin metanolilla ja analysoitiin kationikolonnilla varustetulla LC-MS/MS laitteistolla.

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) määrittäminen ilmasta tehtiin termodesorptio-kaasukromatografisella menetelmällä (AR2303-TY-031). Ilmanäytteet kerättiin aktiivisesti pumpun (Gilian LFS-113DC) avulla ATD-keräimeen (adsorbenttina Tenax TA) tilavuusvirralla 100 cm³/min. Näytteen sisältämät yhdisteet analysoitiin kaasukromatografisesti massaselektiivisen detektorin avulla. Tuloksena saatiin haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuus (TVOC) ja yksittäisten yhdisteiden pitoisuuksia ilmassa.

Formaldehydin pitoisuus määritettiin ilmasta keräysmenetelmällä (AR2303-TY-011). Formaldehydinäytteet otettiin 2,4-dinitrofenyylihydratsiinillä päällystettyyn Sep-Pak C18 –putkeen virtausnopeudella 200 cm³/min (Gilian LFS-113DC). Muodostuneet 2,4-dinitrofenyylihydratsiinin johdannaiset uutettiin putkesta asetoniinillä, erotettiin UPLC:llä ja määritettiin UV:lla aallonpituudella 360 nm.

Näytteenkeräys- ja analyysimenetelmistä hengittämä pöly, endotoksiinit, aldehydit ja VOC-yhdisteet ovat akkreditoituja (testauslaboratorio T013).

Taulukko 7. Ilman epäpuhtauksien mittausmenetelmät ja mittauspaikat.

Suure	Menetelmä	Mittauspaikat
Aerosolin massapitoisuus	IOM/Kalvosuodatin Gravimetrinen	Hengitysvyöhyke Työtilan yleisilma Kohdepoiston palautusilma
Aerosolin hiukkaskoko- kauma	Kaskadi-impaktori Gravimetrinen	Työtilan yleisilma Kohdepoiston ilma ennen suodatusta

Suure	Menetelmä	Mittauspaikat
Endotoksiinit ilmassa	Suodatinmenetelmä LAL -menetelmä	Työtilan yleisilma
Alkanoliamiinit, kokonaispitoisuus	Happolasikuitusuodatin LC-MS/MS	Hengitysvyöhyke Työtilan yleisilma Kohdepoiston palautusilma Kohdepoiston ilma ennen suodatusyksikköä
VOC -kokonaispitoisuudet (TVOC)	Tenax TA adsorbentti GC-MS	Hengitysvyöhyke Työtilan yleisilma Kohdepoiston palautusilma Kohdepoiston ilma ennen suodatusyksikköä
Formaldehydi	DNPH-käsitelty Sep-Pak C18 LC-UV	Hengitysvyöhyke Työtilan yleisilma Kohdepoiston palautusilma Kohdepoiston ilma ennen suodatusyksikköä
Ilman lämpötila ja kosteus	SwemaAir 300	Työtilan yleisilma Kohdepoiston palautusilma Kohdepoiston ilma ennen suodatusyksikköä
Tilavuusvirta	TSI VelociCalc 9555 P + Pitot- putki	Kohdepoiston ilma ennen suodatusyksikköä

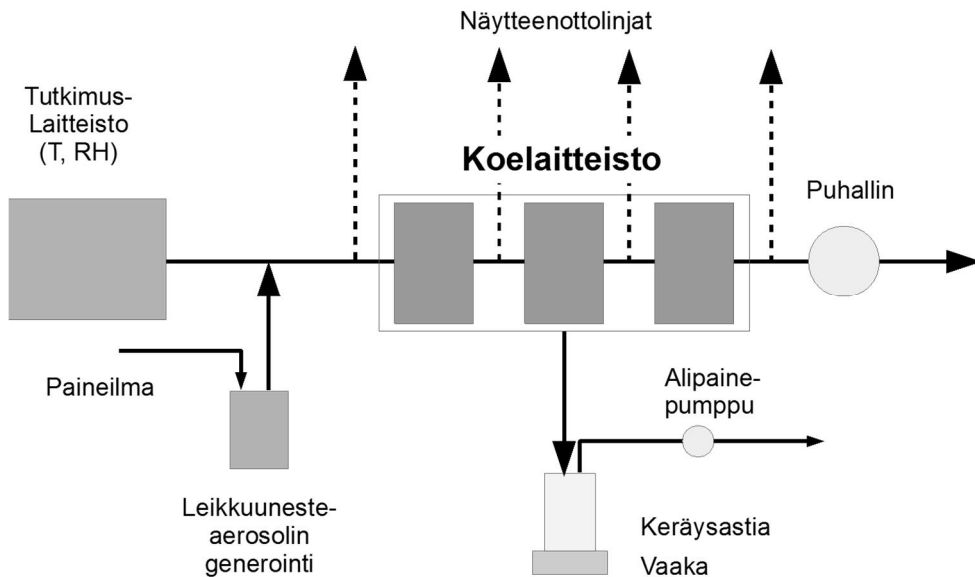
3.3 Metallin työstön aerosolierotin

Tutkimuksessa haluttiin selvittää, saataisiinko leikkuunesteestä poistoilmaan haihtuvat, perinteisillä tavoin vaikeasti tai kalliisti suodatettavat kaasumaiset yhdisteet poistettua uudella metallin työstön aerosolierottimella. Aerosolierotin koostuu innovatiivisesta tavasta yhdistää erityyppisiä ilman epäpuhtauksien erotustapoja. Erottimen patenttihakemus (nro 20165108) on vireillä, joten sen tarkempaa rakennetta ei tässä raportissa voida esittää.

3.3.1 Laboratoriotestit

Aerosolierottimen ensimmäiset koelaitteistot rakennettiin VTT:llä ja se asennettiin VTT:n ilmanvaihtolaboratorioon, missä metallintyöstötilannetta voitiin simuloida kontrolloiduissa olosuhteissa. Laboratoriotesteissä hyödynnettiin VTT:n ilmanvaihtolaboratorion tutkimuslaitteistoa, jossa ilman lämpötila ja kosteus voidaan säätää haluttuihin arvoihin.

Aerosolierottimen koelaitteistoon menevään ilmaan (0,075 m³/s) sekoitettiin leikkuuneste-aerosoli, joka generoitiin paineilmatoimisella sumuttimella erillisessä kammiossa. Koelaitteiston eri osien toimintaa selvitettiin mittaamalla alkanoliamiinien pitoisuuksia eri kohdista koelaitteistoa. Laitteistoon kertynyt neste kerättiin astiaan alipainejärjestelmän avulla. Koejärjestelyn periaatetta on havainnollistettu oheisessa kuvassa (Kuva 3).



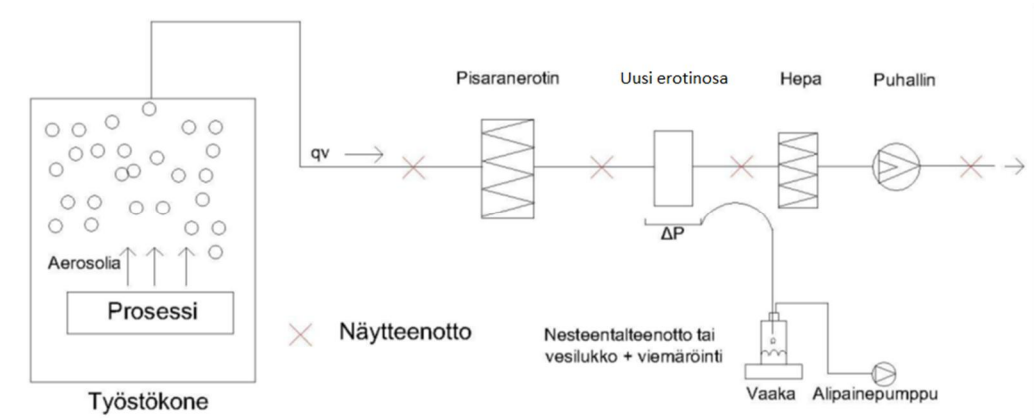
Kuva 3. Koejärjestely aerosolierottimen ensimmäisen version mittauksissa.

3.3.2 Kenttätestit

Metallintyöstön aerosolierottimen toiminnan ja kehityskelpoisuuden varmistamiseksi sitä kokeiltiin myös todellisessa käyttötilanteessa tuotantoympäristössä. Erottimen prototyypille tehtiin kenttäkokeet tehtaalla. Laitteisto asennettiin noin kuukaudeksi työstökoneeseen, jonka käyttö oli päivittäistä.

Työstökoneen kohdepoistoilman aikaisemmin käytössä olleen suodatinlaitteiston oma HEPA-suodatin korvattiin kehitetyllä aerosolierottimella ja ilma johdettiin kanavaa pitkin

koelaitteistolle suodatettavaksi ja se palautettiin takaisin tuotantotilaan. Kohdepoistoilman alkanoliamiiniin ja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (TVOC) pitoisuudet mitattiin ilman käsittelyn eri vaiheissa. Kuva 4 on esitetty kenttäkokeen koejärjestelyn periaate.



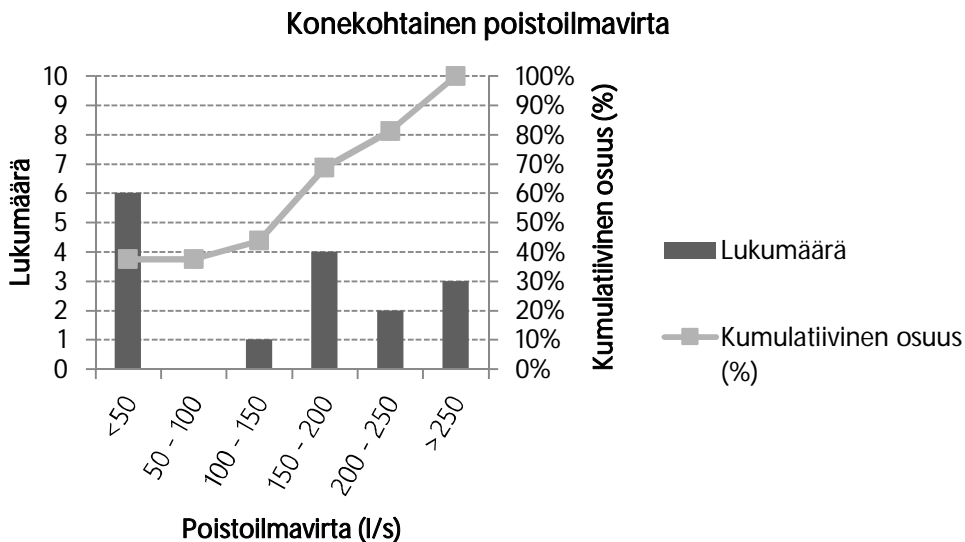
Kuva 4. Metallintyöstön aerosolierottimen (patentihakemus nro 20165108) kenttäkokeen järjestelyt.

Laitteiston toimintaperiaate kentällä oli hyvin samankaltainen kuin toisen vaiheen laboratorio-kokeissa. Kokeen aikana saatiin arvokasta tietoa käytöstä, soveltuvuudesta ja toimivuudesta metallintyöstön kohdepoistossa käytännössä.

4 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

4.1 Työstökeskusten kohdepoistojärjestelmien toiminta

Tutkitut työstökeskukset olivat kaikki koteloituja ja varustettuja kohdepoistolaitteistoilla. Kohdepoistojen ilmavirrat mitattiin 16 työstökeskuksesta, jotka olivat kolmessa eri tehtaassa. Ilmavirtojen mittauksia tehtiin useammasta työstökeskuksesta kuin muita mittauksia (vert. Taulukko 5). Näistä yhdeksän oli liitetty keskitettyihin, useampaa työstökoneita palveleviin suodatusjärjestelmiin ja seitsemän työstökoneita oli kytketty yhtä konetta palveleviin järjestelmiin. Ilmavirtojen suuruus vaihteli keskusten poistokanavissa välillä 20 – 470 l/s (Kuva 5 ja Taulukko 8). Joissakin kanavissa ei saatu mitattua ilmavirtaa ollenkaan. Keskimääräinen konekohtainen poistoilmavirta oli noin 180 l/s, mutta myös alle 50 l/s konekohtaisia poistoilmavirtoja mitattiin useita. Nämä ilmavirrat mitattiin keskitetyistä järjestelmistä.



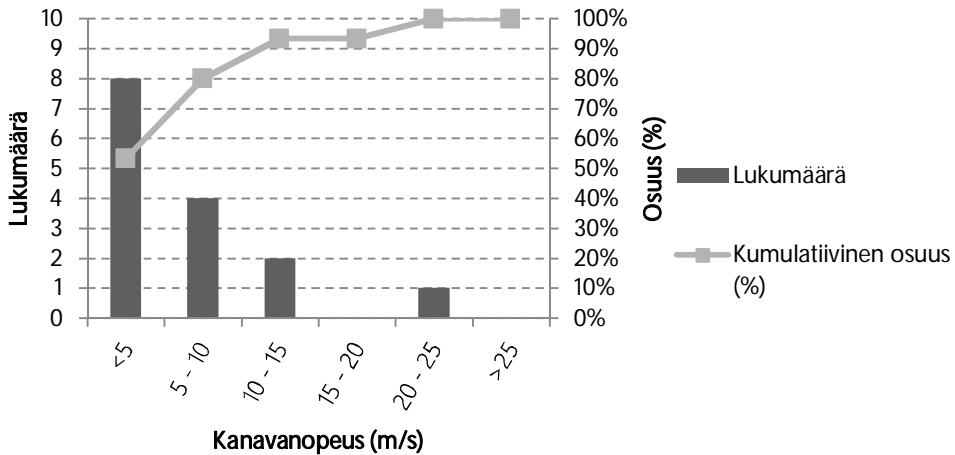
Kuva 5. Mitatut konekohtaiset poistoilmavirrat (l/s).

Taulukko 8. Mitatut konekohtaiset poistoilmavirrat.

Tunnusluku	Arvo
Keskiarvo (l/s)	178
Mediaani (l/s)	169
Minimi (l/s)	21
Maksimi (l/s)	468
Lukumäärä	16

Mitään selvää syytä ei löytynyt siihen, miksi poistoilmavirrat vaihtelivat näin paljon työstökoneiden välillä. Jäi tuntuma, että poistoilmavirtoja ei ole mitoitettu millään kriteereillä tai että kanavat olivat aikojen saatossa tukkeutuneet tms. Esimerkkinä mainittakoon keskitetyt suodatusjärjestelmät, joiden nimellisilmavirrat olivat 2,8 m³/s ja 8,3 m³/s, mutta mitatut poistoilmavirrat olivat vain 0,32 m³/s ja 3,5 m³/s. Joissain tapauksissa ilman virtausta poistokanavassa ei havaittu lainkaan.

Ilman virtausnopeuksia mitattiin eri puolilta keskitettyjen järjestelmien poistokanavistoja yhteensä 15 mittauspisteestä. Myös nämä ilman virtausnopeudet olivat enimmäkseen pieniä. Ne vaihtelivat välillä 1 – 21 m/s (Kuva 6 ja Taulukko 9). Virtausnopeudet kanavistossa olivat yleisimmin alle 5 m/s ja 80% havainnoista virtausnopeus oli alle 10 m/s. Monissa tapauksissa kanavistoihin olikin kertynyt likaa, jopa useiden kymmenien millimetrin paksuinen kerros.



Kuva 6. Mitatut ilman virtausnopeudet poistokanavistossa (m/s).

Taulukko 9. Työstökoneiden ja suodatuslaitteiden kokoojakanavista mitatut ilman virtausnopeudet

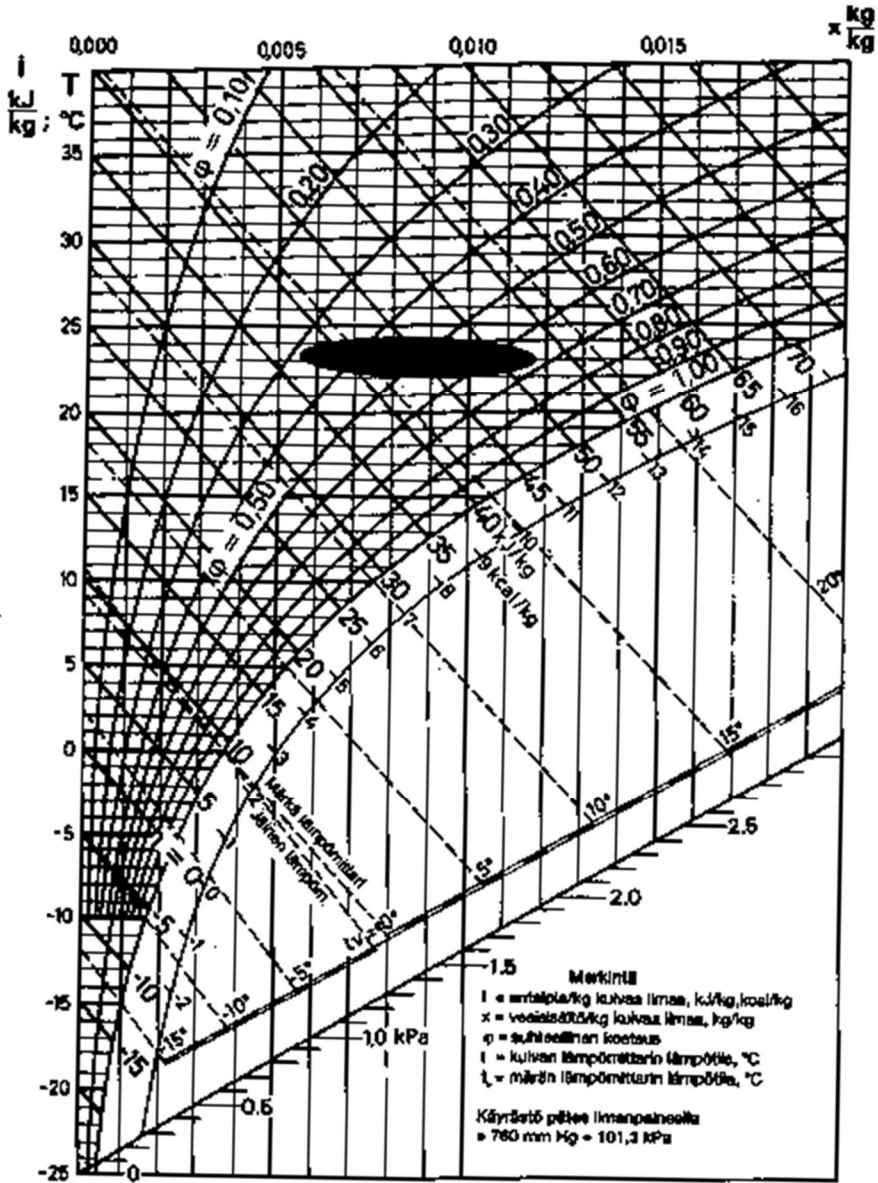
Tunnusluku	Arvo
Keskiarvo (m/s)	5,8
Mediaani (m/s)	2,5
Minimi (m/s)	1,1
Maksimi (m/s)	21,3
Lukumäärä	15

4.2 Ilman laatu ennen suodatinyksikköä

4.2.1 Lämpötila ja kosteus

Tutkituissa kohteissa työstökeskusten poistoilman lämpötila kanavista mitattuna oli 22 - 24 °C. Suhteellinen kosteus vastaavassa paikassa kanavassa vaihteli lämpötilavaihtelua enemmän olleen 30 – 70 %. Poistoilman mitattu olotila on alla esitettyinä Mollier-diagramissa (Kuva 7).

Työskentely-ympäristön lämpötila touko-kesäkuun vaihteessa 2014 vaihteli välillä 21 – 25 °C riippuen osin ulkolämpötilasta ja vuorokaudenajasta. Työskentely-ympäristön suhteellinen kosteus vaihteli välillä 30 – 60 %.



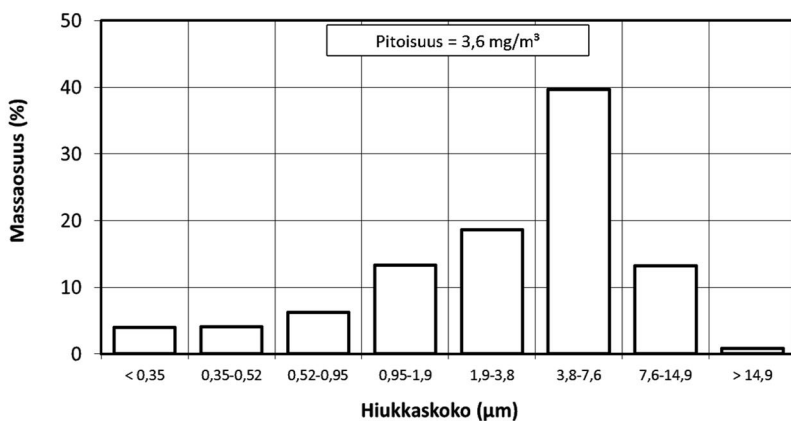
Kuva 7. Kohdepoistoilman olotila Mollier-diagrammissa.

4.2.2 Aerosolit

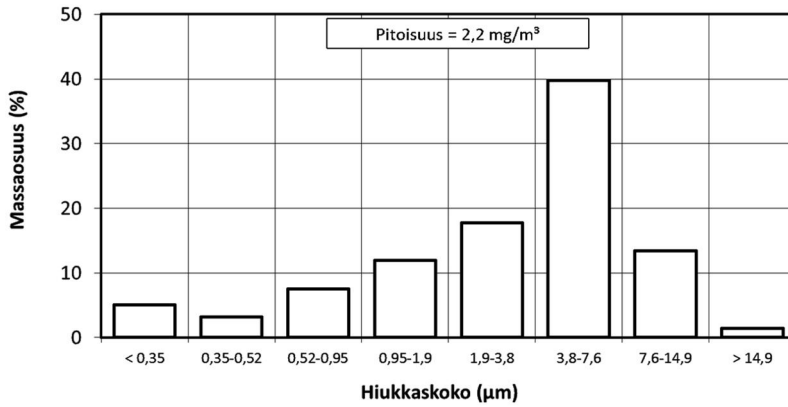
Työstökoneilta tulevan kohdepoistoilman hiukkaspitoisuudet vaihtelivat 0,8 – 3,6 mg/m³ (Taulukko 10). Kanavassa liikkuva aerosolin massavirta vaihteli 0,1 – 3,2 mg/s, mikä vastaa vuoro-kauden kumulatiivisena massana noin 10 – 300 g kuormitusta suodattimelle. Aerosolin mediaanihalkaisija vaihteli välillä 1-4 µm. Valtaosa hiukkasten massapitoisuudesta muodostui kooltaan noin 1-15 µm (Kuva 8) hiukkasista. Tässä tutkimuksessa mitattu aerosolin massajakauma vastasi hyvin aikaisemmissa mittauksissa havaittua massajakaumaa (Dasch ym. 2005).

Taulukko 10. Ennen suodatinta mitattuja aerosolin pitoisuuksia sekä arvio hiukkasten mediaanihalkaisijasta.

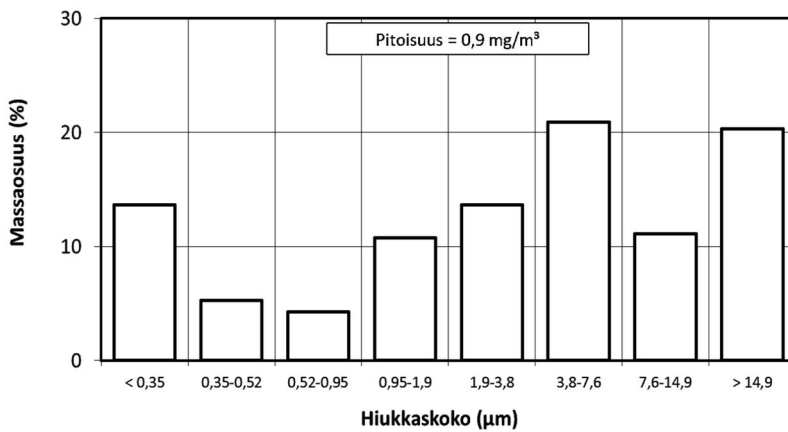
Suodatin- yksikkö nro	Pitoisuus (mg/m ³)	Massamediaani- halkaisija (µm)	Massavirta mg/s
1-a	3,6	4	1,2
1-b	2,2	4	0,7
2	0,9	4	3,2
3	0,8	1,1	0,1
4	1,6	2,7	0,6
5	1,5	4	0,6



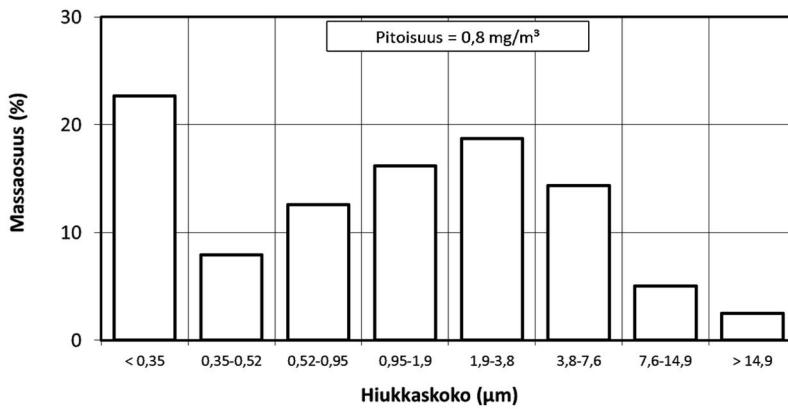
Suodatinyksikkö 1-a



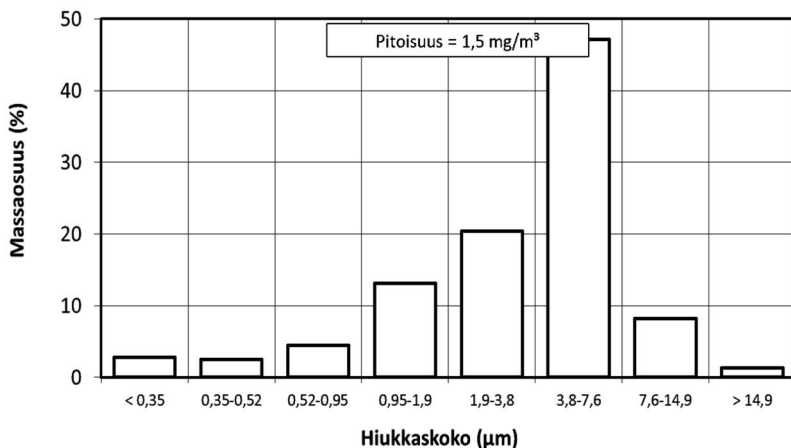
Suodatinyksikkö 1-b



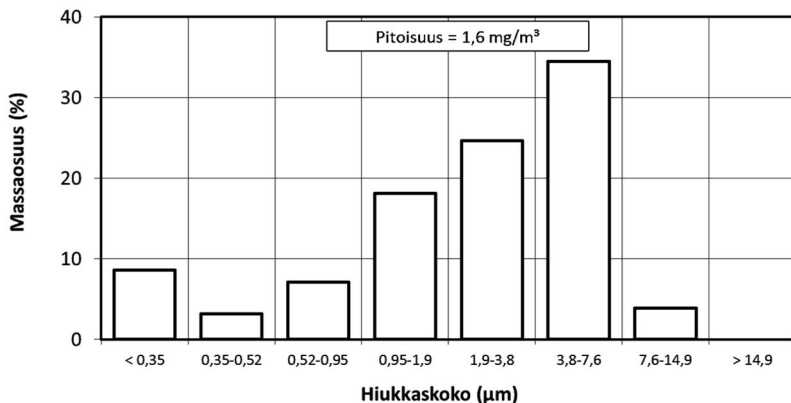
Suodatinyksikkö 2



Suodatinyksikkö 3



Suodatinyksikkö 4



Suodatinyksikkö 5

Kuva 8. Ennen suodatinta mitatut hiukkasten massajakautumat. Suodatinyksiköt 1-5. Suodatinyksikkö 1 mitattiin kahtena eri ajankohtana (1a ja 1b).

4.2.3 Alkanoliamiinit ja muut amiinit

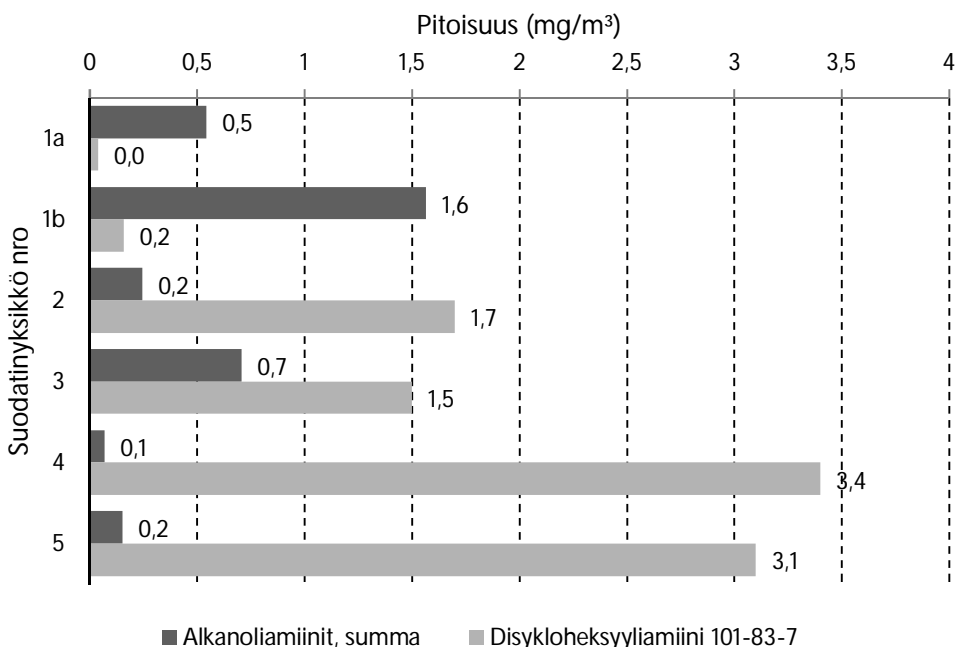
Kohdepoistojen ilman alkanoliamiinipitoisuudet ennen suodatusyksikköä vaihtelivat välillä 0,15 – 1,6 mg/m³ riippuen käytettävästä työstönesteestä ja työstön määrästä mittausaikana (vrt. suodatin 1) (Taulukko 11). Suodatusyksikköihin 1 ja 2 oli liitetty myös pesukoneita, joten poistoilman koostumus vaihteli riippuen työstökoneiden ja pesukoneiden käyntitirymistä.

Osa työstönesteistä sisälsi alkanoliamiinien lisäksi myös muita amiineja, merkittävämpänä di-sykloheksyyliamiini. Tätä yhdistettä havaittiin tyypillisesti yksiköissä, joissa alkanoliamiinien pitoisuudet olivat vähäisiä (Kuva 9). Disyklloheksyyliamiinin pitoisuudet vaihtelivat välillä 0,04 – 3,4 mg/m³. Amiinien yhteenlaskettu (alkanoliamiinit + muut amiinit) massavirta poistokanavassa

ennen suodatusyksikköjä vaihteli välillä 0,2 - 8 mg/s. Tämä merkitsee suodatusyksiköille kuorimitusta 18 – 695 g/d, jos työstö on jatkuva.

Taulukko 11. Työstökeskusten kohdepoistoilmasta ennen suodatusyksikköä mitatut alkanoliamiinien pitoisuudet ja massavirrat.

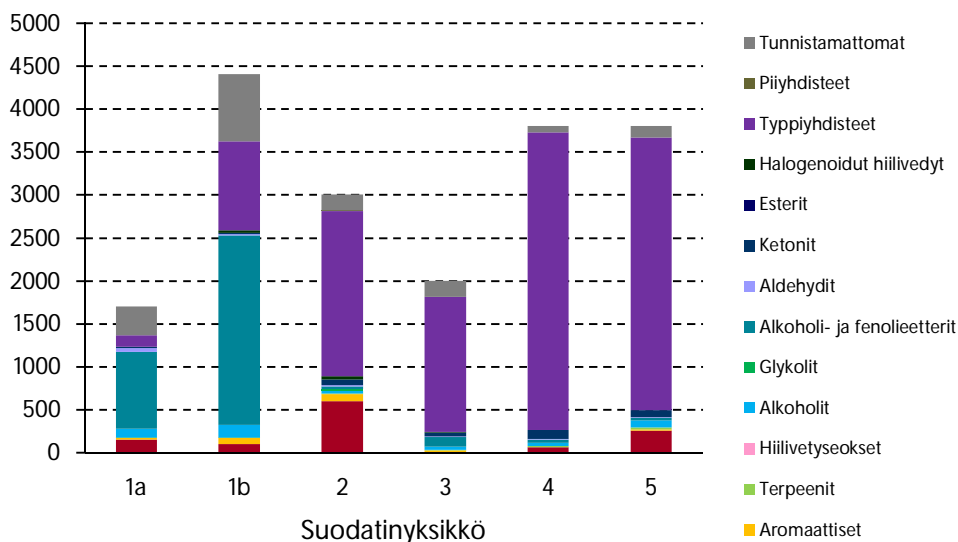
Suodatin-yksikkö nro	Pitoisuus (mg/m ³)	Pääkomponentit (%)	Massavirta mg/s
1-a	0,54	1-amino-2-metyylipropanoli (42%) 2-dimetyyli-aminoetaloni (31%) 2-aminoetanoli (21%)	0,17
1-b	1,57	2-dimetyyli-aminoetaloni (68%) 1-amino-2-metyylipropanoli (18%) 2-aminoetanoli (11%)	0,50
2	0,25	2-aminoetanoli (48%) 2-(2-aminoetoksi)-etanoli (37%)	0,93
3	0,71	2-Amino-2-metyylipropanoli (50%) 2-Aminoetanoli (16%) N-Metyylidietanoliamiini (15%)	0,12
4	0,07	2-(2-Aminoetoksi)-etanoli (61%) 2-aminoetanoli (23%)	0,03
5	0,15	2-(2-Aminoetoksi)-etanoli (80%) 2-aminoetanoli (17%)	0,06



Kuva 9. Alkanoliamiinien summapitoisuus ja disykloheksyyliamiinin pitoisuudet ennen suodatusyksikköjä.

4.2.4 Haihtuvat orgaaniset yhdisteet ja muut ilman epäpuhtaudet

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuudet (TVOC) poistokanavassa ennen suodatinta vaihtelivat välillä 1,7 – 4,4 mg/m³. Tärkeimpiä yhdisteryhmiä olivat typpiyhdisteet (disykloheksyyliamiini), hiilivedyt (mm. heptaani, metyyliheksaanit ja sykloheksaani) sekä alkoholi- ja fenolieetterit (fenoksipropanoli) (Kuva 10). Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden massavirrat vaihtelivat välillä 0,3 – 11,3 mg/s, aiheuttaen kuormituksen 26 – 980 g/d, mikäli työ on jatkuva. Sen sijaan formaldehydiä ei havaittu kohdepoistoilmassa.



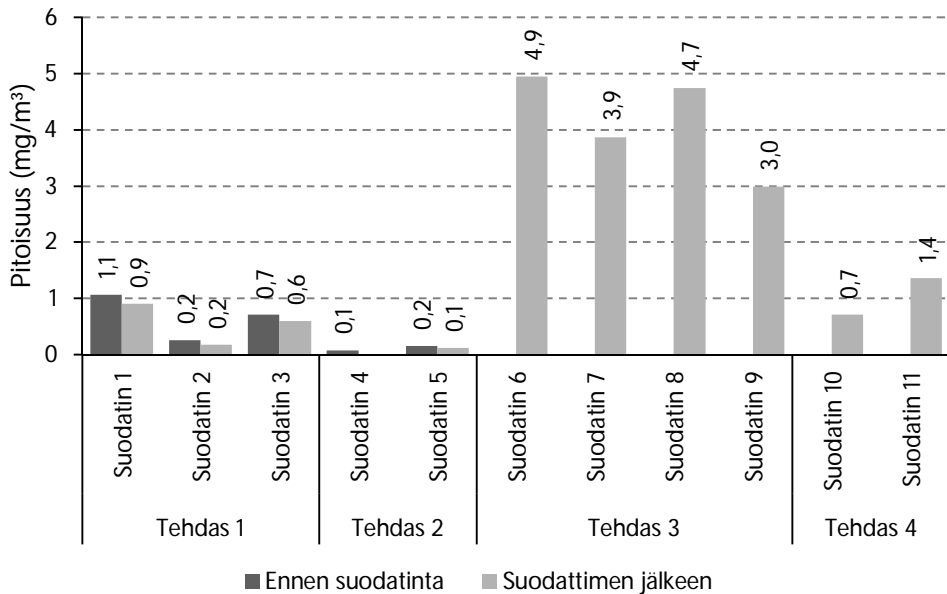
Kuva 10. Ennen suodatinyksiköitä mitattuja VOC-yhdisteryhmien pitoisuuksia.

4.3 Ilman laatu suodattimen jälkeen

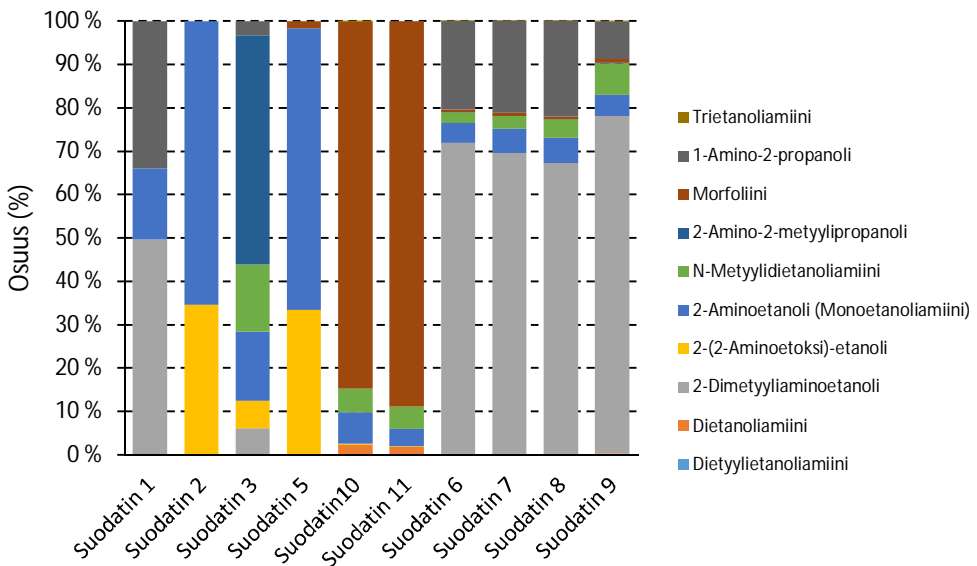
Suodatusyksiköt olivat pääasiassa varustettu HEPA-suodattimilla, joten aerosolipitoisuudet suodatusyksikköjen jälkeen olivat oletettavasti pieniä ja aerosolien pitoisuuksia suodatusyksikköjen jälkeen ei mitattu.

4.3.1 Alkanoliamiinit ja muut amiinit

Suodatusyksikköjen jälkeen mitattujen alkanoliamiinien pitoisuudet vaihtelivat välillä 0,11 – 4,9 mg/m³ välillä. Suodattimien jälkeen mitatut alkanoliamiinien pitoisuudet olivat lähes samalla tasolla kuin ennen suodatinta mitatut pitoisuudet (Kuva 11). Tehtaissa 3 ja 4 ei pitoisuuksia pystytty mittaamaan ennen suodatinta. Alkanoliamiinien massavirta suodatusyksikköjen jälkeen vaihteli välillä 0,04 – 1,16 mg/s. Eri alkanoliamiinien osuudet suodatusyksikköjen poistomassa vaihtelivat sekä tehtaissa että jossain tapauksissa myös suodatusyksiköittäin (Kuva 12). Yleisimmät alkanoliamiinit olivat 2-dimetyyliaminoetanol ja 2-aminoetanol, jota löytyi kaikista näytteistä. Lisäksi joistakin näytteistä löytyi merkittäviä määriä 1-amino-2-propanolia sekä 2-(2-aminoetoksi)-etanolia. Morfoliinia löytyi tehtaissa 4 näytteistä, joissa se oli merkittävin komponentti.



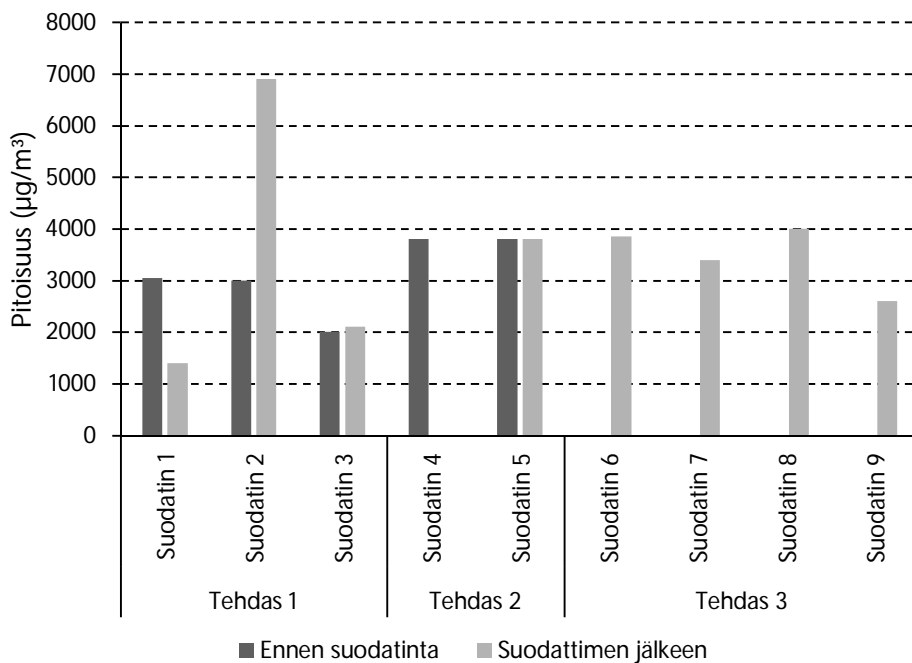
Kuva 11. Alkanoliamiinien pitoisuudet suodatinyksikköjen poistoilmassa. Tehtaissa 3 ja 4 pitoisuuksia ei mitattu ennen suodatinta.



Kuva 12. Eri alkanoliamiinien osuudet suodatinyksikköjen jälkeisessä ilmassa.

4.3.2 Haihtuvat orgaaniset yhdisteet

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuudet suodatinyksikköjen poistoilmassa vaihtelivat välillä 1,4 – 6,9 mg/m³. Merkittävimpiä yhdisteryhmiä olivat typpiyhdisteet, joista alkanoliamiini ja disykloheksyyliamiini esiintyivät suurimpina pitoisuuksina. Myös alkoholi- ja fenolieettereitä, erityisesti fenoksipropanolia esiintyi poistoilmassa. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden massa- virrat suodatinyksikköjen poistoilmassa vaihtelivat välillä 0,35 – 28,1 mg/s. Mikäli typpiyhdisteet jätetään huomioitta, haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuudet poistoilmassa vaihtelivat välillä 0,2 – 5,9 mg/m³ (Kuva 13) ja massavirrat vastaavasti välillä 0,04 – 22,5 mg/s. Suodattimen jälkeiselle mahdolliselle lisäsuodattimelle se merkitsee kuormitusta 3 - 1950 g/d, mikäli työistö jatkuu samanlaisena koko vuorokauden ympäri.



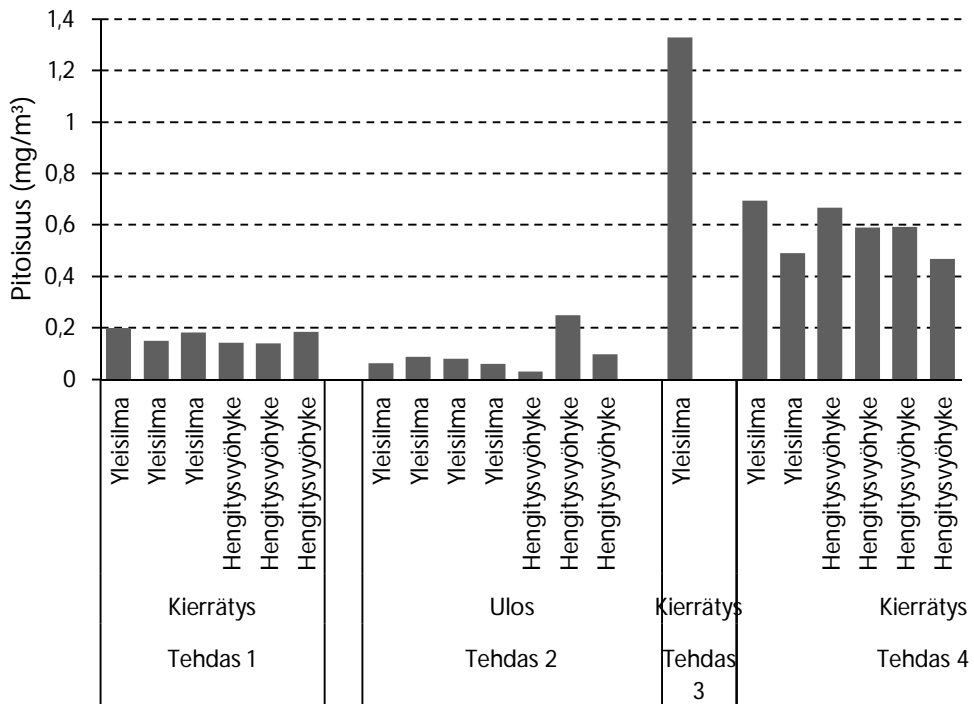
Kuva 13. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (TVOC) pitoisuudet suodatusyksikköjen poistoilmassa. Suodatinyksiköstä 4 ei mitattu TVOC-pitoisuutta suodattimen jälkeen. Tehtaassa 3 ei mitattu haihtuvia orgaanisia yhdisteitä ennen suodatinta. Tehtaassa 4 ei mitattu haihtuvia orgaanisia yhdisteitä suodatinyksiköstä.

Poistoilmasta mitatut formaldehydin pitoisuudet jäivät alle määrittämissä, joka käytetyillä näytteenottoajoilla oli noin 0,015 mg/m³.

4.4 Työilman laatu ja työntekijän altistuminen

Alkanoliamiinien on ajateltu olevan ainakin osittain metallintyöstönesteiden aiheuttamien hengityselinoireiden ja terveysvaikutusten taustalla. Alkanoliamiinien summapitoisuuden keskiarvo työntekijöiden hengitysvyöhykkeellä oli tässä tutkimuksessa 0,30 mg/m³ ja vaihteluväli 0,03 – 0,66 mg/m³. Se on korkeampi kuin aikaisemmassa tutkimuksessa suomalaisilla konepajoilla mitattujen alkanoliamiinien pitoisuuksien keskiarvo 0,11 mg/m³ ja vaihteluväli <0,004 – 0,345 mg/m³ (Suuronen 2009).

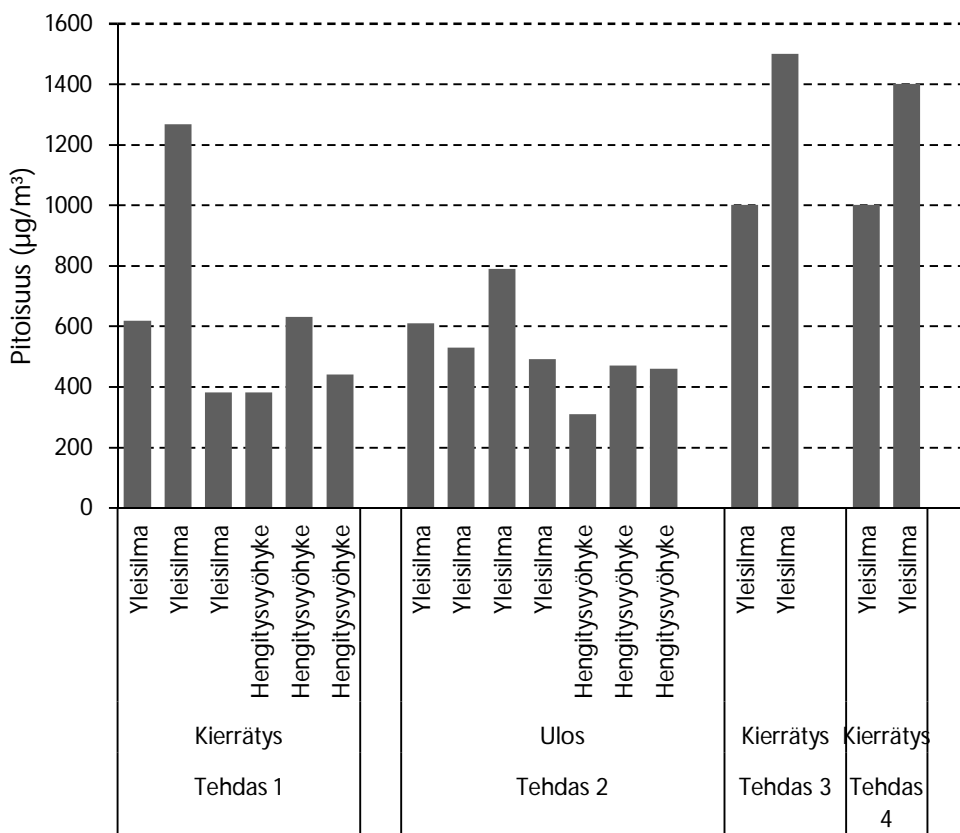
Alkanoliamiinien pitoisuudet työntekijöiden hengitysvyöhykkeellä olivat lähes samalla tasolla kuin työtilan yleisilmassa (Kuva 14). Työntekijöiden altistuminen aiheutui siis pääasiassa työtilan yleisilman epäpuhtauksista. Alkanoliamiinien pitoisuustasot vaihtelivat eri tehtaissa riippuen sekä käytettävästä työstönesteestä että kierrätysilman käytöstä. Työtilan alkanoliamiinien pitoisuudet alittivat Työterveyslaitoksen suositteleman tavoitetason 0,1 mg/m³ tehtaassa 2. Tosin sielläkin yhden työntekijän pitoisuudet ylittivät tavoitetason. Muissa tehtaissa pitoisuudet vaihtelivat välillä 0,14 – 1,3 mg/m³. Pitoisuudet eivät sen sijaan ylittäneet yksittäisten yhdisteiden haitalliseksi tunnettuja pitoisuuksia missään tehtaassa. Park ym. (2012) tutkivat työstönesteen ja ilman etanoliamiinikoostumuksen välisiä suhteita. Heidän havaintojensa mukaan etanoliamiinien yhteispitoisuudet työstössä olivat 0,15 – 0,98 mg/m³.



Kuva 14. Alkanoliamiinien pitoisuudet työtilojen yleisilmassa ja työntekijöiden hengitysvyöhykkeellä.

Mikäli altistuminen muillekin amiineille otetaan huomioon, kokonaisamiinien pitoisuudet työtilassa ja työntekijöiden hengitysvyöhykkeellä vaihtelivat välillä 0,18 – 2,0 mg/m³.

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuudet työtilojen yleisilmassa ja työntekijöiden hengitysvyöhykkeellä vaihtelivat 0,38 – 1,4 mg/m³ (Kuva 15). Pitoisuudet alittivat Työterveyslaitoksen teollisuusilman viitearvon 3 mg/m³.



Kuva 15. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuudet työtilan ilmassa ja työntekijöiden hengitysvyöhykkeellä.

Metallintyöstönesteille altistumista on perinteisesti arvioitu aerosolimassapitoisuuden perusteella. Tässä tutkimuksessa hiukkasten massapitoisuudet olivat melko alhaiset sekä työntekijöiden hengitysvyöhykkeellä että työtilojen yleisilmassa. Mitatut hengittyvän pölyn pitoisuudet työntekijöiden hengitysvyöhykkeellä olivat alle $0,5 \text{ mg/m}^3$ ja yleisilmassa alle hengittyvän pölyn määrittämissä rajat, joka käytetyillä näytteenottoajoilla oli noin $0,2 - 0,4 \text{ mg/m}^3$. Pitoisuudet olivatkin samaa suuruusluokkaa riippumatta mittaustaikasta (työntekijä, yleisilma jne.) tai mittaustaikan työstökoneissa käytössä olevasta kohdepoistoilman suodatusjärjestelmästä (ulosjohtaminen tai kierrätys). Pölyn massapitoisuudet työpaikan ilmassa alittavatkin selvästi öljysumulle käytettävän HTP-arvon 5 mg/m^3 ja ne alittavat myös Työterveyslaitoksen yleiselle pölylle suosittelemat tavoitetasot (alveolijae $0,5 \text{ mg/m}^3$ ja hengittyvä pöly 2 mg/m^3) sekä NIOSH:n metallintyöstönesteille esittämän REL-ohjearvon $0,5 \text{ mg/m}^3$. Mitatut pölyn massapitoisuudet vastasivat hyvin muissa tutkimuksissa mitattuja aerosolipitoisuuksia $0,22 - 0,78 \text{ mg/m}^3$ (Woskie ym. 2003).

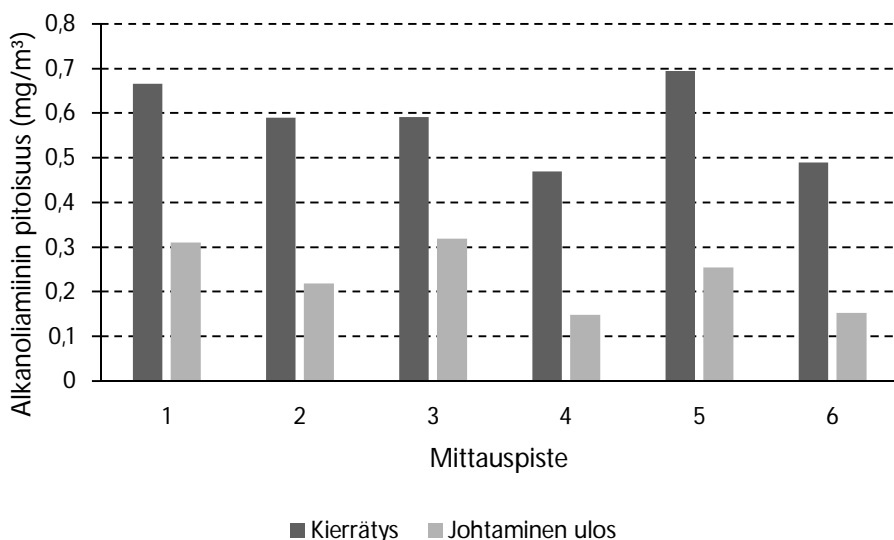
Boudy ym. (2000) suosittelee HEPA-suodattimien käyttöä päätesuodattimena. Kaikissa mitatuissa suodatinyksiköissä olikin käytössä HEPA-suodattimet päätesuodattimina. Suodatinjärjestelmien hiukkassuodatus vaikutti hyvin toimivan mitatuissa kohteissa.

Myös formaldehydin pitoisuudet työtilan ilmassa olivat pieniä. Yleensä pitoisuudet yleisilmassa olivat lähellä määräysrajaa, joka yleisilmanäytteissä oli noin $0,004 \text{ mg/m}^3$. Tehtaassa 3 ennen formaldehydin pitoisuudet yleisilmassa olivat $0,04\text{-}0,07 \text{ mg/m}^3$ ennen muutostöitä, joissa kohdepoistoilma johdettiin ulos työtilasta. Myöskään työtilojen ilman endotoksiinipitoisuudet eivät olleet korkeita. Mitatut pitoisuudet vaihtelivat välillä $2\text{-}31 \text{ EU/m}^3$. Endotoksiineja mitattiin kuitenkin vain kolmessa työpisteessä ja lisäksi näytteenotto suunnattiin työpisteisiin, joiden työstönesteestä mitatut endotoksiinipitoisuudet olivat kohonneita.

4.5 Kohdepoistoilman käsittely ja altistumisen vähentäminen

4.5.1 Ulos johtamisen vaikutus

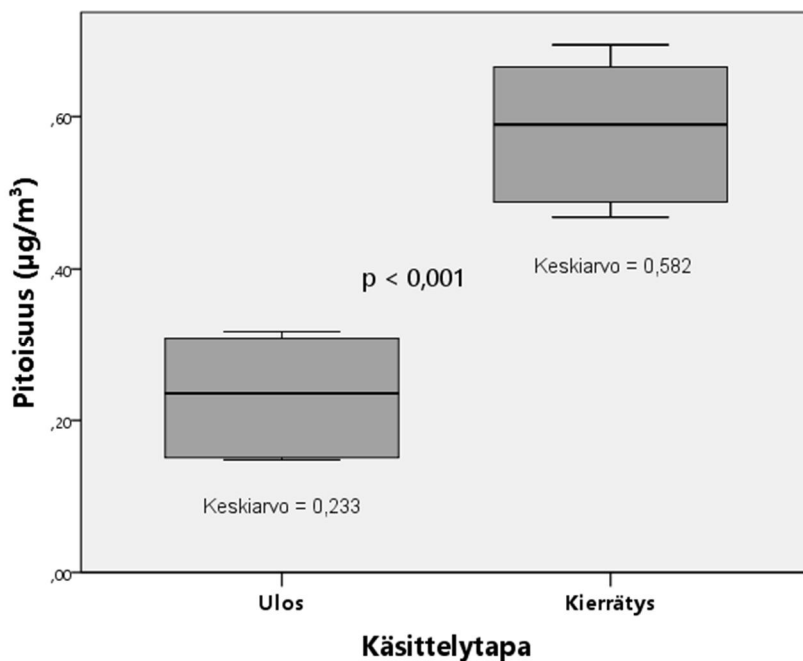
Tehtaassa 4 ensimmäinen mittaus tehtiin tilanteessa, jossa työstökeskusten kohdepoistojen ilma kierrätettiin takaisin työtilaan. Ensimmäisten mittausten jälkeen tehtiin muutos, jossa kohdepoistojen suodatusyksikköjen ilma johdettiin ulos. Toisella mittauskerralla alkanoliamiinien pitoisuudet olivat keskimäärin 60 % pienemmät (Kuva 16) ja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuudet keskimäärin 70 % pienemmät (Taulukko 12) kuin silloin kun työstökeskusten kohdepoistojen ilmaa kierrätettiin takaisin työtilaan. Ero alkanoliamiinien pitoisuuksissa eri mittauskertojen välillä oli tilastollisesti erittäin merkitsevä (parittainen t-testi, $p < 0,001$).



Kuva 16. Alkanoliamiinien pitoisuudet eri mittauspisteissä tehtaassa 4 ennen ja jälkeen työstökeskusten kohdepoistoilman johtamista ulos.

Taulukko 12. TVOC pitoisuudet tehtaassa 4 eri mittauspisteissä tehtaassa 4 ennen ja jälkeen työstökeskusten kohdepoistoilman johtamista ulos.

Mittauspaikka	Kierrätys µg/m ³	Johtaminen ulos µg/m ³
3	1000	330
6	1400	390



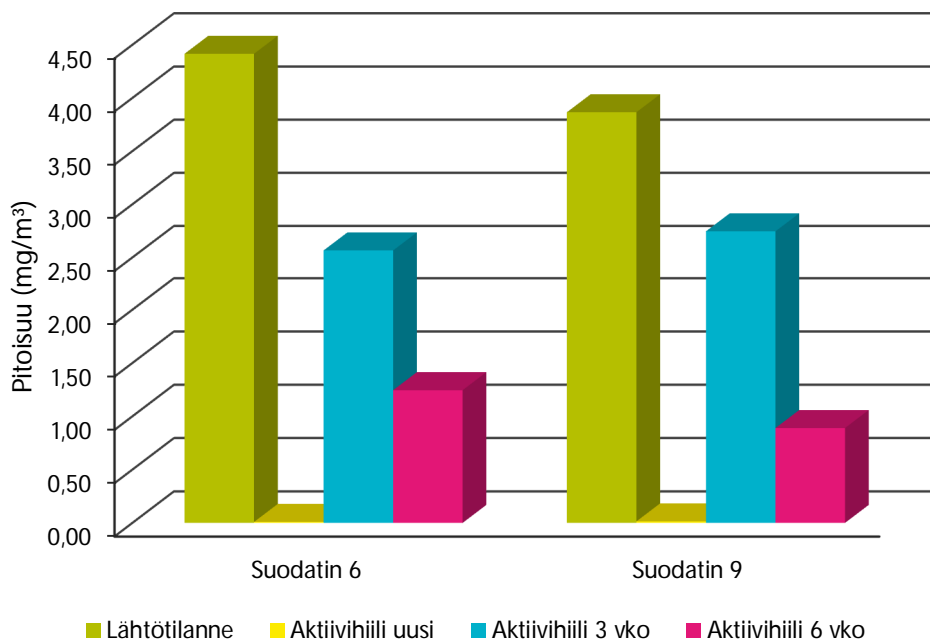
Kuva 17. Boxplot-kuvaaja työntekijöiden hengitysvyöhykkeen ($n=4$) ja työtilan yleisilman ($n=2$) alkanoliamiinipitoisuuksista tehtaassa 4, kun työstökoneiden kohdepoistoilma kierrätettiin takaisin työtilaan tai johdettiin suoraan ulos.

Ulos johtaminen vähentää altistumista. Se ei kuitenkaan lopeta sitä täysin, koska päästöjä syntyy myös muualta. Piacitelli ym.:n (2001) tutkimuksessa havaittiin, että ruuvikoneella kohdepoiston käyttö yhdessä koneen koteloinnin kanssa vähensi työntekijöiden altistumista työstönes-teaerosolille 46 %.

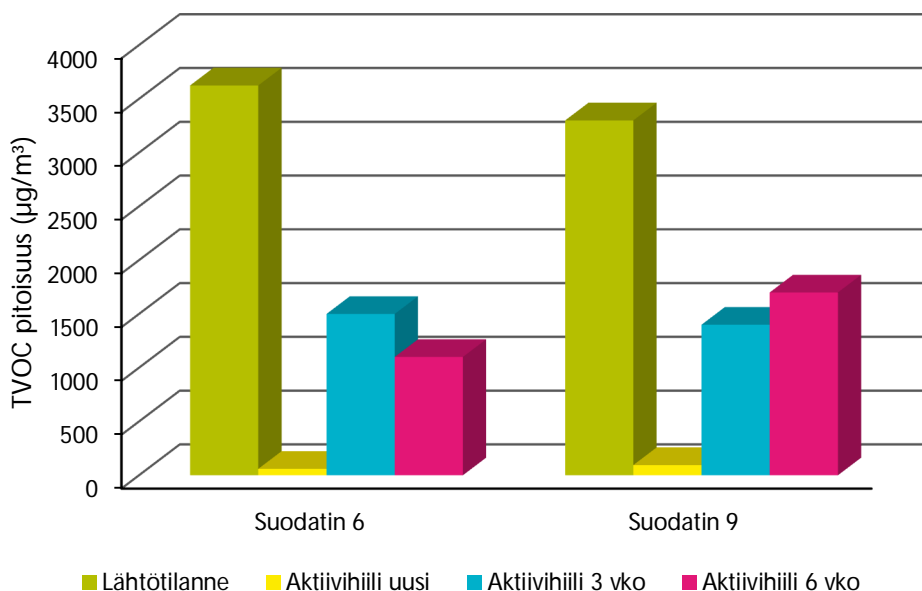
4.5.2 Aktiivihiihluodatuksen vaikutus

Tehtaassa 3 kahden eri työstökeskuksen neljään suodatinyksikköön asennettiin aktiivihiihluodattimet HEPA-suodattimen jälkeen. Uutena happokäsittelyt aktiivihiihluodattimet pidättivät hyvin alkanoliamiineja, mutta päästivät läpi jonkin verran haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (Kuva 18 ja Kuva 19). Kolmen viikon jälkeen aktiivihiihluodattimen poistotehokkuus oli pudonnut jo 30-40 %:iin amiinien osalta ja noin 60 %:iin orgaanisten yhdisteiden osalta. Kuuden viikon jälkeen amiinien pitoisuudet aktiivihiihluodattimen jälkeen olivat pienempiä kuin kolmen viikon jälkeen. Tämä saattaa johtua siitä, että työstökoneet olivat olleet poissa käytöstä ennen mittausta ja siten aktiivihiihluodattimen kuormitus ei vastannut aikaisempien mittausten kuormitusta, tai seisokkiaikana aktiivihiihluodatin ehti regeneroitua.

Normaalitilanteessa aktiivihiilisuodattimen kuormitus oli suuruusluokaltaan 0,7 – 1,2 mg/s alkanoliamiineja ja 0,6 – 0,9 mg/s haihtuvia orgaanisia yhdisteitä. Kolmen viikon kuormitusajalla aktiivihiilisuodattimen kuormittui noin 1,5 kg orgaanisia yhdisteitä ja 1,3 kg – 2,1 kg alkanoliamiineja. Lisäksi aktiivihiileen kohdistui arviolta 5 kg:n kuormitus vesihöyryä.

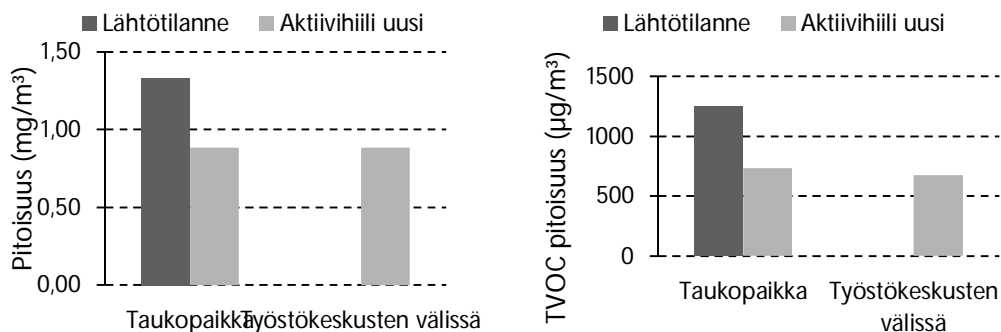


Kuva 18. Aktiivihiilisuodattimen vaikutus alkanoliamiinien pitoisuuksiin työkeskusten kohdepoiston kierrätysilmassa.



Kuva 19. Aktiivihillisuodattimen vaikutus haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (TVOC) pitoisuuksiin työstökeskusten kohdepoiston kierrätysilmassa.

Aktiivihillisuodatuksen vaikutusta työntekijöiden altistumiseen verrattiin mittaamalla työtilan yleisilman alkanoliamiini- ja TVOC-pitoisuuksia työstökoneiden läheisyydessä sekä ennen aktiivihillisuodattimien asentamista että heti asentamisen jälkeen (Kuva 20). Aktiivihillisuodattimen lisäys kahden työstökeskuksen yhteensä neljään suodatusyksikköön vähensi työstökoneiden läheisyydessä ollutta alkanoliamiinien pitoisuutta keskimäärin 34 % ja TVOC pitoisuutta keskimäärin 44 %. Vaikutusta arvioitaessa on toki huomattava, että työtilan muihin työstökoneisiin ei oltu asennettu aktiivihillisuodattimia, joten näiden suodatusyksikköjen läpi kulkeutuneet alkanoliamiinit ja haihtuvat orgaaniset yhdisteet (TVOC) kulkeutuvat myös mitattujen työstökeskusten työskentelyalueelle.



Kuva 20. Alkanoliamiinien (vasemmalla) ja TVOC:n (oikealla) pitoisuudet yleisilmassa tehtaassa 3 verrattaessa aktiivihiihiin suodatuksen käyttöä tilanteeseen, jossa kohdepoiston ilma johdettiin suoraan suodatusyksiköstä työtilaan (lähtötilanne).

4.6 Kohdepoistoilman kierrättämisen vaikutus yleisilmanvaihdon tarpeeseen

4.6.1 Laimennusilmanvaihdon tarve

Työstökoneiden kohdepoistoilman kierrättämisen takaisin työtilaan vaikutusta yleisilmanvaihdon tarpeeseen arvioitiin suodatusyksikköjen alkanoliamiinien päästöjen perusteella. Taulukko 13 on esitetty suodatusyksikköjen läpi päässeeseen alkanoliamiinien massavirran perusteella laskettu yleisilmanvaihdon tarve, jotta takaisin työtilaan johdettavan alkanoliamiinien pitoisuus saadaan laimennettua joko työtilan vallitsevaan keskiarvopitoisuuteen tai Työterveyslaitoksen suositamalle tavoitetasolle 0,1 mg/m³. Kaikissa tapauksissa tarvittava laimennusilman tilavuusvirta oli suurempi kuin suodatusyksikön poistoilmavirta. Suodatusyksikköjen läpi kulkeneen ilman kierrättäminen takaisin työtilaan siis lisää työtilan ilmanvaihdon tarvetta. Kahta tapausta lukuun ottamatta (suodatin nro 5 ja suodatin nro 2) tarvittava laimennusilman virta oli moninkertainen (5-50 kertaa suurempi) suhteessa suodatusyksikön tilavuusvirtaan.

Taulukko 13. Ilmaa takaisin työtilaan kierrättävistä suodatusyksiköistä mitatut poistoilmavirrat ja yksikön läpi päässyt alkanoliamiinien massavirta sekä päästön perusteella laskettu yleisilmanvaihdon laimennusilmavirran tarve.

Suodatin yksikkö nro	Poistoilmavirta m ³ /s	Alkanoliamiinien massavirta mg/s	Tavoitetasoon 0,1 mg/m ³	
			Laimennusilman tarve m ³ /s	Osuus poistoilmavirrasta (%)
2	3,78	0,66	6,6	175
3	0,17	0,10	1,0	590
5	0,38	0,04	0,4	105
6	0,30	0,21	2,1	710
7	0,11	0,15	1,5	1350
8	0,23	1,16	11,6	5040
9	0,23	0,90	9,0	3910
10	0,23	1,11	11,1	4825
11	0,23	0,70	7,0	3045

Laimennusilmavirran tarve riippuu tietysti tavoitteeksi asetettavasta työtilan ilman pitoisuudesta. Eräiden alkanoliamiinien HTP-arvot vaihtelevat 2-5 mg/m³ välillä (Taulukko 3), mutta ilmanvaihdon suunnittelussa käytetään tavallisemmin tavoitearvona 1/10 – 1/4 HTP-arvosta (yleinen teollisuustaso). Tällä perusteella tavoitetaso vaihtelisi välillä 0,2 – 1,25 mg/m³ riippuen käytettävän työstönesteen koostumuksesta. Näissäkin tapauksissa yli puolessa mitatuista suodatusyksiköistä laimennusilman tarve on selvästi suurempi kuin suodatusyksikön poistoilmavirta.

4.6.2 Kustannukset

Lisääntyneen laimennusilmanvaihdon tarpeen kustannuksia selvitettiin vertaamalla laskennallisesti kolmen erikokoisen ilmastointikoneen aiheuttamia investointi- ja käyttökustannuksia. Laskennassa ideana oli, että hallin yleisilmanvaihtoa lisätään ja yleispoistosta otetaan lämpöä talteen. Ilmanvaihtokoneisiin ei laskettu mukaan jäähdytystä. Laskennassa oletuksena käytettiin Tampereen sääoloja. Tuloilman sisäänpuhalluslämpötilaksi oletettiin +16 °C ja poistoilman lämpötilaksi +23 °C. Energian hinnaksi oletettiin lämmön osalta 62 €/MWh ja sähkön osalta

118 €/MWh. Koska pelkkä konehankinta ei riitä, vaan tarvitaan myös mm. kanavointia, automaatiota ja asennusta, lisättiin konehintoihin kokemukseen perustuva lisä kattamaan näitä kustannuksia. Todellisuudessa voi investointi tulla vieläkin kalliimmaksi, jos lisäyksen takia joudutaan laajentamaan lämpöverkkoa tai joudutaan tekemään tilalaaennuksia yms. Tuloksena karkeaksi hinta-arvioksi käsiteltyä m³/s-kohden konekoosta riippuen tulee:

INVESTOINTI: 9 000 ... 16 000 € per 1 m³/s

ENERGIAKULLU: 1 700 ... 1 900 € per 1 m³/s

Yhdessä koekohteessa (tehdas 4) alkumittausten jälkeen päätettiin johtaa suodatinyksiköistä ulos tuleva ilma suoraan ulkoilmaan. Ongelmaksi muutostyön jälkeen muodostui epätasapaino tulo- ja poistoilman välillä. Tämä aiheutti ongelmia etenkin talvella, jolloin liian kylmä tuloilma aiheutti jonkinasteisia ongelmia.

Kohteesta saatujen tietojen mukaan ulos johtamisen kustannukset olivat seuraavat:

- lämmityskulujen lisääntyminen talvella noin 50 % (800 €/kk → 1200-1300 €/kk)
- poistojen rakentamisen kulut olivat noin 4000 euroa (3 ulosvientiputkistoa)
- syntyneen tulo- ja poistoilman epätasapainon kompensoimiseksi tarvittiin yksi uusi yleisilmavaihtokone nykyisten kolmen lisäksi, kustannukset laite 8000 € + asennukset noin 8000 €.

Mikäli samaan ilman laatuun olisi haluttu päästä lisäämällä laimennusta yleisilmanvaihdon ilmavirtoja kasvattamalla, arvioiden mukaan yleisilmanvaihdon ilmavirrat olisi pitänyt 5-6 kertaistaa arvoon noin 11 m³/s. Arvioiden mukaan investointikustannukset olisivat olleet noin 100 000 € ja energiakustannukset olisivat lisääntyneet noin 20 000 € vuodessa.

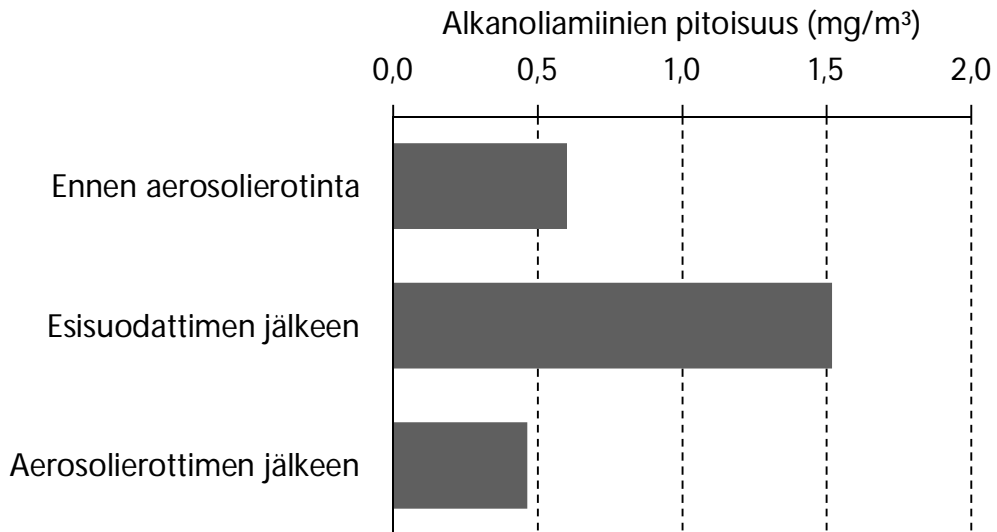
4.7 Metallin työstön aerosolierotin

4.7.1 Laboratoriokokeet

Näissä kokeissa selvitettiin metallintyöstön aerosolierottimen ensimmäisen konfiguraation kykyä erottaa leikkuuneste-aerosolin generoinnissa muodostuvia alkanoliamiineja ja haihtuvia orgaanisia yhdisteitä. Näytteistä analysoidut alkanoliamiinien pitoisuudet on esitetty Kuva 21. Tulosten mukaan alkanoliamiinien pitoisuudet kasvavat esisuodatuksessa ennen uutta erotinosaa. Tämä selittyy todennäköisesti alkanoliamiinien vapautumisesta ilmaan esisuodattimeen kertyvästä leikkuunesteestä. Näissä kokeissa alkanoliamiinien pitoisuudet olivat pienempiä kuin HTP-arvot, mutta kokonaispitoisuudet olivat suurempia kuin Työterveyslaitoksen esittämä tavoitetaso 0,1 mg/m³.

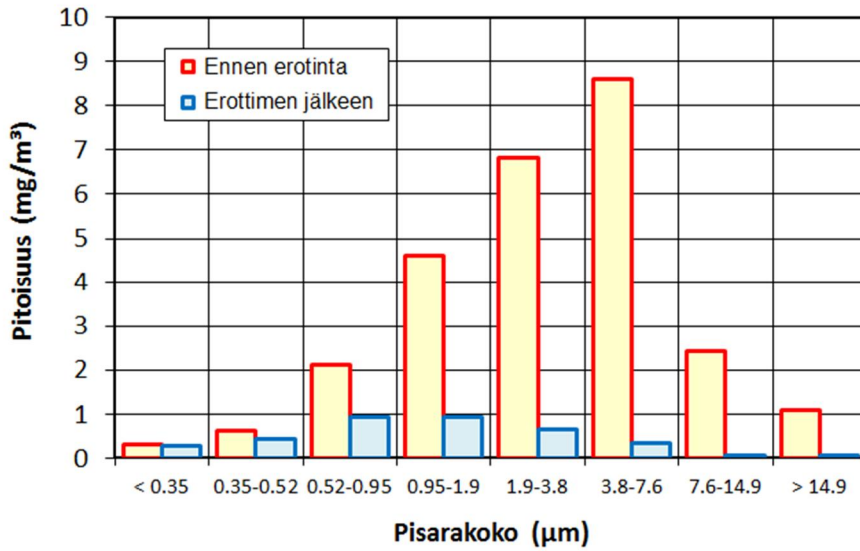
Kokeessa selvitettiin myös haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuuksia (TVOC) ja erityyppisten yhdisteiden esiintyvyyttä. Tulosten mukaan TVOC-arvot aerosolierottimen jälkeen

olivat alempia kuin vastaavat arvot laitteistoon menevässä ilmassa. Tämä on mielenkiintoinen tulos lähinnä siksi, että erottimessa ei käytetty lainkaan kemiallista suodatusta.

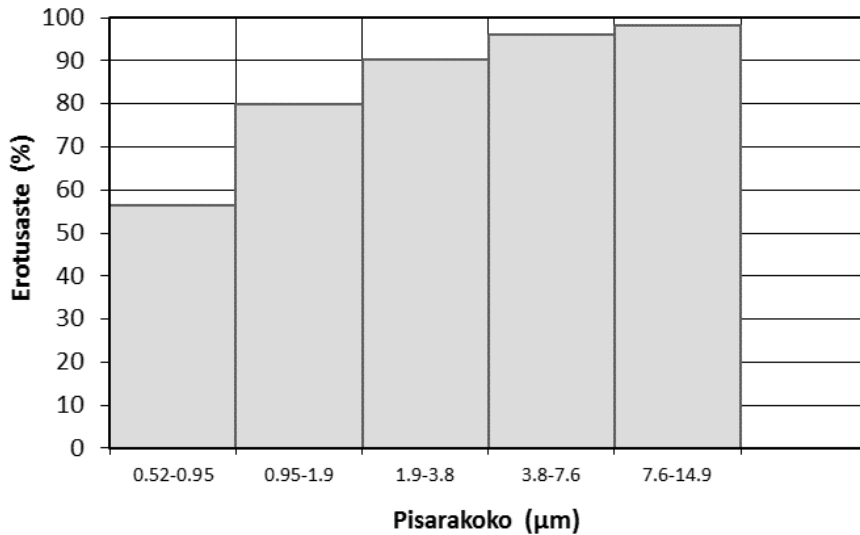


Kuva 21. Laboratoriotestissä mitattujen alkanoliamiinien pitoisuudet aerosolierottimen eri vaiheiden jälkeen sen ensimmäisessä koeversiossa.

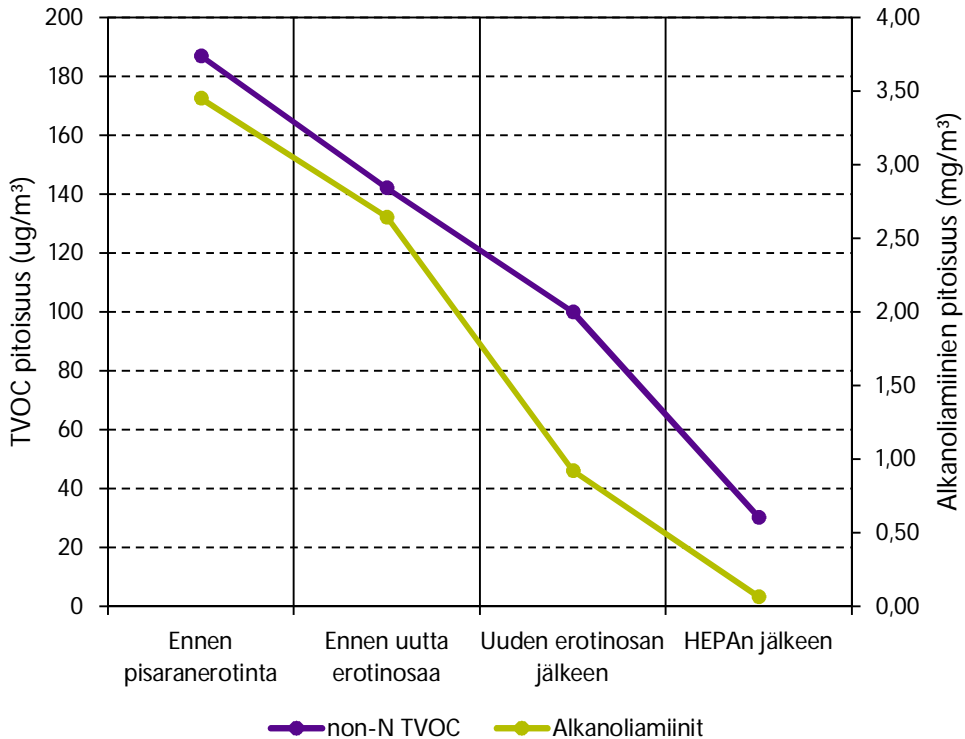
Laboratoriokokeissa tehty havainto suodattimen ominaisuudesta kerätä leikkuunestettä ja toimia sen jälkeen kaasumuodossa olevien epäpuhtauksien lähteenä johti koejärjestelyyn, jossa suodattimen tilalle asennettiin pisaranerotin, jolla voidaan erottaa pisaramuodossa olevat epäpuhtaudet varsin hyvällä erotusasteella (Kuva 22 ja Kuva 23). Oletuksena oli, että pisaranerotin ei luovuta keräämästään nesteestä merkittäviä määriä kaasumaisia epäpuhtauksia. Mittaustulokset tukivat tätä olettamusta, ts. pisaranerotin jälkeen mitatut amiinipitoisuudet olivat selvästi alempia kuin ensimmäisen koeversion tapauksessa (Kuva 25).



Kuva 22. Leikkuuneste-aerosolin kokojakaumat ennen pisaraerotinta ja sen jälkeen.



Kuva 23. Pisaraerottimen erotusaste.

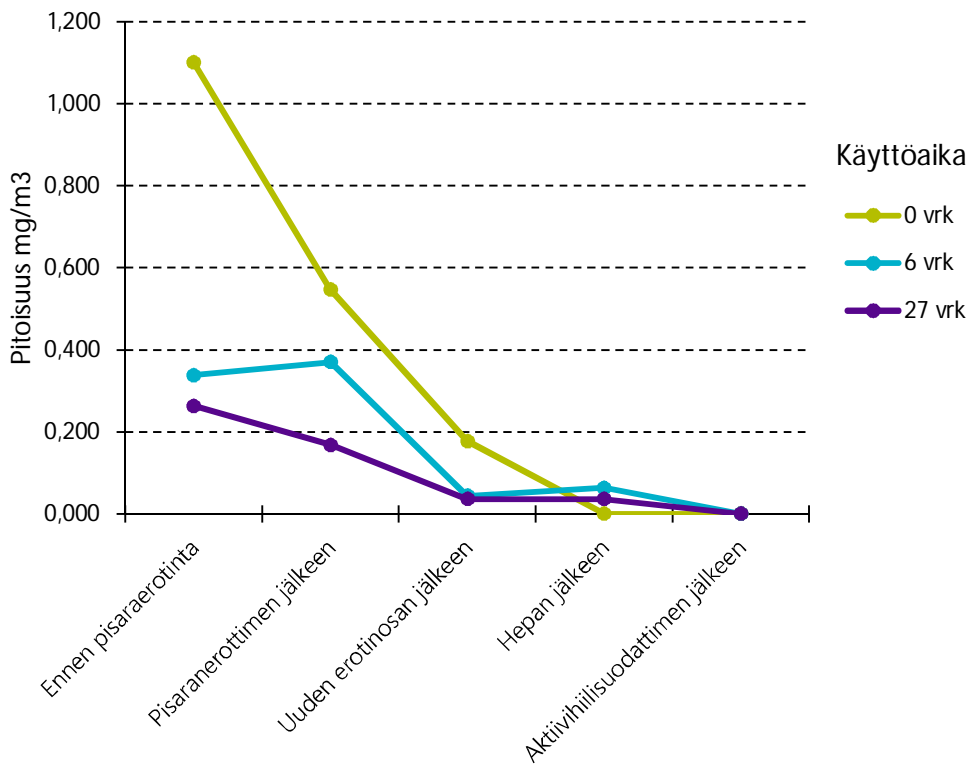


Kuva 24. Laboratoriotestissä mitattujen alkanoliamiinien ja ei tyypeä sisältävien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (non-N TVOC) pitoisuudet aerosolierottimen eri vaiheiden jälkeen prototyypin toisessa konfiguraatiossa..

4.7.2 Kenttäkokeet

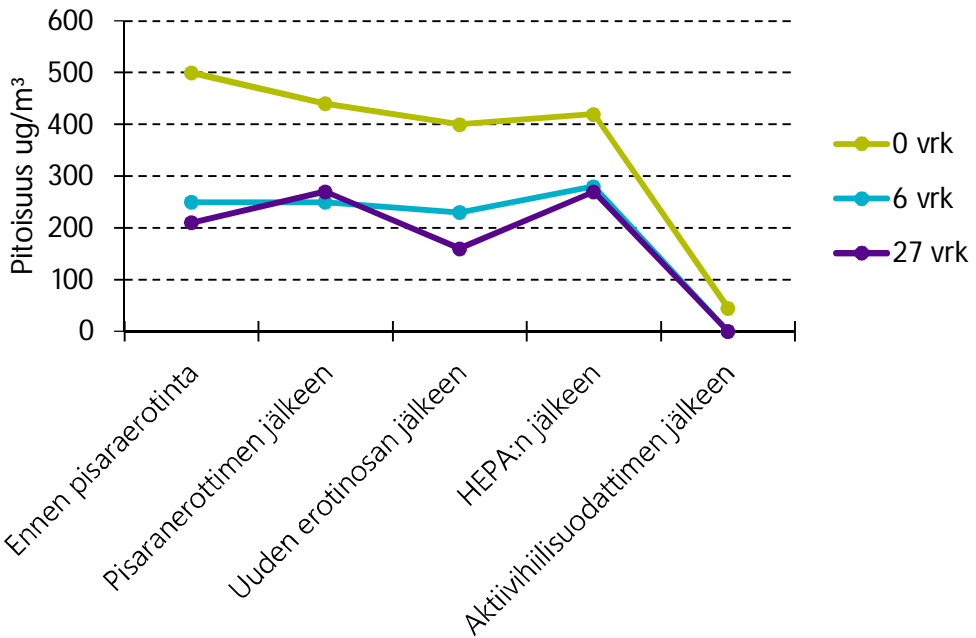
Erottimen toimintaa seurattiin ja varmistuttiin, että laitteisto pysyi toimintakykyisenä. Indikaattoreina toimi mm. erottimen eri osien likaantuminen, suodattamattoman ilman laatu, suodatetun ilman laatu ja muut käyttökokemukset.

Syötettävän ja palautettavan kohdepoistoilman näytteet otettiin testijakson alussa ensimmäisen viikon jälkeen ja neljän viikon jälkeen/lopuslla. Mitattavia suureita olivat alkanoliamiinien ja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden erottuminen laitteiston eri osissa (Kuva 25 ja Kuva 26). Erottimen toimintaa pystyttiin seuraamaan 4 viikon ajan. Tällä ajalla erotin pystyi poistamaan sekä alkanoliamiinit että haihtuvat orgaaniset yhdisteet työstökoneen kohdepoistoilmasta.



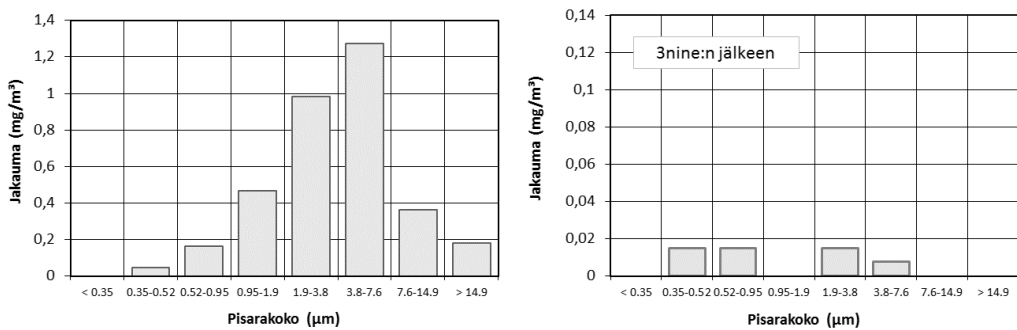
Kuva 25. Alkanoliamiinien pitoisuudet uuden aerosolierottimen eri vaiheissa.

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (TVOC) suhteen laite toimi myös suhteellisen tehokkaasti, keskimääräinen läpipäässeiden VOC-yhdisteiden pitoisuus aktiivihiihluodattimen jälkeen oli alle 10 % ennen laitteistoa mitatusta pitoisuudesta.

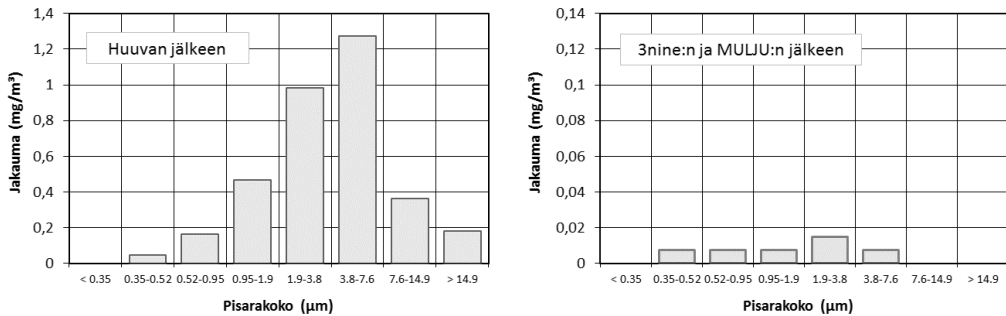


Kuva 26. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (TVOC) pitoisuudet uuden aerosolierottimen eri vaiheissa.

Aerosolin hiukkaskokojakaumat mitattiin ennen erotinta sekä erottimen eri osista kahdesta kohdasta. Mittaustulosten mukaan erottimen ensimmäinen osa erottaa pisaramuodossa olevat epäpuhtaudet erittäin tehokkaasti (>90 %) (Kuva 27 ja Kuva 28). Niinpä ensimmäisen osan jälkeä pitoisuus oli niin pieni, ettei aerosolierottimen vaikutusta voitu määrittää tarkasti.

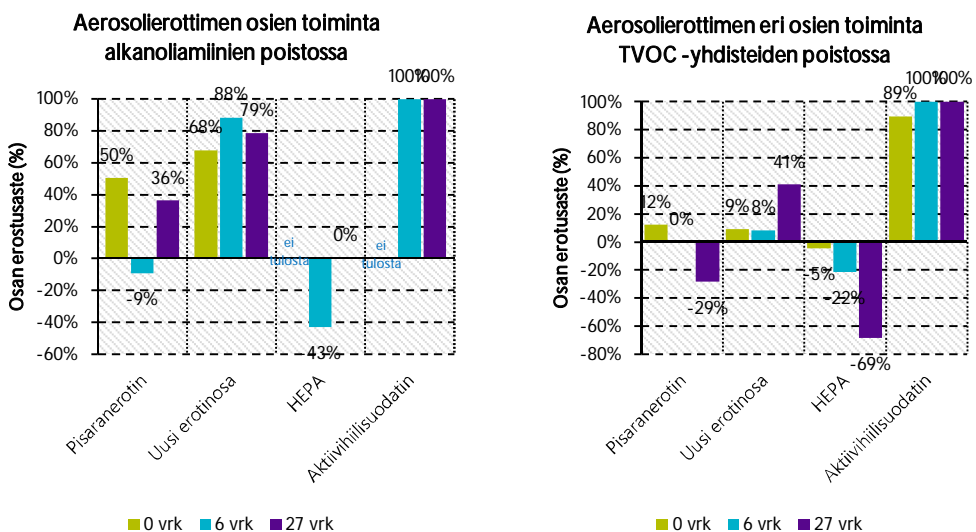


Kuva 27. Kokojakaumat huuven jälkeen ennen erotinta (3nine) ja erottimen jälkeen.



Kuva 28. Kokojakaumat huuvin jälkeen ennen erotinyhdistelmää ja yhdistelmän jälkeen.

Uuden metallintyöstön aerosolierottimen eri osien toiminta kaasufaasissa olevien yhdisteiden erottamisen osalta on esitetty kuvassa 29. Erottimen uusi erotinosa poisti hyvin alkanoliamiineja, mutta ei erottanut juurikaan haihtuvia orgaanisia yhdisteitä. Erottimen HEPA-osa lisäsi ajoittain ilman kaasumaisten yhdisteiden pitoisuuksia. Aktiivihilisuodatin suodatti pääasiassa kaikki mitatut kaasumaiset yhdisteet ilmasta koko mittausjakson ajan.



Kuva 29. Uuden metallintyöstön aerosolierottimen eri osien erotusasteet kenttäkokeissa eri ilman epäpuhtauksille.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1 Yleiset johtopäätökset

Tutkituissa kohteissa metallintyöstökeskusten kohdepoistojen suodatuslaitteistot oli varustettu hiukkas- ja HEPA-suodattimilla, jolloin työntekijöiden altistuminen hiukkasmaisille epäpuhtauksille jää alhaiseksi. Metallintyöstönesteet sisältävät kuitenkin myös kaasumaisia terveydelle haitallisia yhdisteitä. Tällaisia yhdisteitä ovat esimerkiksi työstönesteiden alkanoliamiinit, joista kaikki eivät pidäty nykyisin suodatuslaitteistoissa käytettäviin hiukkassuodattimiin.

Suodatuslaitteistojen läpi tulevan ilman havaittiin sisältävän merkittäviä määriä metallintyöstönesteestä peräisin olevia haihtuvia yhdisteitä, kuten alkanoliamiineja ja muita haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC). Niiden pitoisuudet suodatuslaitteistojen poistoilmassa olivat merkittävästi korkeammat kuin työtilan yleisilman pitoisuudet. Mikäli työstökeskusten ilmansuodatuslaitteiden läpi kulkenut ilma puhalletaan takaisin työtilaan pelkästään hiukkassuodattimien läpi, heikentää se siis merkittävästi työtilan ilman laatua ja lisää siten työntekijöiden altistumista metallintyöstönesteistä peräisin oleville ilman epäpuhtauksille.

Vaikka metallintyöstössä esiintyvien yksittäisten epäpuhtauksien haitallisiksi tunnetut pitoisuudet alitetaan, esiintyy työntekijöillä mm. nuhaa, yskää, silmäoireita, hengenahdistusta, astmaa sekä muita hengitystieoireita. Sen vuoksi Työterveyslaitos on ehdottanut metallintyöstönesteille altistumisen arviointiin indikaattoriksi alkanoliamiinien yhteispitoisuutta ja sille tavoitetta 0,1 mg/m³. Mikäli tähän tavoitetasoon halutaan päästä, tarvitaan jokin seuraavista toimenpiteistä:

- Metallintyöstökeskusten suodatuslaitteistojen ilma johdetaan suoraan ulos työtilasta. Energiatohokkuuden kannalta tämä ei välttämättä ole paras ratkaisu.
- Lisätään merkittävästi työtilojen ilmanvaihtoa, jolloin tarkoituksena on laimentaa suodatuslaitteistojen läpi kulkevien ilman epäpuhtauksien pitoisuuksia. Tähän tarvitaan yleensä merkittäviä ulkoilmavirtoja, jotka ovat moninkertaisia suhteessa suodatuslaitteiston läpi kulkeneeseen ilmavirtaan. Myös tässä ratkaisussa tuotantotilan energiankulutus lisääntyy.
- Parannetaan metallintyöstölaitteistojen suodatusta pidättämään myös kaasumaisia ilman epäpuhtauksia. Tämä on yleensä energiatahokkuuden ja kustannusten kannalta paras vaihtoehto.

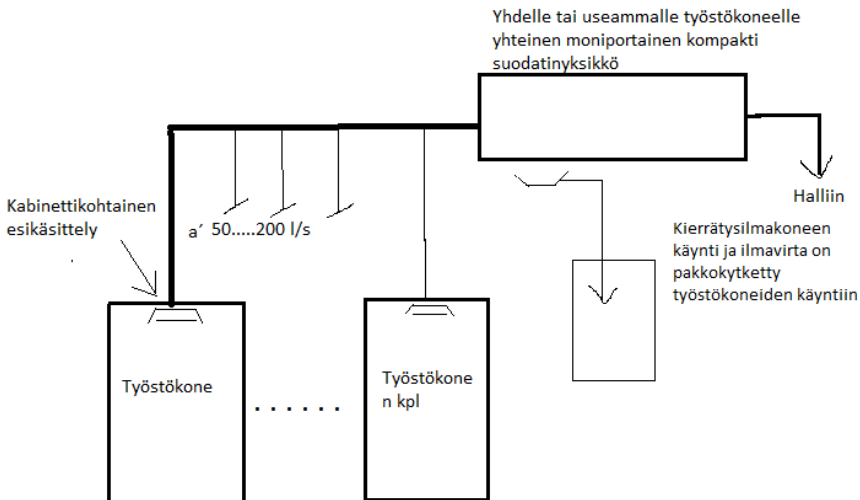
5.2 Parannusehdotukset nykyratkaisuihin

Parannusratkaisujen hyvien ja huonojen puolien arvottaminen taloudellisin perustein on erittäin vaikeaa: Työhygienian tasolle kukin yritys määrittää hinnan tapauskohtaisesti. Tutkimuksessa tavoiteltiin ensisijaisesti työntekijöiden altistumisen vähentämistä.

Kaikkiin nykyisin yleisimmin käytössä oleviin ja kohdassa 1.8 esitettyihin ratkaisuihin löydettiin tutkimuksen tuloksiin perustuvia parannusehdotuksia, kun kriteereinä olivat työhygienian, energia- ja materiaalitehokkuus sekä paloturvallisuus.

Kohdan 1.8 tapauksiin A ja B ehdotetaan vielä jatkokehittelyn alla olevaa uutta aerosolierotinta, jonka yksi osa sijaitsee koteloinnissa (Kuva 30). Oleellista työympäristön työhygienian kannalta on kytkeä puhdistuslaitteistokokonaisuus työstökoneen käyntiin ja kotelointien luukkujen aukioloon. Työstökonekohtaiset ilmavirtojen suuruudet riippuvat mm. kotelointien ja niiden aukkojen koosta.

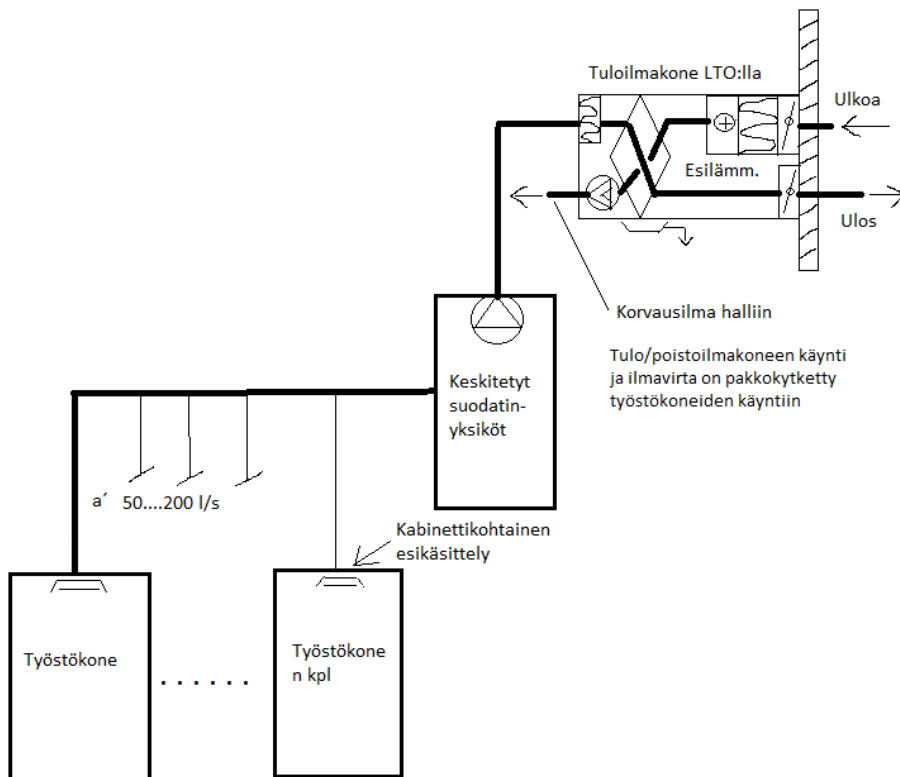
Ratkaisuehdotuksella työympäristön sisäilman laatu paranee nykyisestä merkittävästi ja samalla materiaalitehokkuus lisääntyy ja kanavistot pysyvät nykyistä puhtaampina. Laitteistokokonaisuus ei vaikuta hallin ilmatasapainoon eikä siten korvausilman lämmitysenergiatarpeeseen. Kotelointien alipaineistuksen hallinnan tehostus parantaa ympäristön työhygieniää omalta osaltaan.



Kuva 30. Uudella aerosolierotimella varustettu ratkaisu, kun ilma halutaan kierrättää takaisin työtilaan.

Kohdan 1.8 tapaukseen C (poistoilma ulos) ehdotetaan asennettavaksi kotelointikohtaiset esikäsittely-yksiköt ja LTO-osalla varustetun ilmanvaihtokoneen asentamista ennen poistoilman ulospuhallusta (Kuva 31). Oleellista työympäristön työhygienian kannalta on tässäkin tapauksessa kytkeä tulo- ja poistoilmakoneen käynti työstökoneen käyntiin ja kotelointien luukkujen aukioloon. Työstökonekohtaiset ilmavirtojen suuruudet riippuvat mm. kotelointien ja niiden aukkojen koosta.

Ratkaisuehdotuksella sisäilman laatu paranee edelleen nykyisestä kotelointien alipaineistuksen hallinnan parannuksen myötä ja samalla materiaalihokkuus paranee. Laitteistokokonaisuus parantaa hallin ilmatasapainoa kuitenkin lisäämättä merkittävästi lämmitysenergian kulu- tusta. Laitteistoa tulee huoltaa, mutta suodattimien käyttöikä kasvaa oleellisesti. Lisäksi ehdo- tetulla ratkaisulla kanavistot pysyvät nykyistä puhtaampina. Tässä järjestelyssä on kuitenkin huomattava, että lämmön talteenottojärjestelmä ei saa olla kosteutta siirtävää mallia, koska osa haitallisista ilman epäpuhtauksista on vesiliukoisia.



Kuva 31. Ehdotus parannustoimenpiteiksi, kun ilma työstökoneiden koteloinneista halutaan johtaa ulos.

5.3 Edellytykset epäpuhtauksien tehokkaaseen ja taloudelliseen hallintaan

Jotta työstökoneiden koteloinneista ei leviäisi epäpuhtauksia konetta ympäröiviin työskentelytiloihin haitallisessa määrin, koteloinnit tulee rakentaa mahdollisimman tiiviiksi ja alipaineistaa ne riittävästi ympäristöön nähden. Lisäksi mitä lyhyempi osavaihdoksien ym. tarvitsema luukkujen aukioloaika on, sitä suuremmaksi koteloinnista ja alipaineistamisesta saatava hyöty tulee työskentely-ympäristön ilman laadulle. Kotelointien tiiviyksien onnistumiseen vaikuttaa osaltaan se, kuinka iso kotelointi tarvitaan ja kuinka automatisoidut panostus-, paletinvaihto- ym. prosessit ovat. Epäpuhtauksien leviämiseen vaikuttaa lisäksi osaltaan tehdashallin ilmatasapaino eli sen yli- tai alipaineisuus ulkoilmaan nähden.

Kanavanopeudet olivat tutkituissa kohteissa aivan liian pieniä suhteessa kanavassa kulkevan epäpuhtauden määrään ja laatuun. Monissa tapauksissa kanavistoihin oliin kertynyt likaa, jopa useiden kymmenien millimetrien paksuinen kerros. Kanaviston likaantumisen estämiseksi tarvittava kanavanopeus on noin 23 - 25 m/s. Kanavistoon pääsevien epäpuhtauksien määrä tulee lisäksi minimoida esimerkiksi esisuodatuksen, jollaisia tutkituissa kohteissa ei ollut.

Metallintyöstöprosesseja ja niihin liitettyjä ilmanvaihto- ja ilman käsittelyjärjestelmiä tulee tarkastella kokonaisuuksina eikä vain yksittäisten komponenttien kannalta. Tavoitteena tässä tulee olla paitsi työntekijöiden altistumisen myös energia- ym. kustannusten minimointi.

Ilmanvaihtojärjestelmän ja kanavistojen huoltoon ja kunnossapitoon tulee kiinnittää erityistä huomiota. Kanavat tulee pitää puhtaina ja suodattimia vaihtaa riittävän usein. Jollain lailla pitää myös varmistaa, että esimerkiksi puhaltimen mahdollinen rikkoutuminen huomataan heti sellaisen tapahduttua.

Myös leikkuunesteiden huoltoon tulee kiinnittää huomiota. Jo nestettä valittaessa kannattaa tarkastella vaihtoehtoisten nesteiden koostumuksia paitsi teknisten ominaisuuksien myös nesteistä mahdollisesti aiheutuvien terveysvaikutusten kannalta. Esimerkiksi nesteen sisältämällä biosideilla eli mikrobien kasvua estävillä aineilla saattaa olla haitallisia iho- tai hengitystievaikutuksia.

Biosidia pitää nesteessä olla koko ajan riittävästi, jotta nesteen bakteerikasvu pysyisi kurissa. Jos sitä nimittäin lisätään jo mikrobeilla kontaminoituneeseen leikkuunesteeseen, saattaa nesteen endotoksiinipitoisuus nousta liian suureksi. Biosidia ei kuitenkaan saa lisätä liikaa, koska tällöin myös työntekijöiden altistuminen saattaa nousta liialliseksi.

Nesteen laatua tulee seurata säännöllisesti ja tarvittaessa vaihtaa neste uuteen. Yleensä työpaikoilla seurataan vain nesteen pH:ta ja taitekerrointa, jonka perusteella voidaan laskea nesteen

väkevyys. Joillakin työpaikoilla seurataan lisäksi nesteen kokonaisbakteeripitoisuutta pikakasvatustesteillä. Paras menetelmä nesteen mikrobiologisen laadun seurantaan on kuitenkin nesteen endotoksiinipitoisuuden mittaaminen.

Myös ihon suojaukseen ja henkilökohtaiseen hygieniaan tulee kiinnittää huomiota, koska leikkuunesteet saattavat sisältää useita ihoa ärsyttäviä ja herkistäviä kemikaaleja. Nesteiden käsittelyä paljain käsin tulisi välttää niin paljon kuin mahdollista, ja leikkuunesteiden pääsy iholle tulisi estää. Tarvittaessa tulisi käyttää sopivia suojakäsineitä. Leikkuunesteillä kontaminoituneet vaatteet pitää vaihtaa uusiin mahdollisimman nopeasti.

Hankkeen yhteydessä kehitetty ja testattu metallintyöstön ilmanvaihto- ja ilman käsittelyjärjestelmä osoittautui tehokkaaksi keinoksi poistaa sekä hiukkasmaisia että kaasumaisia epäpuhtauksia työstökoneelta hengitysilmaan palautettavasta ilmasta. Järjestelmä vaatii kuitenkin vielä lisäkehittämistä ja testaamista käytännön olosuhteissa työpaikoilla.

6 LÄHTEET

Boundy, M., Leith, D., Hands, D., Gressel, M. & Burroughs, G.E. (2000) Performance of Industrial Mist Collectors Over Time. *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 15, nr. 12, pp. 928-935

Cohen, H. & White, E.M. (2006) Metalworking Fluid Mist Occupational Exposure Limits: A Discussion of Alternative Methods. *J. Occup. Environ. Hyg.* Vol. 3, pp. 501–507.

Cooper, S.J. & Leith, D. 1998 Evaporation of Metalworking Fluid Mist in Laboratory and Industrial Mist Collectors, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, vol. 59, nr. 1, pp. 45-51

Dasch, J., D'Arcy, J., Gundrum, A., Sutherland, J., Johnson, J. & Carlson, D. (2005) Characterization of Fine Particles from Machining in Automotive Plants. *J. Occup. Environ. Hyg.* vol. 2, pp. 609-625.

Enbom, S. 1991. Hitsauksen ja hionnan kohdepoistoilman suodatus ja kierrätys. VTT Turvallisustekniikan laboratorio. 52 s.

Gauthier, S.L. (2003) Metalworking Fluids: Oil Mist and Beyond. *Appl. Occup. Environ. Hyg.* Vol. 18, Nr. 11, pp. 818-824.

Hands, D., Sheehan, M.J., Wonga, B. & Lick, H.B. (1996) Comparison of Metalworking Fluid Mist Exposures from Machining with Different Levels of Machine Enclosure. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* Vol 57, Nr. 12, pp. 1173-1178.

Heitbrink, W.A., Earnest, G.S., Mickelsen, R.L., Mead, K.R. & D'Arcy, J.B. (1999). Evaluation of Leakage from a Metal Machining Center Using Tracer Gas Methods: A Case Study, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, vol. 60, nr. 6, pp. 785-788.

Heitbrink, W.A., Yacher, J.M., Deye, G.J. & Beasley Spencer, A. (2000a). Mist Control at a Machining Center, Part 1: Mist Characterization, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, vol. 61, nr. 2, pp. 275-281.

Heitbrink, W.A., D'Arcy, J.B. & Yacher, J.M. (2000b): Mist Generation at a Machining Center, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, vol. 61, nr. 1, pp. 22-30.

Henriks-Eckerman, M-L & Suuronen, K. (2009) Metallityöstön edeteiden alkanoliiniinien tavoitetasoperustelumuuisto. Tavoitetaso TY-02-2009. Työterveyslaitos, 9 p. Saatavilla: http://www.ttl.fi/fi/tyoturvallisuus_ja_riskien_hallinta/riskien_hallinta/ohjeavot_tavoitetasot_haittatekij%C3%B6ille/tavoitetasot/Documents/alkanoliiniinit.pdf

Hyytinen E-R, Santonen T, Vainiotalo S, Rantonen J, Linnainmaa M (2016) Hengittävän ja alveolijakeisen pölyn tavoitetasoperustelumuuisto. Työterveyslaitos, 14 s.

IFA. Gestis substance database. [http://gestis-en.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_en/000000.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis-en.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_en/000000.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0). Viitattu 25.5.2016

KAMAT-tietokortit, Metallien työstö. Saatavana: http://www.ttl.fi/fi/kemikaaliturvallisuus/ainekohtaista_kemikaalitietoa/kemikaalit_ja_ty%C3%B6/Documents/Kemikaalit_jaTyo.pdf

Laitinen, S., Linnainmaa, M., Laitinen, J., Kiviranta, H., Reiman, M. & Liesivuori, J. (1999) Endotoxins and IgG antibodies as indicators of occupational exposure to the microbial contaminants of metal-working fluids. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, vol 72, pp. 443-450.

Leith, D., Volckens, J., Boundy, M.G. & Hands, D. (2003) Control Methods for Mineral Oil Mists, *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 18, nr. 11, pp. 883-889.

Lillienberg, L., Burdorf, A., Mathiasson, L. & Thörneby, L. (2008). Exposure to Metalworking Fluid Aerosols and Determinants of Exposure. *Ann. Occup. Hyg.*, Vol. 52, No. 7, pp. 597-605.

Linnainmaa, M., Kiviranta, H., Laitinen, J. & Laitinen, S. (2003) Control of Workers' Exposure to Airborne Endotoxins and Formaldehyde During the Use of Metalworking Fluids. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, vol. 64, nr. 4, pp. 496-500.

Michalek, D.J., Hii, W.W.-S, Sun, J., Gunter, K.L. & Sutherland, J.W. (2003). Experimental and Analytical Efforts to Characterize Cutting Fluid Mist Formation and Behavior in Machining, *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 18, nr 11, pp. 842-854.

OECD (2004) Emission scenario document on lubricant and lubricant additives. ENV/JM/MONO(2004)21.

Park, D., Kim, S & Ha K. (2012). Relationships among Fluid Ethanolamine Formulation, Airborne Ethanolamines, and Aerosol Levels in Machining Operations. *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 12, pp. 553–560.

Piacitelli,

Sheehan, M. J. & Hands, D. (2007) Metalworking Fluid Mist—Strategies to Reduce Exposure: A Comparison of New and Old Transmission Case Transfer Lines, *J Occup. Environ. Hyg.*, Vol 4, Nr. 4, pp.288-300.

Sioutas, C. (1999) A Pilot Study to Characterize Fine Particles in the Environment of an Automotive Machining Facility, *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 14, nr 4, pp. 246-254

Suuronen K., Tuomi, T., Alanko, K., Riala, R., Henriks-Eckerman, M.-L., Hautamäki, M., Mäkelä, E., Aalto-Korte, K., Frilander, H., Hannu, t., Jaakkola, M., Luukkonen, R., Piipari, R., Susitaival, P., Tammilehto, L., Viluksela, M. & Jolanki, R. (2005) Metallintyöstäjien työperäiset iho- ja hengitystiesairaudet. Loppuraportti Työsuojelurahastolle, Työterveyslaitos (74 s. + liitteet).

Suuronen, K. (2009) Metalworking fluids – allergens, exposure, and skin and respiratory effects, *People and work, Research reports*, no 85, Finnish Institute of Occupational Health, Tampere, 106 p. + 93 p. app.

Woskie, S.R., Virji, M.A., Hallock, M., Smith, T.J. & Hammond, K. (2003) Summary of the Findings from the Exposure Assessments for Metalworking Fluid Mortality and Morbidity Studies, *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 18 no. 11, pp. 855-864, DOI: 10.1080/10473220390237377

Tutkimuksessa selvitettiin työstökeskuksissa yleisesti käytettävien kohdepoistoilman käsittelymenetelmien toimintaa. Tarkoituksena oli selvittää, miten kohdepoistoilman eri käsittelytavat vaikuttavat työilman laatuun. Tutkittuja käsittelytapoja olivat: 1) kohdepoistoilman kierrättäminen takaisin työtilaan hiukkassuodatuksen jälkeen, 2) kohdepoistoilman johtaminen ulos sekä 3) kohdepoistoilman suodattamisen tehostaminen lisäämällä hiukkassuodatuksen oheen myös kaasujen suodatus. Yleisesti työstökeskuksissa käytettävät HEPA-suodattimet pidättävät hyvin hiukkasmaisia epäpuhtauksia, mutta höyrymuodossa olevia epäpuhtauksia, kuten alkanoliamiineja ja VOC-yhdisteitä hiukkassuodattimet eivät pidätä juuri lainkaan. Suodattimien kautta työtilaan joutuneen epäpuhtauden laimentaminen vaatii suuria ulkoilmavirtoja. Metallintyöstönesteistä syntyvien ilman epäpuhtauksien hallinta on kokonaisuus, johon vaikuttavat myös monet muut tekijät kuin pelkästään kohdepoistoilman käsittelyn tehokkuus. Tämän raportin johtopäätöksissä ehdotetaan kohdepoistoilman käsittelytapoja eri tilanteisiin ja suositellaan myös muita toimenpiteitä, joita tarvitaan kokonaisvaltaiseen altistumisen hallintaan.



Työsuojelurahasto
Arbetskyddsfonden
The Finnish Work Environment Fund



Työterveyslaitos
Arbetshälsainstitutet
Finnish Institute of Occupational Health

PL 40, 00251 Helsinki

www.ttl.fi

ISBN 978-952-261-669-2 (nid.)

ISBN 978-952-261-668-5 (PDF)