



Työterveyslaitos

Tietoa työstä

Mikrobiologisten terveysvaarojen selvitys biohajoavien jätteiden laitosmaisessa käsittelyssä

**Sirpa Laitinen
Merja Kontro
Maija Kirsi
Pirjo Jokela
Kari Reijula**



Työterveyslaitos

Mikrobiologisten terveysvaarojen selvitys biohajoavien jätteiden laitosmaisessa käsittelyssä

LOPPURAPORTTI TSR-HANKE 110359

Sirpa Laitinen, Merja Kontro, Maija Kirsi, Pirjo Jokela ja Kari Reijula

Työterveyslaitos

Helsinki 2013

Työterveyslaitos

Biologiset haitat ja sisäilma -tiimi

Topeliuksenkatu 41 a A

00250 Helsinki

www.ttl.fi

Tietoa työstä -julkaisusarjassa julkaistaan tutkimusraportteja, koosteita ja selvityksiä Työterveyslaitoksen kaikilta tutkimusaloilta.

Toimitus: Sirpa Laitinen, Merja Kontro, Maija Kirsi ja Pirjo Jokela

Kansi: Mainostoimisto Albert Hall Finland Oy Ltd

© 2013 Työterveyslaitos ja kirjoittajat

Julkaisu on toteutettu Työsuojelurahaston, Ekokem Oy Ab:n, Kansainvälisen liikkuvuuden ja yhteistyön keskuksen CIMOn, Biovakka Suomi Oy:n, St1 Biofuels Oy:n, Vapo Oy:n, Kemira Operon Oy:n ja Kujalan Komposti Oy:n tuella.

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

ISBN 978-952-261-347-9 (nid.)

ISBN 978-952-261-348-6 (pdf)

Juvenes Print 2013

ESIPUHE

Jätteenkäsittelyssä ja jätteiden hyödyntämisessä pitää tunnistaa ja huomioida entistä paremmin työterveys- ja ympäristövaarat ennen käytäntöjen vakiintumista ja suurten laitosinvestointien tekoa, jottei uudelleen muotoutuvasta jätehuollosta tule erityistä sairastumisen vaaraa aiheuttava toimiala. Työntekijämäärät ovat alalla kasvamassa varsinkin jätteistä saatavan bioenergian tuotannossa.

Tutkimushankkeessamme selvitettiin mikrobiologisia terveysvaaroja biohajoavien jätteiden laitospöytämaissa käsittelyssä. Tämä hanke antaa vastauksia mm. seuraaviin kysymyksiin: Ovatko nykyiset suojaustoimenpiteet riittävät työntekijöiden työturvallisuudelle bioenergia- ja kompostointilaitoksissa? Millainen on prosessijäännösten hygieeninen laatu?

Näillä tiedoilla on tärkeä merkitys biohajoavien jätteiden ja niistä prosessoitujen lopputuotteiden parissa työskentelevien ihmisten terveydelle. Tutkimushankkeen tuloksista saadaan ohjeistusta jätehuoltoalan yritysten ja työterveyshuoltojen käyttöön altistumisen arviointikeinoista ja työturvallisuusriskin hallintatoimenpiteistä biohajoavan jätteen käsittelyssä.

Tutkimus toteutettiin Helsingin yliopiston ja Työterveyslaitoksen yhteistyönä. Tutkimuksen hallinnointi- ja koordinaatiovastuu oli Työterveyslaitoksella, joka toteutti mittaukset työpaikoilla, altistetietojen keräämisen ja säilyttämisen sekä työympäristöriskien arvioinnin. Helsingin yliopiston vastuulla oli jätteenkäsittelyprosessien lopputuotteiden hygieenisen laadun selvittäminen ja polymeerasiketjureaktioon (PCR) perustuvien mikrobianalyysimenetelmien kehittäminen altistumismittauksiin.

M.Sc Shivaveerakumar S. Gulbargan yliopistosta (Karnataka, Intia) työskenteli hankkeessa seitsemän kuukautta CIMOn stipendiaattina. Hänen työaiheensa oli "Recent trends in actinobacterial diversity of compost and their potential bioactive molecules". Hankkeessa oli mukana kevättalvella 2012 laboranttiopiskelija Anneli Numminen Savon aikuis- ja ammattiopistolta. Hän teki hankkeessa opinnäytetyönsä, jonka aiheena oli "Laboratorioanalyysit biohajoavan jätteen kompostoinnin tutkimisessa". Tutkimuksen tilastolliset analyysit teki Maria Hirvonen Työterveyslaitokselta. Hankkeen ohjausryhmään kuuluivat tutkimusasiamies Ilkka Tahvanainen Työsuojelurahastosta, professori Martin Romantschuk Helsingin yliopistolta ja professori Kari Reijula Työterveyslaitokselta. Kiitämme heitä kaikkia heidän hyvästä työstään hankkeessa.

Tutkimusryhmä kiittää suuresti hankkeen mahdollistaneita rahoittajia, jotka olivat Työsuojelurahasto, Ekokem Oy Ab, Kansainvälisen liikkuvuuden ja yhteistyön keskus (CIMO), Biovakka Suomi Oy, St1 Biofuels Oy, Vapo Oy, Kemira Operon Oy ja Kujalan Komposti Oy. Erityiskiitokset kuuluvat myös hankkeeseen osallistuneille yrityksille ja heidän edustajilleen sekä työntekijöilleen myötämielisestä suhtautumisesta tutkimukseen.

Helsingissä lokakuussa 2013

Tekijät

TIIVISTELMÄ

Biohajoavien jätteiden erilliskeräys ja niiden käsittely kompostointi- ja bioenergialaitoksissa on voimakkaasti lisääntymässä myös Suomessa. EY:n sivutuoteasetus (1069/2009) ja sen toimeenpanoasetus (142/2011) edellyttävät kaupan entisten elintarvikkeidenkin toimittamista jätteiden käsittelylaitoksiin. Kaatopaikoille loppusijoitettavan yhdyskuntajätteen määrää tullaan merkittävästi vähentämään tulevina vuosina. Biohajoavien jätteiden laitosmaisesta käsittelystä saattaa seurata työntekijöille työturvallisuusriskejä, joita haluttiin tässä hankkeessa tutkia.

Tutkimuksessa tehtyjen altistumismittausten päätavoitteena oli löytää työntekijöille mikrobiologisia terveysvaaroja aiheuttavia riskityövaiheita biohajoavien jätteiden käsittelylaitoksista ja selvittää, millä toimenpiteillä terveysriskejä saadaan vähennettyä. Lopputuotteiden hygieenisen laadun tutkimisen päätavoitteena oli selvittää jätteiden käsittelyprosessien kykyä poistaa terveydelle haitallisia mikrobeita erityisesti eläinperäisistä biojätteistä ja lietteistä. Tutkimuksen tavoitteina oli löytää mittausten menetelmiä ja turvallisuusindikaattoreita, joiden avulla voidaan valvoa ihmisten altistumista mikrobeille jätteenkäsittelylaitoksilla ja jätteenkäsittelyn lopputuotteiden käytössä. Tavoitteisiin pyrittiin tutkimalla biohajoavien jätteiden erilaisten käsittelytapojen vaikutusta mikrobien leviämiseen ilmaan ja ympäristöön sekä prosessin lopputuotteiden, kuten lannoitteiden ja multavalmisteiden, mikrobiologiseen laatuun.

Tutkimuskohteina oli seitsemän auma-, tunneli- ja rumpukompostointilaitosta ja kolme jätettä bioenergiaksi hyödyntävää laitosta Etelä- ja Keski-Suomesta. Käsiteltävä biohajoava jätemateriaali oli luokkien 2 ja 3 sivutuotteita; yhdyskuntien ja teollisuuden biojätettä, jätevesilietteitä sekä karjanlantaa. Hankkeen ensimmäisten mittauskäyntien aikana havaittiin, että myös kemialliset altisteet ovat edelleen työturvallisuusriski jätteenkäsittelylaitoksilla. Siksi mittauskäynneille mukaan otettiin kaasumaisten altisteiden seurantalaitteet, vaikka se ei ollutkaan alkuperäisenä tutkimuksen tavoitteena.

Mikrobiologisia ja kemiallisia terveysvaaroja aiheuttavat työvaiheet selvitettiin ilmamittauksilla työntekijöiden hengitysvyöhykkeeltä laitosten sisältä, ulkokentiltä ja työkoneista. Lisäksi selvitettiin normaalisti käytössä olevien suojavälineiden, kuten työkoneiden ilman-suodattimien ja hengityksensuojaimien, riittävyttä työntekijöiden suojaamisen terveysvaaroilta. Pilot-kokeena testattiin reaaliaika- eli qPCR-analytiikkaan yhdistetyn, työntekijöiden nenän limakalvoilta otetun näytteen soveltuvuutta altistumisen arviointiin terveydelle haitallisille mikrobeille. Jättemassassa tapahtuvia mikrobiston muutoksia ja mikrobiologista hygienisoitumista seurattiin ottamalla materiaali- ja nestenäytteitä jätteenkäsittelyprosessin eri vaiheista ja jäännösmassoista eli lopputuotteista.

Kompostointilaitoksilla ilman endotoksiinipitoisuudet vaihtelivat alle määritysrajasta $16\,000\text{ EU/m}^3$:n pitoisuuteen, kun vastaavasti korkein endotoksiinipitoisuus oli 370 EU/m^3 bioenergialaitoksilla. Etenkin kompostointilaitoksilla ilman endotoksiinipitoisuudet olivat moninkertaisia verrattuna sen terveysperusteiseen viitearvoon, joka on 90 EU/m^3 . Meso-fiilisiä aktinobakteereita oli korkeimmillaan $2,5$ miljoonaa cfu/m^3 , termofiilisiä aktinobakteereita $280\,000\text{ cfu/m}^3$ ja termotolerantteja *Aspergillus fumigatus* -homesieniä $570\,000\text{ cfu/m}^3$ kompostointilaitosten ilmassa. Sen sijaan bioenergialaitosten ilmassa esiintyi näitä mikrobeita erittäin vähän eikä taudinaiheuttajabakteereita havaittu työilmasta muualta kuin biojätteiden vastaanottotiloista. Bioenergiaprosessit poistavat tehokkaasti eläinperäisistä jätteistä peräisin olevat taudinaiheuttajabakteerit, mikä vähentää myös työntekijöiden mahdollista altistumista kyseisille bakteereille. Mahdollisimman suljetut prosessit ja osastoinnit vähentävät selvästi mikrobien aiheuttamia työturvallisuusriskejä.

Bioenergialaitoksilla mikrobiologisia altisteita suurempi ja merkittävämpi työturvallisuusriski ovat kaasumaiset kemialliset altisteet. Kohonneita ilmapitoisuuksia ammoniakkia, häkää, hiilidioksidia, rikkidioksidia, rikkivetyä, typpidioksidia ja vetyä havaittiin prosessitiloissa. Kohonneista kaasupitoisuuksista varoittamaan tarvitaan biohajoavien jätteiden käsittelylaitosten työntekijöille kaasunilmaisimet. Kannettava kaasunilmaisimien on aina otettava mukaan poistuttaessa valvomosta prosessitiloihin. Kiinteästi, esimerkiksi hallin seinälle asennettavat kaasunilmaisimet ovat kyseisissä tiloissa tilapäisesti liikkuvia henkilöitä varten, tai jotka eivät ole varautuneet hengityksensuojainten käyttöön.

Kompostointilaitoksilla mikrobiologisten altisteiden leviämistä biomassasta ilmaan on hankala hallita ja estää. Biologisten altisteiden määrät olivat kompostointilaitoksissa niin korkeita, että niille altistumisen vähentämiseen työntekijät tarvitsevat hengityksensuojaimet prosessitiloissa tai ulkona kompostointikentillä työskennellessään. Paras vaihtoehto jätehuoltotöihin on kaasulta ja mikrobeilta suojaava, ABEK-P3-yhdistelmäsuodattimella varustettu puhallinavusteinen hengityksensuojain, jonka suojausluokka on TH3 tai TM3. Alemmat suojausluokat 1 ja 2 ovat riittämättömiä biojätteitä käsittelevien työntekijöiden suojaamiseen. Bioenergialaitoksissa hengityksensuojaimia tarvitaan ainoastaan jätteiden avoimissa vastaanottotiloissa ja prosessilinjojen avaus- ja huoltotilanteissa.

Työkoneissa normaalisti olevat raittiin ilman suodattimet eivät ole riittävät estämään mikrobien, ammoniakkin ja rikkivedyn kulkeutumista ohjaamoihin. Jätteidenkäsittelylaitoksilla käytettävien työkoneiden ohjaamot tulisi varustaa ylipaineistetuilla ilmansuodatusjärjestelmillä, joihin on asennettuna karkean hiukkassuodattimen lisäksi P3/H13-luokan hepasuodatin mikrobien poistoon ja aktiivihiihi-suodatin kemiallisten altisteiden poistoon. Ainoastaan hepasuodatin pystyy estämään myös pienten mikrobiperäisten hiukkasten kul-

keutumisen ohjaamon sisäilmaan. Työkoneissa lisävarusteena saatavana olevat sisäkier-
tosuodattimet vähentävät myös tehokkaasti mikrobipitoisuuksia ohjaamoissa.

Tutkimuksessa kehitettyjä mittausmenetelmiä voidaan hyödyntää työntekijöiden altistu-
misen selvittämiseen mikrobeille myös muilla toimialoilla. Erityisesti pilot-kokeena testattu
qPCR-analyysimenetelmä suo paljon soveltamismahdollisuuksia mikrobien määrittämiseen
sekä työntekijöistä että työympäristöstä. Työntekijöiden nenän limakalvoilta otettu näyte
osoittaa mikrobien todellisen kulkeutuminen työntekijän hengityselimiin ja mahdollisen
terveysriskin. Samanaikaisesti sen avulla pystytään toteamaan työntekijöiden käyttämien
hengityksensuojainten suojaustehokkuudet. Ilmanäytteenottoon yhdistetty qPCR-
mikrobianalytiikka korreloi hyvin perinteisten viljelymenetelmien kanssa. Herkkyydeltään
ja nopeudeltaan se on kuitenkin viljelymenetelmiä parempi ja se tulee helpottamaan mik-
robiologisten terveysvaarojen tunnistamista ja arviointia työpaikoilla.

SISÄLLYS

1	Johdanto	3
2	Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus	6
2.1	Työntekijöiden altistumismittaukset	6
2.2	Biohajoavan jätteen lopputuotteistus.....	6
3	Aineisto ja menetelmät	7
3.1	Tutkimusasetelma.....	7
3.2	Näytteenotto- ja analyysimenetelmät.....	7
3.2.1	Mikrobien keräys ilmasta	7
3.2.2	Kaasujen mittaaminen.....	9
3.2.3	Materiaali- ja nestenäytteet.....	9
3.2.4	PCR-analyysit ja sekvensoinnit	9
3.3	Ihmisnäytteet	10
3.3.1	Näytteenotto	10
3.3.2	Eettiset seikat ja tietosuoja	11
3.4	Viitearvot ja mikrobien terveyshaitat	11
4	Tulokset	13
4.1	Mikrobiologiset altisteet ilmassa.....	13
4.1.1	Endotoksiinit.....	13
4.1.2	Aktinobakteerit ja termotolerantit homesienet.....	13
4.1.3	Bacillukset, kampylobakteerit, salmonellat ja yersiniat	16
4.2	Työntekijöiden henkilökohtainen altistuminen mikrobeille	17
4.3	Lopputuotteen hygieeninen laatu	18
4.4	Kemialliset altisteet ilmassa.....	22
4.4.1	Ammoniakki	22
4.4.2	Hiilen oksidit.....	23
4.4.3	Rikkiyhdisteet.....	24

4.4.4	Typen oksidit.....	25
4.4.5	Muut mitatut kaasut.....	25
5	Tulosten tarkastelu.....	26
5.1	Kompostointilaitokset	26
5.2	Bioenergialaitokset.....	27
5.3	Tapausesimerkki työntekijöiden sairastumisesta.....	29
6	Johtopäätökset	30
7	Suositukseset	32
7.1	Työturvallisuusriskien arviointi.....	32
7.2	Riskien hallinta	33
7.2.1	Altisteiden vähentäminen ilmasta ja leviämisen estäminen	33
7.2.2	Altisteiden seuranta.....	34
7.2.3	Henkilönsuojainten käyttö.....	34
7.2.4	Työntekijöiden terveystarkastukset.....	36
8	Jatkotutkimustarpeet	38
	Lähteet	39
	LIITTEET	44

1 JOHDANTO

Jätteiden käsittelyn ja kierrätyksen yhteyteen on syntymässä täysin uusia aloja, ja toisaalta vanhat jätteenkierrätysmenetelmät kehittyvät ja uudelleenorganisoituvat. Jätteidenkäsittelylaitosten määrä on viime vuosina lisääntynyt ja prosessitekniikka kehittynyt EU-säädösten, kansallisen biojätestrategian ja lannoitevalmistelain myötä (EY/2003/2003 ja 539/2006). Uuden valtakunnallisen jätesuunnitelman tavoitteena on vähentää loppusijoitettavan yhdyskuntajätteen määrää merkittävästi nykyisestä. Kaatopaikkojen tavoitemäärä vuodelle 2016 on vain noin 30–40 kaatopaikkaa. Maataloudessa syntyvä karjanlanta tulee suunnitelman mukaan hyödyntää jatkossa kokonaan. Tavoitteena on, että 10 % lannasta käsiteltäisiin biokaasulaitoksissa. Myös yhdyskuntalietteet tulisi hyödyntää täysin joko maanparannuskäytössä tai energiana. Suunnitelmassa arvioidaan vuoden 2016 yhdyskuntajättemäärän (alle 2,3–2,5 miljoonaa tonnia/v) käsittelyn vaativan kompostointi- ja mädätyskapasiteettia noin 320 000 - 350 000 tonnia (Ympäristöministeriö, 2008).

Suomessa toimii tällä hetkellä noin 20 suurimittakaavaista kompostointilaitosta. Pienempiä aumakompostointilaitoksia oli noin 150 kpl vuonna 2010. Biokaasua tuottavia bioenergalaitoksia oli yhdyskuntien ja teollisuuden jätevedenpuhdistamoilla 17 kpl, maatiloilla 10 kpl ja yhteismädätyslaitoksia 8 kpl vuonna 2011. Bioenergalaitokset ovat nopeasti yleisyydessä, sillä suunnitteilla tai rakenteilla olevia biokaasulaitoksia on 14 kpl maatiloille ja 19 kpl yhteismädätyslaitoksia, jotka käsittelevät biojätteitä lantojen ja puhdistamolietteiden kanssa (Huttunen ja Kuittinen 2012).

Biohajoavien jätteiden käsittelyvaatimuksia tiukentaa eläintautien torjunnan sääntely eli sivutuoteasetus (EY/1069/2009). Se tuli voimaan vuoden 2011 aikana ja se edellyttää luokan 3 aineksen käsittelyä suljetussa prosessissa. Asetus kattaa myös kaupan myynnistä poistetut elintarvikkeet. Pelkästään aumakompostointiin perustuva jätteiden käsittely ei täytä asetuksen vaatimuksia, vaan biomassa tulee varmuuden vuoksi hygienisoida esimerkiksi kuumentamalla. Tämä lisää tarvetta bioenergalaitosten (mm. biokaasu- ja bioetanolilaitosten) rakentamiseksi, jolloin toisaalta myös jätteen sisältämä energia saadaan hyödynnettyä ja sillä korvattua fossiilisten polttoaineiden käyttöä.

Kompostointi- ja bioenergalaitosten rakentaminen tukee kestävästä kehitystä lisäämällä jätteiden hyötykäyttöä ja siten vähentämällä kaatopaikalle loppusijoitettavaa jätemäärää ja säästämällä uusiutuvia luonnonvaroja. Jos vaihtoehtoisesti jätteet poltetaan, niin poltossa hyödynnetään vain jätteiden sisältämä energia, mutta niiden arvokkaat raaka-aineet, kuten ravintoaineet ja hiili, tuhoutuvat. Lisäksi poltossa muodostuva tuhka on ongelmajätettä. Sen sijaan biologisen käsittelyn tuotteet voidaan jalostaa lannoitteeksi ja maanparannusaineksi. Nämä parantavat viljelymaan rakennetta sekä luonnon monimuotoisuutta kierrättämällä ravinteet takaisin luontoon. Lannoitevalmistetta valmistavalla

yrityksellä pitää olla kuitenkin oma valvonta, jossa on tunnistettu mahdolliset riskit ja mietitty niiden ennaltaehkäisy (Maa- ja metsätalousministeriön asetus 14/2011).

Kaikenlaisessa jätteiden käsittelyssä ja laitosten suunnittelussa tulisi huomioida työturvallisuus. Jätteenkäsittelylaitoksissa työskentelee 2-10 työntekijää/laitos. Osa näistä työntekijöistä työskentelee aliurakoitsijoina. Biojätteet ja lietteet sisältävät itsessään runsaasti mikrobeita. Jätteiden kompostoinnissa tarvitaan myös tukiaineita, joilla saadaan jätteen koostumus sellaiseksi, että seoksen kosteus ja ravinnesuhteet ovat kompostoitumiselle sopivat. Tukiaineet helposti homehtuvat jo niiden varastoinnin aikana, varsinkin säilytetäessä niitä ulkona taivasalla. Jätteiden ja tukiaineiden käsittely saattaa lisätä merkittävästi riskiä ilman korkeille mikrobipitoisuuksille. Siten jätteitä käsittelevillä työntekijöillä voi olla kohonnut riski altistua terveydelle haitallisille pölyille ja pölyn sisältämille mikrobeille, joista osa voi olla taudinaiheuttajia eli patogeenisia, allergisoivia tai toksisia. Biologiset haittatekijät voivat aiheuttaa infektioita, hengitysteiden sairauksia, kuten kroonista keuhkoputkentulehdusta, hengitystieallergiaa ja astmaa, ja ruoansulatuselimistön sairauksia. Haastattelu- ja seurantatutkimuksissa jätehuoltoalan työntekijöillä on todettu esiintyvän merkittävästi enemmän työperäisiä oireita ja sairauksia kuin muilla ammattiryhmillä (Lohila et al., 2000; Impiö et al., 2004; Bünger et al. 2007; Albrecht et al. 2008). Jätteiden sisältämät mikrobit voivat levitä myös laitoksen lähialueelle. Lisäksi jätteenkäsittelyn lopputuotteelle ja sen sisältämille mikrobeille altistuvat mm. maanviljelijät, puutarha- ja puistotyöntekijät.

Kompostointilaitoksiin tuotavaa biohajoavaa jätettä on monenlaista. Se muuttuu yhdenmukaiseksi kompostointiprosessin edetessä. Yleisimmin käytetyissä rumpu- ja tunnelikompostoinneissa biohajoava jäte sekoitetaan tukiaineen, esimerkiksi puulastujen tai turpeen kanssa niin, että saadaan sopiva kuiva-aineen määrä ja hiilen suhde tyypeen sekä kompostimassa aerobiseksi. Kompostimassaa myös ilmastetaan rumpu- ja tunnelikompostoinneissa.

Kompostoituminen perustuu kompostoitavan aineksen sisältämiin ja ympäristöstä siihen siirtyneisiin mikrobikantoihin, jotka hajottavat orgaanista ainesta hapellisissa, kosteissa ja riittävän lämpimissä olosuhteissa (Niskala 2010). Kompostin tärkeimpiä hajottajia ovat meso- ja termofiiliset bakteerit, mukaan lukien aktinobakteerit ja sienet. Ensimmäinen vaihe on lämpenemis- eli mesofiilivaihe (lämpötila +15 - +40 °C), jossa mikrobikannat alkavat kasvaa ja hajottaa helposti käytettävissä olevaa hiilipitoista ainesta. Mikrobit synnyttävät lämpöä aerobisen hengityksen ansiosta, jonka vuoksi kompostin lämpötila nousee. Lämpötilan nousun myötä myös mikrobikanta muuttuu. Kuuma- eli termofiilivaiheessa kompostin valtaavat lämpöisissä oloissa (lämpötila yli + 40 °C) viihtyvät termofiiliset aktinobakteerit ja termotolerantit sienet. Lämpötilan ollessa välillä 55 - 60 °C on kompostoituminen nopeaa. Toisaalta yli 60 °C lämpötilat eivät ole haluttavia, koska mikrobisto alkaa kuolla ja kompostoituminen hidastuu, vaikka silloin tuhoutuvat vasta useimmat

haitalliset, patogeeniset mikrobit. Biomassa voidaan myös hygienisoida kuumentamalla ja siten varmistaa patogeenien mikrobin tuhoutuminen massasta. Tätä hyödynnetään varsinakin tunneli- ja rumpukompostointilaitoksilla ennen aumakompostointia, jota käytetään biomassan jälkikypsytykseen.

Kompostin laatua määritellään sen stabiilisuudella ja kypsyydellä. Koska compostointilaitoksilla on erilaisia jätteen syöttö- ja käsittelykäytäntöjä, ja jätteen kemiallinen ja biologinen laatu vaihtelevat huomattavasti kompostoinnin aikana, ei kompostin laadun määrittämiseen ole yleisesti hyväksyttyjä kriteerejä. Rottegradin testillä mitataan hengitysnopeutta (lämmönmuodostus). Kompostin toksisuutta voidaan arvioida kasvien kyvyllä kasvaa kompostoidussa maassa. Lisäksi kompostin kypsyyden määrittämiseen on käytetty mm. hiili-typpeä ja ammonium-nitraattia suhteita sekä ammoniumin määrää.

Koska kompostoinnin aikana tehokkaassa prosessissa haitalliset mikrobit poistuvat prosessin aikana, voisi kompostin hygienisoituminen olla myös sopiva tekijä kompostin kypsyyden määrittämiseksi. Työsuojelurahaston hankkeen nro 107218 mukaan kompostin hygienisoituminen tapahtuu muiden mahdollisten kypsyystekijöiden saavuttamisen aikana. Eri kypsyystekijöiden saavuttaminen kesti 61–578 päivää, ja tänä aikana olivat jo haitalliset mikrobitkin hygienisoituneet.

Aktinobakteerit ovat yksi keskeisiä biomateriaalia hajottavia mikrobiryhmiä kompostissa, mutta niiden esiintymiseen on liitetty terveydellisiä ongelmia. Aktinobakteerien itiöiden on havaittu olevan yksi mahdollinen riskitekijä keuhkosairauksiin maanviljelijöillä ja muilla mikrobeille altistuvilla henkilöillä, sillä aktinobakteeri-itiöiden on todettu indusoivan mm. tulehdusvasteita soluviljelmissä. Työsuojelurahaston hankkeen nro 107218 mukaan tuhkalisyys vähensi streptomykeettien määrää kompostissa yhdellä 10 kertaluokalla. Ilmeisimmin myös aktinobakteerien koostumus muuttuu kompostoinnin aikana, mitä voisi käyttää kompostin laadun ja mikrobiologisen turvallisuuden indikaattorina.

2 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET JA TOTEUTUS

Tutkimuksen päätavoitteena oli löytää mikrobiologisia terveysvaaroja aiheuttavat riskityövaiheet biohajoavien jätteiden käsittelylaitoksista ja selvittää, millä toimenpiteillä terveysriskejä saadaan vähennettyä. Mittauksilla pyrittiin havaitsemaan erityisesti työntekijöiden hengitysteitse tapahtuva altistuminen käsiteltävän materiaalin tai prosessin sisältämille vaaratekijöille ja arvioimaan näistä aiheutuvan terveysriskin todennäköisyyttä.

2.1 Työntekijöiden altistumismittaukset

Altistumismittausten osatavoitteet:

1. Kartoittaa biohajoavien jätteiden erilaisten käsittelytapojen vaikutusta ilman haitallisten mikrobien ja kaasujen pitoisuuksiin huomioiden myös poikkeamatilanteet.
2. Tutkia pilot-kokeena qPCR-analytiikkaan yhdistetyn nenän limakalvonäytteen soveltuvuutta työntekijöiden ilma-altistumisen arviointiin terveydelle haitallisille mikrobeille.
3. Selvittää normaalisti käytössä olevien suojavälineiden riittävyyttä työntekijän suojaamiseen.

2.2 Biohajoavan jätteen lopputuotteistus

Jätteenkäsittelyprosessin lopputuotteen tutkimisen osatavoitteet:

4. Selvittää eläinperäisten jätteiden käsittelyprosessien kykyä poistaa terveydelle haitalliset bakteerit pois lopputuotteesta ja voidaanko kompostin hygieenisyyttä käyttää myös kypsyysindikaattorina.
5. Tutkia, voidaanko aktinobakteerien mikrobisukcession eli mikrobistojen muutoksia käyttää kompostin mikrobiologisen turvallisuuden indikaattorina.

3 AINEISTO JA MENETELMÄT

3.1 Tutkimusasetelma

Tutkimuskohteiksi lupautui auma-, tunneli- ja rumpukompostointilaitoksia yhteensä 7 kpl ja jätteitä bioenergiaksi hyödyntäviä laitoksia 3 kpl. Laitokset sijaitsivat Etelä- ja Keski-Suomessa. Käsiteltävä biohajoava jätemateriaali oli yhdyskuntien ja teollisuuden biojätettä, jätevesilietettä sekä karjanlantaa eli luokkien 2 ja 3 sivutuotteita (Sivutuoteasetus EY/1069/2009). Kompostointilaitoksilla lisättiin tukiaineeksi prosessiin haketta, turvetta, kierätyskompostia tai puutarhajätettä.

Tutkimusaineisto koostui erilaisista työympäristönäytteistä ja ihmisnäytteistä. Alussa karroitettiin tutkimuksen yrityksissä mahdollisesti aikaisemmin tehdyt työhygieeniset mittaukset ja niiden tulokset sekä tutustuttiin laitosten jätteenkäsittelyprosesseihin. Niiden pohjalta laadittiin kullekin yritykselle sopiva näytteenottosuunnitelma, jossa päänäytteenottopaikat olivat yhteneväiset muiden mukana olevien yritysten kanssa.

Työntekijöiden altistumista viruksille tai loisille ei selvitetty tässä tutkimuksessa.

3.2 Näytteenotto- ja analyysimenetelmät

Työympäristön ilmanäytteitä otettiin jätteenkäsittelyprosessin eri vaiheista ja näytteenottoaika säädettiin työvaiheen keston mukaisesti. Ilmanäytteitä kerättiin kiinteistä mittauspaikoista noin 1,5 metrin korkeudelta lattia- tai työskentelytasosta mahdollisimman läheltä prosessia, työntekijöiden hengitysvyöhykkeeltä ja työkoneiden ohjaamoista. Vertailunäytteet kerättiin puhtaaksi ja turvalliseksi oletetuista työympäristöistä, esim. valvomosta tai ulkoilmasta yli 300 metrin etäisyydeltä kompostointialueesta tuulen yläpuolelta.

Materiaalinäytteitä kerättiin komposteista puolen metrin syvyydeltä noin 2 kuukauden välein yhden vuoden ajan. Lisäksi bioenergialaitosten jäännösmassoista otettiin materiaali- ja nestenäytteitä.

Mikrobinäytteenottojen kanssa samanaikaisesti seurattiin jätteenkäsittelylaitosten ilmassa esiintyviä kaasumaisia kemiallisia altisteita sekä ilman kosteutta ja lämpötilaa suoraan osoittavilla mittalaitteilla.

3.2.1 Mikrobien keräys ilmasta

Mikrobit kerättiin ilmasta Button-keräimellä selluloosaesterisuodattimille (MCE, huokoskoko 1,2 µm, Ø 25 mm, SKC) ja Camnea-keräimellä polykarbonaattisuodattimille (PC, huokoskoko 0,4 µm, Ø 37 mm, Whatman). Tehdaspuhtaat suodattimet autoklavoitiin ennen

käyttöä. Keräimet huuhdeltiin 5 % kloriittivesiliuoksella ja 80 % denaturoidulla etanolilla normaalin vesipesun jälkeen. Button-keräimiä käytettäessä suodattimen läpi imettiin ilmaa pumpulla 4 l/min ja Camnea-keräimiä käytettäessä pumpun tilavuusvirta oli 2 l/min. Ilmanäytteiden keräyksessä käytetyt pumput (Gilian ja SKC) kalibroitiin ennen käyttöä DryCal-kalibraattorilla (Bios).

Suodatinnäytteistä määritettiin mesofiiliset ja termofiiliset aktinobakteerit, bakteerien kokonaismäärät sekä termotolerantit sienet viljelymenetelmillä. Bakteerit ja homesienet viljeltiin näytteistä laimennossarjamenetelmällä elatusalustoille, pesäkkeet laskettiin ja mikrobit (aktinobakteerit ja *Aspergillus fumigatus*) tunnistettiin mikroskopoimalla. Viljelyssä käytettävät elatusalustat, laimennokset, kasvatuslämpötilat ja -ajat on kerrottu taulukossa 1. Analyysitulokset ilmoitetaan cfu/m³ (cfu = colony forming unit = pesäkkeen muodostava yksikkö).

Taulukko 1. Mikrobin kasvuolosuhteet viljelymenetelmissä. Maljoille viljeltyt laimennokset vaihtelivat näytekohtaisesti.

Määritettävä mikrobiryhmä ja elatusalusta	Maljoilla viljeltävät laimennokset	Kasvatuslämpötila (°C)	Kasvatusaika (vrk)
Mesofiiliset bakteerit ja aktinobakteerit (THG-agar)	10 ⁻² - 10 ⁻¹⁰	+25 ± 5	7-14
Termotolerantit sienet (Hagem-agar)	10 ⁻² - 10 ⁻⁶	+40 ± 3	5 ± 2
Termofiiliset aktinobakteerit (1/2-vahva Nutrient-agar)	10 ⁻² - 10 ⁻⁸	+55 ± 3	4 ± 1

Näiden näytteiden kanssa samanaikaisesti otetuista rinnakkaissuodattimista määritettiin mikrobit qPCR-analyysillä. Määritettävät bakteeriryhmät olivat *Salmonella* spp., *Yersinia* spp., *Campylobacter* spp., *Bacillus cereus* -ryhmä ja *Streptomyces* spp. sekä homesienistä *A. fumigatus*.

Ilmassa esiintyvistä mikrobeista määritettiin gram-negatiiviset bakteerit endotoksiinimittauksella, joka kuvastaa hyvin bakteerien määrää ja biologista aktiivisuutta. Endotoksiinien ilmanäytteet otettiin IOM-keräimissä oleville lasikuitusuodattimille (Ø 25 mm, SKC) tilavuusvirralla 2 l/min. Näytteenottosuodattimet siirrettiin mittauspäivänä pyrogeenivaapaaseen veteen ja säilytettiin viileässä seuraavaan päivään, jolloin näytteet pakastettiin.

Näytteiden endotoksiinipitoisuudet määritettiin LAL (*Limulus* amebosyite lysate) -entsyymiin perustuvalla, kineettisesti mittaavalla kromogeenisellä menetelmällä (Työterveyslaitoksen akkreditoitu työohje AR1205-TY-070). Analyysitulokset ilmoitetaan EU/m³ (EU = endotoxin unit = endotoksiiniyksikkö).

3.2.2 Kaasujen mittaaminen

Kemiallisten altisteiden ilmapitoisuudet mitattiin seuraavilla sähkökemiallisilla kennoilla ja infrapuna-analysointilaitteilla: Dräger Pac III, Dräger X-am 5000, Dräger X-am 5600, Dräger X-am 7000 ja Graywolf TG-501. Mitattavia kaasuja olivat ammoniakki, happi, hiilidioksidi, hiilimonoksidi, rikkidioksidi, rikkivety, typpidioksidi, typpioksidi ja vety. Kaasumittaukset tehtiin tallentamalla jatkuvatoimisesti 10 sekunnin mittausväleillä. Niistä saatavat tulokset käsiteltiin mm. 15 minuutin keskiarvopitoisuuksina, mediaaneina ja huippupitoisuuksina.

3.2.3 Materiaali- ja nestenäytteet

Materiaali- ja nestenäytteistä analysoitiin viljelymenetelmällä Euroopan yhteisön sivutuoteasetuksessa mainitut bakteerit *Escherichia coli*, *Enterococcus* spp. ja *Salmonella* spp. sekä niiden lisäksi *B. cereus* ja *Clostridium perfringens*. Nämä bakteerianalyysit tehtiin alihankintana Savo-Karjalan Ympäristötutkimus Oy:llä. Mesofiiliset ja termofiiliset aktinobakteerit, bakteerien kokonaismäärät sekä termotolerantit sienet analysoitiin samalla tavoin viljelymenetelmillä kuin ilmanäytteetkin Työterveyslaitoksella (taulukko 1). Lisäksi materiaali- ja nestenäytteistä määritettiin *A. fumigatus*, *B. cereus* ja *Streptomyces* spp. qPCR-analyysillä.

Viljelytulokset ilmoitetaan joko cfu/g tai ml (g = näytteen märkäpaino). Materiaalinäytteille tehtiin myös kuivapainomääritykset ja qPCR-analyysien tulokset ilmoitetaan kopiota/g kuiva-ainetta. Nestenäytteiden tulos on kopiota/ml.

3.2.4 PCR-analyysit ja sekvensoinnit

Reaaliaika-PCR:lla tehtävät analyysimenetelmät olivat osittain valmiina Helsingin yliopiston ympäristöekologian osastolla mikrobiryhmille *Salmonella* spp., *Streptomyces* spp., *Campylobacter* spp., *B. cereus* -ryhmä, ja *Yersinia* spp., Menetelmiin on tehty sisäinen amplifikaatiokontrolle, jonka tulee amplifioitua negatiivisissa reaktioissa (Hoorfar et al., 2004; Jensen et al., 2004). PCR-analyysimenetelmä *A. fumigatus* otettiin käyttöön tässä tutkimuksessa. Nämä menetelmät sovellettiin materiaalinäytteiden lisäksi ilma- ja ihmisnäytteiden analysointiin.

Salmonella spp. -kantojen detektointiin käytettiin Rahn et al (1992) alukkeita (5'-GTG AAA TTA TCG CCA CG-3' ja 5'-TCA TCG CAC CGT CAA AGG AAC C-3'), jotka detektoivat *InvA* geeniä, jota tarvitaan eukariotisoluihin infektoitaessa. Monistustuotteen koko on 285

bp. Alukkeita on käytetty mm. julkaisuissa Carli et al (2001), Chen et al. (1997), and Malorny et al. (2003). *Yersinia* spp. -kantojen detektointiin käytettiin Trebesius et al. (1998) alukkeita (5'-GCG GCA GCG GGA AGT AGT TTA-3' ja 5'-TAC AGC GTG GAC TAC CAG GGT-3'), jotka detektoivat 16S rRNA geeniiä. Alukkeet tunnistavat *Yersinia* -suvun lukuunottamatta kantoja *Y. frederiksenii*, *Y. mollaretii*, ja muutamia *Y. kristensenii* -kantoja. Monistustuotteen koko on 749 bp. Alukkeita on käytetty mm. julkaisuissa Lu et al. (2003) ja McGarvey et al. (2004). *Streptomyces* spp. -kantojen detektointiin käytettiin Rintala et al. (2001) alukkeita, jotka detektoivat 16S RNA:n geeniiä (5'-ACA AGC CCT GGA AAC GGG GT-3' ja 5'-CAC CAG GAAT TCC GAT CT-3'). Monistustuotteen koko on 519 bp. Alukkeita on käytetty ainakin julkaisussa Rintala et al. 2002 ja alukkeet on suunniteltu Työsuojelurahaston hankkeisiin 96028 ja 98103 liittyen. *Campylobacter* spp. -kantojen detektointiin käytettiin Linton et al. (1996) alukkeita 5'-GGA TGA CAC TTT TCG GAG C-3' ja 5'-CAT TGT AGC ACG TGT GTC-3', jotka detektoivat 16S rRNA geeniiä. Monistustuotteen koko on 816 bp. Alukkeita on käytetty mm. julkaisuissa Inglis and Kalischuk (2003), Logan et al. (2001), Keramas et al. (2004) ja Maher et al. (2003). *Bacillus* spp.-kantojen detektointiin käytettiin Schraft ja Griffiths (1995) alukkeita 5'-GAG TTA GAG AAC GGT ATT TAT GCT GC-3' ja 5'-CTA CTG CCG CTC CAT GAA TCC-3', jotka detektoivat cereolysin AB geeniiä. Alukkeet tunnistavat *Bacillus cereus* ryhmän mikrobit *B. cereus*, *Bacillus mycoides* ja *Bacillus thuringiensis*. Monistustuotteen koko on 409 bp. Alukkeita on käytetty mm. julkaisuissa Radhika et al. (2002) ja Zanardini et al. (1997). *Aspergillus fumigatus* detektoitiin 18S rRNA geenin alueelta käyttämällä alukkeita ja probia (5'-GCC CGC CGT TTC GAC-3', 5'-CCG TTG TTG AAA GTT TTA ACT GAT TAC ja 5'-CCC GCC GAA GAC CCC AAC ATG), jotka tunnistavat *A. fumigatus* lisäksi *Neosartorya fischeri* (Haugland et al., 2002).

Tarvittavat sekvensoinnit tehtiin Helsingin yliopiston sekvensointilaboratoriossa laboratorion laatu järjestelmän käytäntöjen mukaan.

3.3 Ihmisnäytteet

3.3.1 Näytteenotto

Työntekijän henkilökohtaisen hengitysaltistumisen arvioimiseksi otettiin näytteitä työntekijän nenästä. Nämä näytteet otettiin työpäivän loppuun. Joissakin tapauksissa nenänäytteet otettiin myös ennen työpäivän aloittamista. Näin tehtiin varsinkin mittauksia tehneille henkilöille heidän vieraillessaan ensimmäistä kertaa tutkittavana olleen yrityksen prosessitiloissa.

Näytteenotto tapahtui työntekijää satuttamatta pyyhkäisemällä näyte hänen nenänsä limakalvoilta, molemmista sieraimista steriilillä nailonnukkapaikolla. Puikot katkaistiin

steriileihin kuljetusputkiin ja ne kuljetettiin laboratorioon analysoitavaksi. Nenänäytteet säilytettiin näytteenoton jälkeen viileässä ja laboratoriossa ne pakastettiin noin -80 °C:een. Nenänäytteistä määritettiin bakteerit *Salmonella* spp., *Yersinia* spp., *Campylobacter* spp., *B. cereus* -ryhmä ja *Streptomyces* spp. sekä homesieni *A. fumigatus* qPCR-analyysimenetelmiä käyttäen.

3.3.2 Eettiset seikat ja tietosuoja

Työntekijöiltä pyydettiin kirjallinen suostumus vapaaehtoisesta osallistumisestaan tutkimukseen. Tiedote työntekijöille ja suostumuslomake ovat nähtävillä liitteessä 1. Työntekijöiden henkilötietoja käsiteltiin tutkimuksessa tunnistuskoodilla, jonka takana ovat suojattuina henkilö- ja työpaikkatiedot. Tutkimukseen mukaan lähteneet työntekijät saavat henkilökohtaisen palautteen heitä koskevista altistumistuloksistaan ja he voivat kysyä tulostensa merkityksestä tutkimuksen lääketieteelliseltä vastuuhenkilöltä tai muilta hankkeessa mukana olleilta tutkijoilta. Ihmistutkimuksiin pyydettiin lupa HUS:n koordinoivalta eettiseltä toimikunnalta ennen tutkimuksen aloittamista ja tutkimuksesta laadittiin henkilötietolain mukainen rekisteriseloste.

3.4 Viitearvot ja mikrobien terveyshaitat

Kemiallisten altisteiden mittaustuloksia voidaan verrata sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa 1213/2011 annettuihin haitallisiksi tunnettuihin pitoisuuksiin (HTP-arvot, STM:n julkaisu 2015:5). Altistumista verrataan kahdeksan tunnin raja-arvoon (HTP_{8h}), kun altistuminen kestää koko työvuoron ajan. Mikäli altistuminen on lyhytaikaista, verrataan mittaustuloksia viidentoista minuutin raja-arvoon (HTP_{15min}). HTP-arvot ovat pienimpiä ilman epäpuhtauspitoisuuksia, jotka ministeriön arvion mukaan voivat aiheuttaa haittaa tai vaaraa työntekijöiden turvallisuudelle, terveydelle tai lisääntymisterveydelle. Tässä tutkimuksessa mitattujen, kaasumaisena esiintyneiden kemiallisten altisteiden HTP-arvot on esitetty taulukossa 5.

Suomessa ei ole toistaiseksi HTP-arvoa ilman endotoksiini- ja mikrobipitoisuuksille. Terveysperusteiseksi, ilman endotoksiinipitoisuuden kahdeksan tunnin viitearvoksi on ehdotettu 90 EU/m³ (EU = endotoxin unit eli endotoksiiniyksikkö) hollantilaisen ja pohjoismaisen asiantuntijaryhmän toimesta.

Endotoksiinit ovat gram-negatiivisten bakteerien soluseinämän osasia, joita esiintyy kaikkialla siellä missä bakteereitakin. Endotoksiinit irtoavat ympäristöön bakteerisolun tuhoutuessa ja bakteerien lisääntymisen aikana. Endotoksiinien on todettu aiheuttavan tai olevan osatekijänä aiheuttamassa mm. astmaa, kroonista bronkiittia ja orgaanisen pölyn aiheuttamaa kuumeoireilua (ODTS).

Muille ilman mikrobipitoisuuksille ei ole olemassa terveysperusteisia viitearvoja, joten mikrobituloksia on tulkittava työpaikkakohtaisesti. Mikrobin aiheuttamat terveyshaitat ovat yksilöllisiä ja niihin vaikuttavat mm. henkilön yksilölliset ominaisuudet ja mikrobilaji. *A. fumigatus* -suvun homesieni luokitellaan sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen 921/2010 mukaan biologisten tekijöiden ryhmään 2, jolla voi olla allergisia vaikutuksia ja joka voi aiheuttaa ihmiselle sairauden. Lisäksi aktinobakteerien tiedetään olevan osatekijänä aiheuttamassa keuhkosairauksia niille altistuville työntekijöille.

Taudinaiheuttajabakteerit kuten kampylobakteerit, salmonellat ja yersiniat voivat infektoida ihmisen hyvin pienilläkin bakteeripitoisuuksilla. Lisäksi useat mikrobiryhmät kuten aktinobakteerit, bacillukset ja sienet voivat tuottaa mikrobimyrkkyjä eli toksineja, jotka ovat haitallisia ihmisille.

Lyhytaikaisessa mikrobialtistuksessa hetkellisiä terveyshaittoja voivat olla hengitysteiden ärsytysoireet eli yskä, limannousu, nuha ja hengenahdistus, silmien ärsytysoireet sekä vatsaoireet. Yleisoireina voi esiintyä vilunväreitä, kuumetta, väsymystä, päänsärkyä sekä lihas- ja nivelkipuja. Lyhytaikaiseen altistukseen liittyviä sairauksia ovat äkillinen kurkunpäättulehdus ja orgaanisten pölyjen aiheuttama toksinen oireyhtymä (ODTS). Pitkäaikaiseen mikrobialtistukseen liittyviä sairauksia ovat astma, allerginen alveoliitti (esim. homepölykeuhko), allerginen nuha, krooninen bronkiitti (pitkäaikainen keuhkoputkitulehdus).

Terveydelle haitalliset mikrobit voivat kulkeutua ihmiseen myös ruuansulatuskanavan kautta. Lannoitekäyttöön tarkoitetuille valmisteille on laadittu Euroopan yhteisössä sivutuoteasetus terveydellisten riskien välttämiseksi (EY/1069/2009). Maa- ja metsätalousministeriön tarkentaman asetuksen (MMM 14/2011) mukaan eläinperäisistä jätteistä tehdyissä lannoitevalmisteissa ei saa esiintyä salmonellabakteereja 25 g:ssa näytettä. *Escherichia coli* tai *Enterococcaceae* -bakteerien määrä saa olla enintään 1000 pmy/g tai alle 100 pmy/g ammattimaiseen kasvihuoneviljelyyn tarkoitetuissa kasvualustoissa, joissa syötävät kasvinosat ovat suoraan kosketuksissa kasvualustaan. (pmy = pesäkkeen muodostava yksikkö).

Maa- ja metsätalousministeriön ja Kasvintuotannon tarkastuskeskuksen vuonna 2004 laatima suositus on, että sulfiitteja pelkistävien *Clostridium* -bakteerien kokonaismäärä lannassa tai lantavalmisteissa tulee vähentyä 1/1000 osaan prosessin aikana.

4 TULOKSET

4.1 Mikrobiologiset altisteet ilmassa

4.1.1 Endotoksiinit

Kompostointilaitoksissa ilman endotoksiinipitoisuudet olivat erittäin korkeita ja ylittivät terveysperusteisen viitearvon (90 EU/m^3) pahimmillaan moninkertaisesti (taulukko 2). Bioenergialaitoksilla ilman endotoksiinipitoisuuden mediaaniarvo oli 3 EU/m^3 ja keskiarvo 39 EU/m^3 ($n=17$). Bioenergialaitoksilla viitearvon ylitystä tapahtui jätteiden vastaanotto- ja esikäsittelytilassa, jossa endotoksiinipitoisuus oli korkeimmillaan 370 EU/m^3 sekä prosessijäännöksen linkoustilassa (maksimiarvo 160 EU/m^3).

Taulukko 2. Endotoksiinipitoisuudet (EU/m^3) ilmassa kompostointilaitoksilla.

Työvaihe	Kompostointilaitos			
	Mittausten lukumäärä	Keskiarvo	Mediaani	Vaihteluväli
Jätteiden vastaanotto ja esikäsittely	7	1 300	1 100	670 – 2 900
Prosessijäännöksen loppukäsittely	7	2 700	390	62 – 16 000
Työkoneen ohjaamo	20	510	8	< 3 – 8 400
Valvomo / tausta ulkona	3			< 3 – 4

Ilman kokonaisbakteeripitoisuudet myötäilivät endotoksiinipitoisuuksia ja vaihtelivat samalla tavoin työvaiheiden mukaisesti. Kokonaisbakteerien maksimipitoisuudet olivat $26 \text{ miljoonaa cfu/m}^3$ kompostointilaitoksilla ja $60 000 \text{ cfu/m}^3$ bioenergialaitoksilla.

4.1.2 Aktinobakteerit ja termotolerantit homesienet

Bioenergialaitoksilla esiintyi ilmassa mesofiilisiä aktinobakteereita $150\text{--}300 \text{ cfu/m}^3$ ainoastaan jätteiden vastaanotossa ja esikäsittelyssä. Termofiilisiä aktinobakteereita ei havaittu lainkaan bioenergialaitoksien ilmasta eikä myöskään termotoleranttia *A. fumigatus* -homesientä.

Sen sijaan kompostointilaitoksilla levisi käsiteltävästä jätemassasta ilmaan erittäin runsaasti mesofiilisiä ja termofiilisiä aktinobakteereita sekä *A. fumigatus* -homesieniä (taulukot 3 ja 4). Nämä mikrobit pääsivät kulkeutumaan myös työkoneiden ohjaamoihin.

Taulukko 3. Aktinobakteeripitoisuudet (cfu/m³) ilmassa kompostointilaitoksilla. (Mittausten lukumäärät (N) eri työvaiheissa ovat samoja kuin taulukossa 4.)

Työvaihe	Mesofiiliset aktinobakteerit			Termofiiliset aktinobakteerit		
	Ka	Md	Vaihteluväli	Ka	Md	Vaihteluväli
Jätteiden vastaanotto ja esikäsittelyprosessi	370000	170000	41000–2,5×10 ⁶	64000	31000	6800– 280000
Prosessijäännöksen loppukäsittely	6700	1600	<mr–23000	12000	1800	<mr–120000
Työkoneen ohjaamo	1800	1500	<mr–59000	800	260	<mr–3400
Valvomo / tausta ulkona	360	200	<mr–1000	1100	330	<mr–3800

Ka = keskiarvo, Md = mediaani, <mr = alle määrittäysrajan

Taulukko 4. Aspergillus fumigatus –homesienipitoisuudet (cfu/m³) ilmassa kompostointilaitoksilla.

Työvaihe	Aspergillus fumigatus			
	N	Keskiarvo	Mediaani	Vaihteluväli
Jätteiden vastaanotto ja esikäsittelyprosessi	10	13 000	10 000	3 500 – 31 000
Prosessijäännöksen loppukäsittely	15	45 000	2 800	<mr – 570 000
Työkoneen ohjaamo	25	1 600	170	<mr – 8 800
Valvomo / tausta ulkona	4	780	650	<mr – 1 800

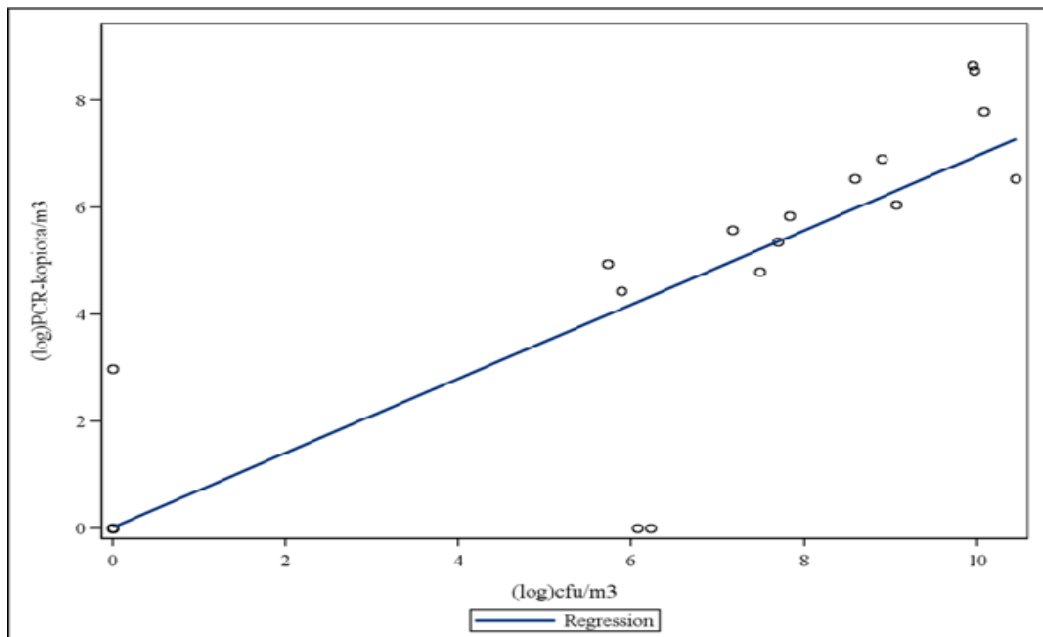
N = mittauksen lukumäärä, <mr = alle määrittäysrajan

A. fumigatus käytettiin indikaattorina homesienten määrän arvioinnissa, koska sen on todettu olevan terveydelle haitallinen ja se on yleinen ilmaa kontaminoiva homesieni jätehuoltotoissa. Todellisuudessa homesienten kokonaismäärät ilmassa olivat vielä moninkertaisesti suurempia kuin sieltä tunnistetun *A. fumigatus* määrää.

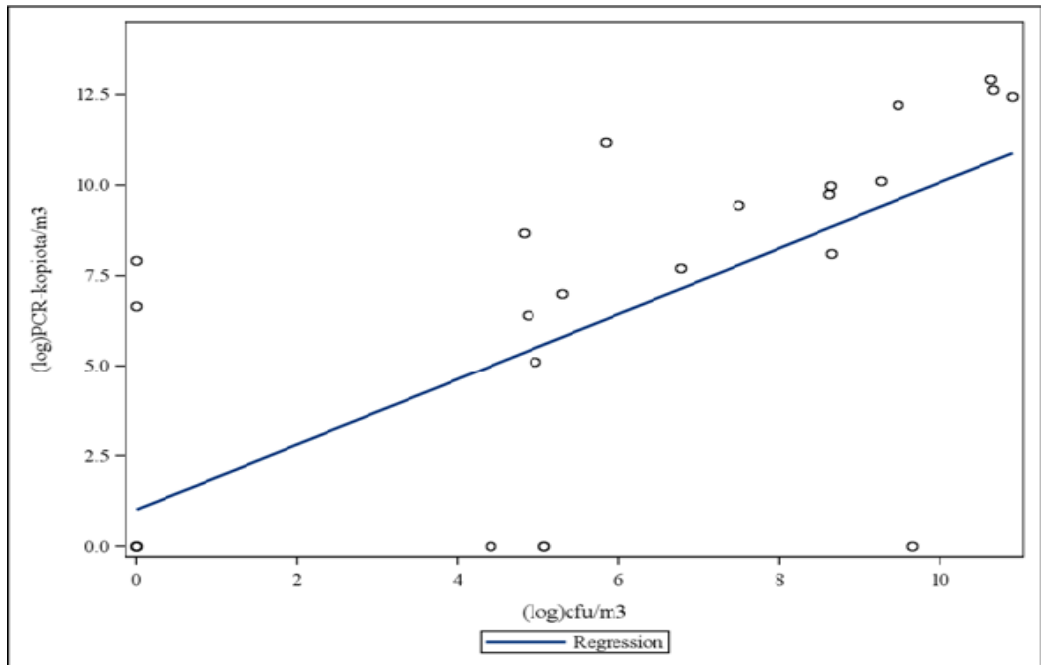
A. fumigatus -homesienien ja *Streptomyces* -aktinobakteerien ilmapitoisuudet määritettiin myös qPCR-analyysillä ja ne tulokset vastasivat hyvin viljelytuloksia (kuvat 1 ja 2). Jos joissain tapauksissa *A. fumigatus*-homesieniä tai *Streptomyces*-aktinobakteereita tavattiin vain viljelemällä, tyypillinen syy tulokseen on liian alhainen DNA:n määrä qPCR-detektioon. Paksut itiöiden seinät ovat voineet jäädä hajoamatta eikä DNA ole vapautunut määrittystä varten. Kun mikrobiryhmät havaitaan vain qPCR-määrittämismenetelmällä, näytteessä ei yleensä ole elinkelpoisia soluja tai itiöitä, vaikka DNA:ta on riittävästi määrittämiseen. Näin tapahtui tutkittaessa esim. kalkkistabiloitua biomassaa, josta korkea pH tappoi elinkykyiset mikrobit.

Camnea-keräimellä otetuilla ilmanäytteillä qPCR- ja viljelymenetelmien vastaavuus oli sama ($R = 0.91$) *A. fumigatus* -homesienipitoisuuksissa ja parempi ($R = 0.88$) *Streptomyces*-aktinobakteeripitoisuuksissa kuin Buttonin keräimellä.

Kuva 1. *Aspergillus fumigatus* -homesienipitoisuuden vastaavuus Buttonin keräimellä otetuissa ilmanäytteissä qPCR- ja viljelyanalyysimenetelmillä. ($R = 0.91$, Spearman correlation coefficient)



Kuva 2. *Streptomyces* -aktinobakteeripitoisuuden vastaavuus Buttonin keräimellä otetuissa ilmanäytteissä qPCR- ja viljelyanalyysimenetelmillä. ($R = 0.76$, Spearman correlation coefficient)



4.1.3 Bacillukset, kampylobakteerit, salmonellat ja yersiniat

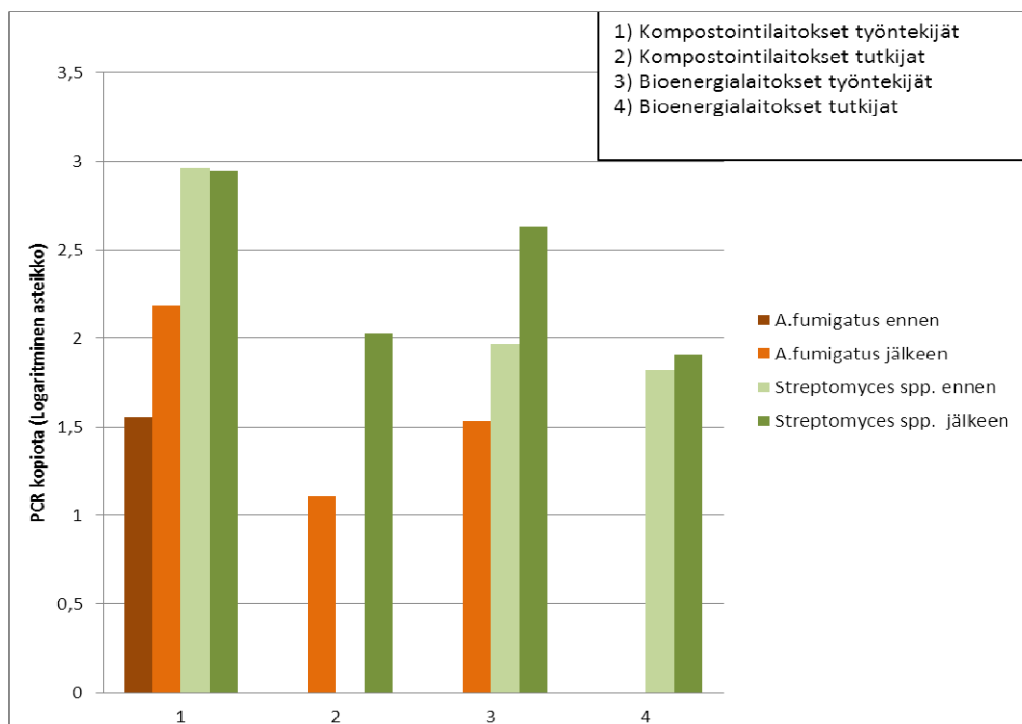
B. cereus -ryhmän bakteereita esiintyi ilmassa kahdella kompostointilaitoksella seitsemästä Buttonin keräimellä. Toinen näistä bakteerilöydöksistä havaittiin pyöräkuormaajan ohjaamosta aumakompostoidun jätevesilietteen käsittelyn aikana ja toinen toiselta kompostointilaitokselta, jossa sekoitettiin biojätteitä, kierrätyskompostia ja seosainetta keskenään pyöräkuormaajalla sisähallissa. Jälkimmäisessä työvaiheessa havaittiin myös *Salmonella* -suvun bakteereita ilmassa Buttonin keräimellä, muttei Camnea-keräimellä, jolla ei havaittu myöskään *B. cereus* -ryhmän bakteereita.

Yersinia -suvun bakteereita esiintyi ilmassa kolmella kompostointilaitoksella. Näistä kaksi kompostointilaitosta oli samoja paikkoja, missä esiintyi *Bacillus* -bakteereita. *Yersinia* ei ilmeisesti täysin tuhoutunut biomassan hygienisointikäsittelyissä kompostointilaitoksilla, koska sitä esiintyi ilmassa myös sen jälkeisissä työvaiheissa. *Campylobacter* -suvun bakteereita ei todettu ilmasta kompostointilaitoksilta. Bioenergiailaitoksien ilmassa havaittiin esiintyvän *Campylobacter* ja *Yersinia* -sukujen bakteereita ainoastaan biohajoavien jätteen vastaanottotilassa.

4.2 Työntekijöiden henkilökohtainen altistuminen mikrobeille

Työntekijöiden nenän limakalvoilta otetuista näytteistä löydettiin qPCR-menetelmällä mikrobeita. Kompostointilaitoksilla tutkittiin 20 henkilöä, joista 11 henkilöltä havaittiin *A. fumigatus* töiden jälkeen. Bioenergiailaitoksilta tutkittiin 10 henkilöä, joista 1 henkilöllä oli positiivinen *A. fumigatus* löydös. *A. fumigatus* määrä työntekijöiden nenän limakalvoilla oli suurempi niissä työpaikoissa ja työvaiheissa, joissa sitä esiintyi runsaasti myös ilmassa. *A. fumigatus* esiintyminen liittyi selkeästi jätteenkäsittelylaitoksilla tapahtuvaan työhön (kuva 3).

Kuva 3. *Aspergillus fumigatus* ja *Streptomyces* -mikrobien keskiarvopitoisuudet työntekijöiden nenän limakalvoilta otetuissa näytteissä.



Streptomyces -aktinobakteereita löytyi töiden jälkeen nenän limakalvoilta kolmelta bioenergiailaitoksella (n=3/10) ja lähes kaikilta kompostointilaitoksella (n=19/20) työskennelleiltä työntekijöiltä. Niiden esiintyminen ja määrät työntekijöillä seurasivat samalla tavoin ilman aktinobakteeripitoisuuksia kuin *A. fumigatus* -homesienen kohdalla. Ilma-altistuksen lisääntyessä kasvoi myös mikrobipitoisuus nenän limakalvoilla.

Mikrobeita, erityisesti *Streptomyces* -aktinobakteereita, löytyi työntekijöiden nenän limakalvoilta jo ennen varsinaisen työvuoron aloittamista. Tämä johtui osittain siitä, että näytteet otettiin työpaikoilla eikä muualla kuten esimerkiksi työterveyshuolloissa. Jätteenkäsittelylaitoksilla on ilmassa mikrobeita joka paikassa ja siksi on mahdollista altistua niille jo ennen varsinaisen työn aloittamista. Toisaalta myös edeltävinä päivinä tapahtuneista altistumista jääneitä mikrobeita saattoi olla nenän limakalvoilla.

Valitettavasti ahkera hengityksensuojaimien käyttökään ei aina pystynyt täysin estämään mikrobien kulkeutumista nenän limakalvoille. Mahdolliset reunavuodot saattoivat heikentää kertakäyttöisen FFP3-suojaimen ja puhallinavusteisen, pelkällä kasvovisiirillä varustetun TH2P3-suojaimen suojaustehokkuuksia. Jos P3-hiukkasuodattimet olivat olleet jo aikaisemmin työntekijän käytössä, niin myös se saattoi edesauttaa suojaustehokkuuden vähenemistä ja mikrobeille altistumista.

A.fumigatus -homesientä ja *Streptomyces* -aktinobakteereita löytyi myös työkoneiden kuljettajien nenän limakalvoilta. Ainoastaan työkoneen erilliseen ilmansuodatusjärjestelmään asennettu P3/H13-suodatinelementti (hepasuodatin) yhdessä P1/F5-suodattimen kanssa pystyi estämään työntekijän altistumisen *A. fumigatukselle* koneen ohjaamossa.

Muiden tutkittujen mikrobien osalta havaittiin vain yksi selkeä positiivinen *Yersinia* -bakteerilöydös työntekijältä, jonka ilmassa oli muutoinkin runsaasti *Yersinia* -bakteereita. *B. cereus* ja *Salmonella* -bakteereita ei löytynyt keneltäkään nenän limakalvoilta. Sen sijaan *Campylobacter* -suvun bakteereita havaittiin 22 tutkitulta henkilöltä 8 henkilön jäädessä negatiiviseksi qPCR-määrittelyissä. Sekvensointianalyysillä varmistettiin positiiviset näytteet kampylobakteereiksi. Syitä niiden esiintyvyyteen näin yleisesti työntekijöiden nenän limakalvoilla ja kampylobakteerien merkitystä työntekijöiden terveyteen tulisi selvittää tulevaisuudessa.

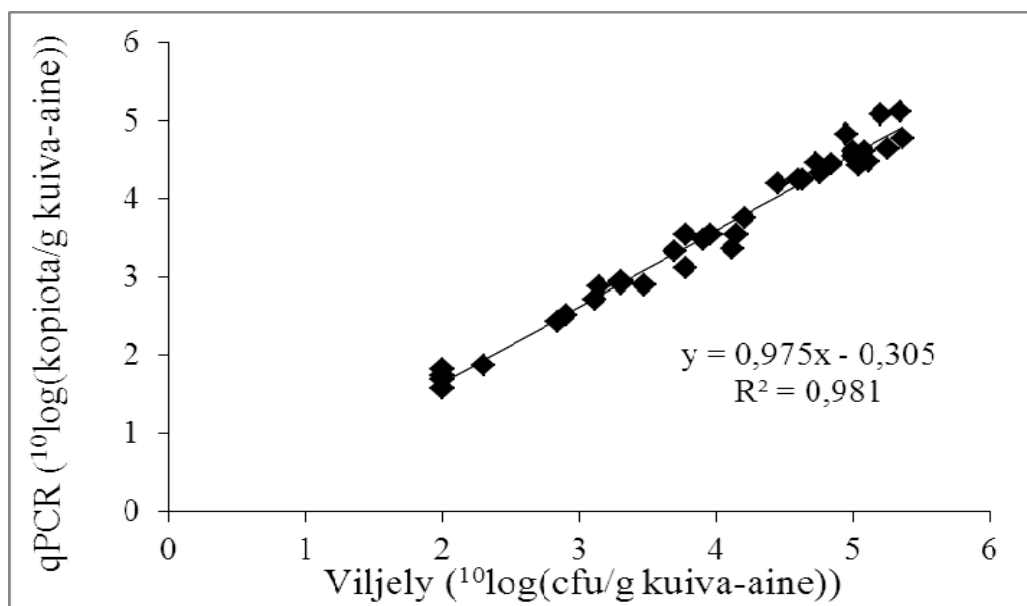
4.3 Lopputuotteen hygieeninen laatu

Mesofiilisiä ja termofiilisiä aktinobakteereita oli kaikissa määritetyissä kompostinäytteissä. Mesofiilisten aktinobakteereiden määrät vaihtelivat 2-16 kk vanhoissa kompostiaumoissa paljon välillä $0,025\text{--}232 \times 10^6$ cfu/g kuivaa kompostia siten, että yli 9 kk vanhoissa komposteissa määrä oli stabiiloitunut $\leq 3,5 \times 10^6$ cfu/g. Termofiilisten aktinobakteerien määrä oli 2-16 kk vanhoissa komposteissa $0,0042\text{--}967 \times 10^5$ cfu/g kompostia, ja yli 9 kk vanhoissa komposteissa määrä oli $\leq 2,7 \times 10^7$ cfu/g. Yhdellä kompostointilaitoksella nämä viljelytulokset kuitenkin ylittyivät yli 9 kk vanhoissa komposteissa. Streptomykeettien määrä komposteissa vaihteli qPCR:n mukaan välillä $0,64\text{--}216 \times 10^6$ kopiota/g kompostia, mikä on samaa suuruusluokkaa kuin mesofiilisten aktinobakteerien määrä. Yli 9 kk vanhoissa komposteissa streptomykeettien määrä oli $\leq 41,7 \times 10^6$ kopiota/g kuivaa kompostia. Ak-

tinobakteerien korkeimmat määrät ja suurin vaihtelu komposteissa mitattiin 2-9 kk vanhoista komposteista, jonka jälkeen määrät stabiloituivat kompostoinnin toimiessa hyvin.

B. cereus ryhmän bakteereita löytyi viljelemällä lähes kaikista 4-16 kk vanhoista aumoista. Niiden määrät vaihtelivat välillä $<100-1,28 \times 10^5$ cfu/g kompostia. Positiivisten määrittysten keskiarvo oli $2,58 \pm 3,33 \times 10^4$ cfu/g. Reaaliaika-PCR:llä *B. cereus* -ryhmän bakteereita havaittiin 5-16 kk vanhoissa komposteissa harvemmin kuin viljelemällä, mikä voi johtua siitä, että bakteerit olivat tässä vaiheessa usein itiömuodossa. Itiöt lähtevät kasvamaan kasvatuksessa, mutta niiden paksuja soluseiniä ei ole saatu rikkoutumaan DNA:n eristyksessä. Reaaliaika-PCR:llä määritettynä *B. cereus* -ryhmän bakteereita oli positiivisissa näytteissä keskimäärin $3,51 \pm 2,49 \times 10^4$ kopiota/g kompostia, eli tulos on hyvin samansuuruinen viljelytuloksen kanssa. *B. cereus* ryhmän bakteerien viljely- ja qPCR-tuloksilla kompostista oli korkea vastaavuus (kuva 4). *B. cereus* -ryhmän bakteerien määrä ei vähentynyt 4-16 kk kompostoinnin aikana.

Kuva 4. *Bacillus cereus* -ryhmän bakteerien pitoisuuden vastaavuus kompostinäytteissä viljelemällä ja qPCR:llä ($R=0,991$, Pearson correlation coefficient).



A. fumigatus löytyi myös viljelemällä kaikista tutkituista 2-16 kk vanhoista kompostiaumoista. Sienen määrät vaihtelivat välillä $53 - 1,04 \times 10^5$ cfu/g kompostia, ja keskiarvo oli $7,51 \times 10^3$ cfu/g. Reaaliaika-PCR:llä *A. fumigatus* -homesieniä havaittiin 2-16 kk vanhoista komposteista 71 % näytteistä, mikä myös voi johtua korkeasta *A. fumigatus* -sienien itiöiden määrästä. Ne voidaan viljellä, mutta eivät rikkoutu DNA:n eristyksessä. PCR:n mukaan positiivisissa kompostinäytteissä oli keskimäärin $9,96 \times 10^4$ kopiota/g kompostia.

Viljelemällä *A. fumigatus* -sienen pitoisuudessa ei havaittu selvää laskua, mutta qPCR:llä kuudessa aumassa yhdeksästä negatiiviset tulokset saatiin kompostin vanhetessa. Tämä voi indikoida kasvavien sienien vähenemistä samalla kun home säilyy kompostissa itäen.

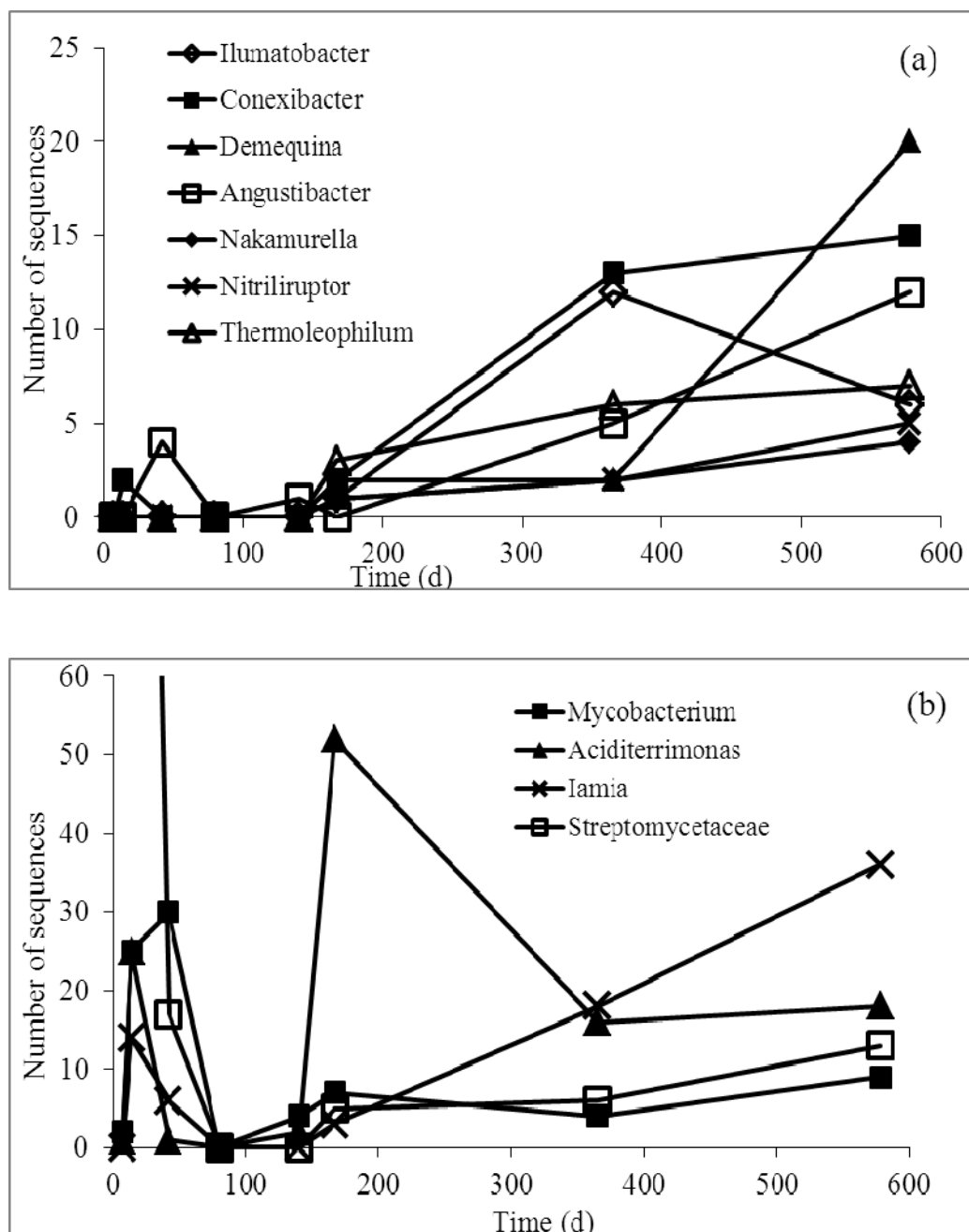
E. colia pystyttiin viljelemään vain pieniä määriä 28 %:sta 2-16 kk vanhoista komposti-näytteistä. Sen pitoisuus vaihteli välillä <10 – 363 cfu/g kuivaa kompostia. Lisäksi yhdestä 2 kk vanhasta näytteestä määritettiin $2,21 \times 10^4$ cfu/g, sekä yhdestä 6 kk ikäisestä näytteestä 1714 cfu/g. Vain yhdestä ≥ 9 kk vanhasta näytteestä mitattiin *E. colia* 9 cfu/g ja samassa näytteessä olivat myös aktinobakteerien pitoisuudet kohonneet. *Enterococcus* spp. esiintyi puolessa 2-16 kk vanhoista komposteista. Niiden määrät vaihtelivat välillä 36 – $5,74 \times 10^4$ cfu/g kompostia. Vain yhdestä yli 6 kk vanhasta kompostista mitattiin 5429 cfu/g kompostia (10 kk).

*C. perfringens*ä pystyttiin havaitsemaan viljelyllä kuudesta kompostiaumasta kymmenes-tä tutkitusta ja määrät olivat alhaisia, 24–345 cfu/g. Poikkeuksellisesti yhdessä aumassa oli *C. perfringens*ä korkeammat määrät, vaihteluväli oli 120–41519 cfu/g kompostia ja keskiarvo $2,01 \times 10^4$ cfu/g kompostia. Tällä laitoksella kompostointiin jätevesipuhdistamon lietettä, minkä on aikaisemminkin huomattu olevan riski *C. perfringens*in esiintymiselle. Mitatut *C. perfringens*in pitoisuudet eivät laskeneet kompostin vanhetessa, sillä kolmessa aumassa positiiviset tulokset saatiin vasta 10–12 kk vanhoista aumoista.

Hankkeen aikana otettiin kolmesta bioenergiailaitoksesta materiaalinäytteitä. Niissä oli *A. fumigatus* (0–100 cfu/g märkää näytettä, mp; 0 – $9,91 \times 10^3$ kopiota/g), mesofiilisten aktinobakteerien (0 – $9,09 \times 10^4$ cfu/g mp), termofiilisten aktinobakteerien (0 – $4,05 \times 10^5$ cfu/g mp) ja streptomykeettien ($0,84$ – $20,5 \times 10^5$ kopiota/g) määrä alhaisempi kuin 6-16 kk vanhoissa komposteissa. Muista itiöivistä *B. cereus*in määrä vaihteli välillä <100 – $1,3 \times 10^4$ cfu/g ja *C. perfringens*ä tavattiin kahdesta näytteestä ($0,14$ – 10×10^4 cfu/g). *Salmonella* ei tavattu, *E. colia* (< 10 –50 cfu/g) ja *Enterococcus* spp. (yksi näyte 1400 cfu/g, muut <100) havaittiin pieniä määriä.

Hankkeessa karakterisoitiin kompostinäytteiden aktinobakteereita aina 578 päivän ikään saakka pyrosekvensoinnilla. Tavoitteena oli löytää mikrobisukuja, jotka indikoivat mikrobiologisesti turvallista kompostia. Kun komposti oli 167 päivää vanha, kompostinäytteissä kasvoivat mikrobisukujen *Ilumatobacter*, *Conexibacter*, *Demequina*, *Angustibacter*, *Nakamurella*, *Nitriliruptor* ja *Thermoleophilum* bakteerimäärät (kuva 5a). Lisäksi sukujen *Mycobacterium*, *Aciditerrimonas* ja *Lamia*, sekä *Streptomycetaceae* bakteerimäärät vähenivät kompostoinnin alusta lähtien alhaisiksi 80–140 päivän kuluessa, jonka jälkeen pitoisuudet taas kasvoivat (kuva 5b). Näitä mikrobisukuja voisi olla mahdollista käyttää indikoimaan hygieenisesti melko turvallista kompostia, joskin näytteissä esiintyi satunnaisesti haitallisia mikrobeja vielä näidenkin sukujen aikana.

Kuva 5. Pyrosekvensoinnissa noin puolen vuoden kompostoinnin jälkeen kohonneet sekvenssit mikrobisuvuista ja *Streptomycetaceae*.



4.4 Kemialliset altisteet ilmassa

Kompostointi- ja bioenergiailaitoksilta mitattujen kaasumaisten kemiallisten altisteiden maksimipitoisuuksien vertailu on esitetty taulukossa 5. Kaasupitoisuuksia mitattiin 10 sekunnin välein ja niiden pitoisuudet vaihtelivat suuresti eri prosesseissa. Tulokset ovat suuntaa-antavia, koska ne on mitattu suoraanosoittavilla analysaattoreilla.

Taulukko 5. Kemiallisten altisteiden maksimipitoisuudet (ppm) ilmassa sisätiloissa.

Kaasu	Kompostointilaitos	Bioenergiailaitos	HTP_{8h}	HTP_{15min}
Ammoniakki	43	5	20	50
Hiilidioksidi	3 700	9 700	5 000	-
Hiilimonoksidi	8	Koholla, mutta ei tarkkaa arvoa*	30	75
Rikkidioksidi	6	0,8	1	4
Rikkivety	3	65	5	10
Typpidioksidi	2	Koholla, mutta ei tarkkaa arvoa*	3	6
Typpioksidi	4	6	25	-

* Mittauslaitteista ja -olosuhteista johtuvia häiriöitä

- = HTP-arvoa ei ole määritetty

4.4.1 Ammoniakki

Ammoniakki saattaa aiheuttaa merkittävän riskin biohajoavia jätteitä sisätiloissa käsitteleville työntekijöille kompostointilaitoksilla. Yhdessä kompostointilaitoksen hallissa ammoniakin osalta ylittyi toistuvasti sen HTP_{8h} -arvopitoisuus (20 ppm) ja ammoniakin huippupitoisuus, 43 ppm, saavutti lähes HTP_{15 min} -arvon (50 ppm). Ammoniakki kulkeutui kompostointihallista pyöräkuormaajien ohjaamoihin ja muihin sisätiloihin, joissa työskennellään ilman hengityksensuojaimia. Pyöräkuormaajissa olevat aktiivihiilisuodattimet vähensivät ammoniakkipitoisuutta, mutta kokonaan ne eivät pystyneet estämään ammoniakin kulkeutumista ohjaamoihin. Pyöräkuormaajissa pitoisuudet olivat keskimäärin 10 % ammoniakin HTP_{8h} -arvosta. Kompostointihallissa töitä tehneellä kenttämiehellä ammoniakkipitoisuus oli hetimitään 40 % sen HTP_{15min} -arvosta ja keskimäärin 20 % HTP_{8h} -arvosta.

Ammoniakin ilmapitoisuudet olivat koholla myös bioenergiailaitosten prosessitiloissa. Ammoniakin pitoisuus oli enimmäkseen jätteiden esikäsittelytilassa, josta se herkästi levisi

ilmaa kevyempänä aineena muihinkin tiloihin. Bioenergialaitoksilla ammoniakkipitoisuudet olivat kuitenkin altistumisen ja terveysriskien kannalta vähäisiä verrattuna sen HTP-arvoihin. Bioenergialaitoksen työtiloista mitattu ammoniakin maksimipitoisuus (5 ppm) oli 25 % sen pitkäaikaisesta HTP_{8h} -arvosta ja 10 % sen lyhytaikaisesta $HTP_{15 min}$ -arvosta.

Ammoniakkikaasu on väritön, voimakkaan pistävän hajuinen ja tuntuu polttavan makuisena. Sen hajukynnys vaihtelee 5–50 ppm eikä haju ei ole hyvä varoitusmerkki ammoniakista. Hengitysteiden ärsytys on suoraan verrannollinen ammoniakkipitoisuuteen ilmassa. Ärsytys- ja haittavaikutukset alkavat 20–25 ppm:n lyhytaikaisessa pitoisuudessa. Toistuvassa ammoniakkihöyrylle altistumisessa työntekijälle voi kehittyä sopeutumista ärsytysvaikutuksille muutamien viikkojen kuluessa. Näin jatkuva altistuminen jopa 70 ppm:n pitoisuudelle ei aina aiheuta selviä oireita. Päivittäinen yli 100 ppm:n ilmapitoisuus aiheuttaa silmän sarveiskalvon ärsytystä ja kyynelvuotoa.

4.4.2 Hiilen oksidit

Häkä- ja hiilidioksidipitoisuudet olivat kohtalaisia kompostointilaitoksien sisätiloissa (max 27 % HTP_{8h} -arvosta), mutta jonkin verran korkeampia anaerobisia prosesseja hyödyntävissä bioenergialaitoksessa. Ilman häkäpitoisuuksia lisäsivät työkonoiden käyttö ja rekka-autojen käynnissä pito sisätiloissa. Hiilidioksidi on peräisin jätteenkäsittelyprosesseista.

Biokaasulaitoksissa häkämittauksia häiritsi ilmaan prosessista karkaamaan päässyt vety, jonka vuoksi tarkkoja arvoja ei saatu mitattua suoraanosoittavilla analysaattoreilla. Mittalaittevalmistajan mukaan häkäanturi reagoi vedyn kanssa kaasunilmaisimessa. Esimerkiksi biojätteiden tyhjennykset säiliöautoista avonaiseen vastaanottoaltaaseen aiheuttivat moninkertaisesti HTP_{15min} -arvon ylittävät häkäpitoisuuden ilmaan; 15 minuutin keskiarvopitoisuus 220–480 ppm ja maksimipitoisuus 870 ppm. Samanaikaisesti ilmassa oli vetyä; enimmillään 33 %LEL (%LEL = Lower Explosive Limit = prosenttipitoisuus alemmasta räjähdysrajasta).

Hajuton ja väritön häkä eli hiilimonoksidi aiheuttaa hapen puutteen. Herkimmin hapen puutteesta kärsiviä kudoksia ovat aivot ja sydän. Aivojen palautumaton vaurioituminen on mahdollinen, kun myrkytys on vakava, mutta ei kuolettava. Lieviä muutoksia sydämen ja hermoston toiminnassa voi ilmetä jo 50 ppm:n häkäpitoisuudessa. Häkäpitoisuus 200 ppm aiheuttaa noin tunnin altistuksen jälkeen voimakasta päänsärkyä ja 500 ppm:n pitoisuus noin 20 minuutin kuluttua. Pitoisuus 1 000 - 10 000 ppm aiheuttaa päänsärkyä, huimausta, hengästyneisyyttä ja pahoinvointia noin 10 minuutin jälkeen ja kuoleman, jos altistuminen jatkuu 10–45 minuuttia pitoisuudesta riippuen. Voimakas altistuminen hiilimonoksidille raskauden aikana voi aiheuttaa sikiövaurioita tai sikiön kuoleman. Hiilimonoksidi voi aiheuttaa myös pitkäaikaisia tai pysyviä keskushermoston oireita tai vammoja äkillisen myrkytyksen jälkitilana.

4.4.3 Rikkiyhdisteet

Rikkivedyn $\text{HTP}_{15\text{min}}$ -arvo ylittyi biojätekuormien tyhjennyksien aikana ja $\text{HTP}_{8\text{h}}$ -arvo ylittyi rejektin haihturihallissa yhdellä bioenergialaitoksella. Ilman rikkivetypitoisuudet olivat selvästi kohonneita, enimmillään 30 % sen $\text{HTP}_{15\text{min}}$ -arvosta myös prosessijäännöksen linkotilassa. Kompostointilaitoksissa rikkivedyn osalta HTP -arvot eivät ylittyneet, mutta sen pitoisuudet olivat selvästi koholla kompostointihalleissa: keskiarvo 1,5-2 ppm ja huippuarvot 30 % rikkivedyn $\text{HTP}_{15\text{min}}$ -arvosta. Samoin kuin ammoniakkin kanssa, pyöräkuormaajien aktiivihiihluodatusyksiköt eivät pystyneet estämään rikkivedyn kulkeutumista ohjaamoihin.

Rikkivety on väritön kaasu, jolla on voimakas mädäntyneen kananmunan haju. Sen hajukynnys on erittäin alhainen 0,008 ppm ja haju varoittaa hyvin terveysvaarasta, mutta hajuaisti turtuu altistumisen jatkuessa ja lamaantuu yli 100 ppm:n pitoisuuksissa. Rikkivety ärsyttää jo pienissä pitoisuuksissa limakalvoja ja hengitysteitä. Ärsytys kohdistuu etenkin silmiin aiheuttaen side- ja sarveiskalvon punoitusta ja tulehdusta. Silmän ärsytysoireet ilmenevät rikkivedyn 10–20 ppm:n pitoisuuksissa ja polttavaa kipua, kyynelvuotoa sekä näön sumenemista ilmenee, kun pitoisuus ylittää 50–100 ppm. Samalla esiintyy nenän ja kurkun kuivumista ja ärsytystä sekä altistumisen jatkuessa ilmenee vetistä vuotoa nenästä, yskää, käheyttä ja hengenahdistuksen tunnetta.

Rikkidioksidin ilmapitoisuudet saattavat olla hetkellisesti korkeita ja sen HTP -arvot ylittyä kompostointilaitoksissa. Yhdestä kompostointihallista mitattiin erittäin korkeita ilman rikkidioksidipitoisuuksia (> 100 ppm). Näissä pitoisuuksissa saattoi olla mukana mittausvirhe, joka ilmeisesti johtui kosteuden kondensoitumisesta anturin pinnalle, kun mittari tuotiin pakkasesta lämpimään sisätilaan. Kompostointihallissa normaali ilman rikkidioksidin keskiarvopitoisuus oli 0,5-0,6 ppm eli 50–60 % sen $\text{HTP}_{8\text{h}}$ -arvosta.

Bioenergialaitoksissakin ilman rikkidioksidipitoisuudet kohosivat joissakin prosessitiloissa, mutta HTP -arvot eivät ylittyneet. Yhden bioenergialaitoksen prosessitilassa rikkidioksidin ilmapitoisuus pysyi pitkäaikaisesti 50 %:n tuntumassa verrattuna sen $\text{HTP}_{8\text{h}}$ -arvoon.

Rikkidioksidia ei havaittu työkoneiden ohjaamoissa eikä myöskään valvomoissa tai sosiaalitiloissa. Rikkidioksidikaasu on ilmaa raskaampaa eikä se siten helposti kulkeudu ylöspäin kuten työkoneiden ohjaamoihin.

Rikkidioksidi on väritön, pistävänhajuinen, ärsyttävä ja syövyttävä kaasu. Se ärsyttää silmiä, kosteita ihoalueita ja hengitysteitä aiheuttaen kirvelyä silmissä, kyynelvuotoa, yskää ja suurissa pitoisuuksissa hengitysvaikeuksia. Sen aiheuttama hapan maku suussa on havaittavissa 0,4-1 ppm:n pitoisuudessa. Pitoisuudessa 3 ppm rikkidioksidin haju tuntuu selvästi. Pitoisuus 5-11 ppm aiheuttaa nenän ja nielun välitöntä ärsytystä. Pitkäaikainen altistuminen rikkidioksidille voi altistaa hengitystiesairauksille, aiheuttaa kroonista keuhkoputkentulehdusta ja hammaskiilteen vaurioitumista.

4.4.4 Typen oksidit

Typpidioksidia esiintyi merkittäviä määriä, keskimäärin 43 % sen HTP_{8h} -arvosta, sisätiloissa olevissa kompostointihalleissa. Typpidioksidin pitoisuus kohosi hetkittäin vielä korkeammalle, maksimissaan 28 prosenttiin sen $HTP_{15 min}$ -arvosta. Sen keskiarvopitoisuus pysyi kohonneena erityisesti tiloissa, jossa pyöräkuormaaja työskenteli vauhdikkaasti koko mittausjakson ajan. Pyöräkuormaajien ohjaamoissa typpidioksidia ei esiintynyt.

Bioenergialaitoksillakin havaittiin ilmeisesti virheellisesti korkeita typpidioksidipitoisuuksia ilmassa. Näistä pitoisuuksista ei saatu tarkkoja arvoja suoraanosoittavilla analysaattoreilla. Eräällä bioenergialaitoksella varmistettiin ilman typpidioksidipitoisuudet keräävällä adsorbentti- ja ionikromatografiamenetelmällä, jolla havaittiin selvästi alhaisempia pitoisuuksia kuin sähkökemiallisella analysaattorilla. Typpidioksidin varmistusanalyysien pitoisuudet esimerkiksi sianlantakuormien tyhjennyksen aikana olivat pieniä, alle 10 % HTP_{15min} -arvosta.

Myös typpioksidia havaittiin sekä kompostointi- että bioenergialaitosten ilmasta, mutta sen pitoisuudet olivat selvästi pienempiä kuin typpidioksidilla.

Typpidioksidi on ruskehtava, pistävän hajuinen kaasu. Se on ihmisille haitallinen, koska se tunkeutuu syvälle hengityselimiin, supistaa keuhkoputkia ja lisää hengitysteiden herkkyyttä muille ärsykeille.

4.4.5 Muut mitatut kaasut

Ilman happipitoisuus pysyi hyvänä jätteenkäsittelylaitoksilla, vaikka hiilidioksidipitoisuus hetkittäin kohosi sisähalleissa. Pienimmillään ilman happipitoisuus aleni 19,4 %:iin. Hapen normaali pitoisuus ilmassa on noin 21 %. Hapen puutteen oireita alkaa ilmetä, kun happipitoisuus laskee alle 18 %:n.

Eräällä anaerobista prosessia eli mädätystä hyödyntävällä bioenergialaitoksella havaittiin myös vetyä ilmassa. Enimmillään ilman vetypitoisuus kohosi 33 prosenttiin sen alimmasta räjähdysrajasta. Mitatuista vetypitoisuuksista ei aiheudu suoranaista terveyshaittaa työntekijöille ja se häviää ilmaa kevyempänä aineena nopeasti ylöspäin ja ulkoilmaan. Vedyn esiintymiseen ilmassa saattaa kuitenkin liittyä onnettomuusvaara varsinkin silloin, jos läsnä on muita räjähdysvaarallisia kaasuja kuten häkää, metaania tai rikkivetyä.

5 TULOSTEN TARKASTELU

5.1 Kompostointilaitokset

Mikrobiologisten altisteiden osalta bakteerien ja niiden sisältämien endotoksiinien sekä homesienten aiheuttama työturvallisuusriski on merkittävä kompostointilaitoksissa työskenteleville. Jätteiden käsittelyssä kompostoimalla sekä sisähalleissa että ulkona kentällä aumojen käsittelyn yhteydessä esiintyi erittäin korkeita endotoksiini- ja mikrobipitoisuuksia.

Erittäin korkeita ja mahdollisesti terveydelle haitallisia endotoksiinipitoisuuksia mitattiin ulkona käännettävän tai kuorma-autoihin lastattavan kompostiauman vierestä. Ilman endotoksiinipitoisuuksien viitearvo, 90 EU/m³, ylittyi reilusti vielä noin puoli vuotta vanhan kompostiauman kääntötehtävissä. Kompostointikentän laidallakin ilman endotoksiinipitoisuus ylitti terveysperusteisen viitearvon moninkertaisesti samoin kuin kentällä työskennelleen pyöräkuormaajan ohjaamossa, johon ei ollut asennettuna erillistä ilmansuodatusjärjestelmää.

Kompostimateriaalin laatu 6-16 kk vanhoissa komposteissa vastasi multaa monien mitattujen mikrobien määriä tarkasteltaessa. Streptomykeettien määrä maassa on ollut noin 10⁶ cfu/g (Conn and Leci, 1998) ja *A. fumigatus* 0-0,7 x 10⁶ cfu/g (Perrot ja Armstrong, 2011). *B. cereus* -selle on määritetty, että >10⁴ solua tai itiötä voi aiheuttaa vaaran, ja epidemian aiheuttaa >10⁵ määrät (Carlin et al., 2010). Myös sivutuoteasetuksessa mainitut määrät *E. coli*lle ja *Enterococcus* spp. ja *C. perfringens*ille saavutettiin usein. Kuitenkin yhdessä näytteessä mitattiin *Enterococcus* spp. yli 5000 cfu/g ja *C. perfringens*iä tavattiin peräti kolmasosasta näytteistä siten, että määrät olivat alle 345 cfu/g ja osa aumojen näytteistä oli negatiivisia, lukuun ottamatta yhtä aumaa. Myös lietelaitoksilta mitatuista kuudesta näytteestä kahdessa esiintyi *C. perfringens*iä. Koska haitallisia mikroorganismeja havaittiin melko yleisesti silloin tällöin näytteistä, on tärkeää suojata työntekijät koko mullantuotannon prosessin ajan. Koska alhaisia määriä haitallisia mikrobeja mitattiin melko satunnaisesti, voi niiden täydellinen poistaminen kompostista olla erittäin vaikeaa. Kompostissa, niin kuin mullassakin, on luonnostaan melko paljon aktinobakteereita, mutta niiden määrät ovat selvästi vähäisempiä bioenergiailaitosten prosesseissa.

Pyöräkuormaajien ohjaamoihin asennetut erilliset ilmansuodatusjärjestelmät toimivat hyvin mikrobien suodatuksen suhteen. Ilmansuodatusjärjestelmällä varustetuissa pyöräkuormaajissa esiintyi merkittävästi vähemmän endotoksiineja ja mikrobeja ohjaamoiden sisäilmassa kuin työkoneissa, joissa ei ollut erillistä ilmansuodatusjärjestelmää. Suodatinelementin laadulla oli kuitenkin vaikutusta ilmansuodatustehokkuuteen. Ohjaamoiden ilmansuodatusyksiköihin asennetut P1/F5-luokan ilmansuodattimet pystyivät poistamaan

ohjaamoihin sisään tulevasta ilmasta vain osan homesienistä, bakteereista ja niiden sisältämästä endotoksiinista. Varsinkin pieni-itiölliset aktinobakteerit pääsivät ohjaamoihin ilmansuodattuksesta huolimatta, vaikka hiukkassuodatin oli äskettäin vaihdettu. Sen sijaan P1/F5-luokan suodattimen lisäksi asennettu P3/H13-luokan hepasuodatin pystyi estämään myös pieni-itiöllisten mikrobien kulkeutumisen ohjaamoihin.

Kaasumaisista kemiallisista altisteista, ammoniakkin, rikkidioksidin, rikkivedyn ja typpidioksidin aiheuttama työturvallisuusriski osoittautui mittaustulosten perusteella merkittäväksi kompostointilaitoksen sisähalleissa työskenteleville työntekijöille. Myöskään työkonoiden aktiivihiihtosuodatusjärjestelmät eivät täysin pystyneet estämään ammoniakkin ja rikkivedyn kulkeutumista ohjaamoihin, mutta selvästi vähensivät niiden ilmapitoisuuksia siellä kuljetajien hengitysvyöhykkeellä. Ammoniakki, rikkivety ja rikkidioksidi ovat peräisin mikrobien toiminnasta niiden hajottaessa jätemassan orgaanista ainesta. Typpidioksidi on työkonoiden pakokaasupäästöjä.

5.2 Bioenergiailaitokset

Bioenergiailaitosten etu kompostointilaitoksiin verrattuna on se, että niissä jätteiden käsittely tapahtuu pääasiassa suljetuissa prosesseissa, mikä vähentää työntekijöiden altistumista mikrobeille ja kaasuille. Varsinkin nestemäiset jätteet voidaan syöttää bioenergiailaitosten prosessiin sellaisenaan suljettuja kanavia pitkin, mikä vähentää altistumisen riskiä. Kiinteässä muodossa oleville jätteille pitää tehdä bioenergiailaitoksissakin esikäsittelyt, vaikka biohajoavat jätteet voidaan prosessoida siellä ilman mikrobialtistumista mahdollisesti lisääviä tukiaineita.

Jätteiden vastaanotto ja prosessijäännöksen linkous olivat altistavimmat työvaiheet bioenergiailaitoksissa. Korkeimmat bakteeri- ja homesienipitoisuudet mitattiin biojätteiden vastaanottotilasta. Muissa tiloissa ilman mikrobipitoisuudet olivat alhaisia. Pieni-itiöllisiä aktinobakteereita, jotka pääsevät kulkeutumaan keuhkoihin saakka hengitysilman mukana, esiintyi hyvin pieniä määriä näiden laitoksen ilmassa. Mesofiilisten aktinobakteerien osuus kokonaisbakteeripitoisuudesta oli enintään 10 %. Termofiilisiä eli lämpöhakuisia aktinobakteereita ei esiintynyt lainkaan ilmassa. Tämä on erittäin hyvä asia, ettei aktinobakteereita sen enempää esiintynyt, vaikka prosessien lämpötilat ovat otolliset niiden lisääntymiselle.

Bioenergiailaitosten prosessin lopputuotoksessa oli niukasti termotolerantteja homesieniä ja kohtalaisesti bakteereita. Niiden joukossa oli myös vähän terveydelle haitallisia bakteereita. Määdätykseen perustuvien biokaasulaitosten kiinteässä prosessijäännöksessä esiintyi kuitenkin runsaasti *Clostridium perfringens* -bakteeria, mutta vastaavassa nestemäisessä jäännöksessä kyseisen bakteerin määrät olivat selvästi pienempiä. Muutoin bioenergiailai-

toksen prosessit poistivat paremmin ja selvästi nopeammin haitalliset mikrobit pois jätemassasta kuin kompostointikäsittelyt.

Clostridium perfringensin runsas esiintyminen prosessijäännöksessä voi viitata siihen, että siellä saattaa olla muitakin terveydelle haitallisia *Clostridium* -suvun bakteereita kuten *C. botulinum* ja *C. tetani*. Siksi klostridien määrä olisi saatava vähenemään mädätyksen jälkeen ennen prosessijäännöksen levittämistä pelloille tai muille viljelmille. Klostridit ovat anaerobeja bakteereja eli ne elävät ainoastaan hapettomissa olosuhteissa. Siten niiden määrän voi saada vähenemään ilmastoimalla (kompostoimalla) prosessijäännöstä mädätyksen jälkeen. Keski-Euroopassa on kuitenkin havaittu, että kuivatun mädätteen polttaminen on taloudellisempi ratkaisu kuin sen hygieenisen laadun parantaminen kompostoimalla.

Bioenergiailaitoksilla mikrobiologisia altisteita suurempi ja merkittävämpi työturvallisuusriski ovat kaasumaiset kemialliset altisteet. Kohonneita ilmapitoisuuksia ammoniakkia, häkää, hiilidioksidia, rikkidioksidia, rikkivetyä, typpidioksidia ja vetyä havaittiin prosessitiloissa. Suurin osa näistä kaasuista on peräisin prosessien mikrobitoiminnoista. Anaerobisissa olosuhteissa mikrobien hajottaessa orgaanista ainesta vapautuu pääasiassa metaania ja hiilidioksidia, mutta pieniä määriä myös ammoniakkia, häkää, rikkivetyä ja vetyä (Lehtomäki ym. 2007). Aerobisissa olosuhteissa rikkivety hapettuu rikkidioksidiksi.

Korkeimmat kaasupitoisuudet olivat biojätteiden vastaanottotilojen sisähalleissa. Erityisesti rikkivetypitoisuudet ylittivät siellä HTP_{15min} -arvon. Vastaanottotilan ovet suljettiin ajoneuvojen ajettua sisään ympäristönsuojelusyistä. Autot olivat käynnissä koko ajan ollessaan vastaanottotilassa, mikä lisäsi häkä- ja typpidioksidipitoisuuksia ilmaan. Muut kaasut kohosivat suuriin pitoisuuksiin vain hetkellisesti.

Vastaanottotilan lisäksi ilman kaasupitoisuudet olivat kohonneita prosessijäännöksen linkosalissa ja prosessisäiliöiden alapuolisissa tiloissa. Siellä pitoisuudet olivat kuitenkin selvästi pienempiä kuin vastaanottotilassa ja ilmanvaihtoa lisäämällä helposti hoidettavissa pois ilmasta.

Vastaanottotilassa esiintyvien kaasumaisten altisteiden määrän arviointiin tulee kiinnittää erityistä huomiota ja tehdä toimenpiteitä niiden leviämisen estämiseksi ilmaan työntekijöiden hengitysvyöhykkeelle. Etenkin hiilimonoksidin kanssa pitää olla varovainen, sillä se saattaa jäädä pitkäksi aikaa leijaillemaan hengitysvyöhykkeelle eikä sitä pystytä poistamaan ilmasta aktiivihillisuodattimilla. Rikkivedyn esiintyminen ilmassa viittaa siihen, että siellä on mahdollisesti läsnä muitakin pelkistyneitä rikkiyhdisteitä kuten esimerkiksi metyyliimerkaptaania, mutta niitä ei mitattu tässä tutkimuksessa.

5.3 Tapausesimerkki työntekijöiden sairastumisesta

Hankkeen mittausten aikana kaksi työntekijää sairastui työskennellessään noin 10 tunnin ajan eräässä tutkimuskohteessa. Ennen kyseistä työvuoroa täysin terve työntekijä sai äkillisen kurkunpää tulehduksen ja ODTS-tyyppisen oireilun. Hänen äänensä alkoi käheytyä 4-5 tunnin kuluttua altistuksen alkamisesta. Voimakas väsymys, nivel- ja lihaskivut sekä vilunväreet alkoivat noin 10 tunnin kuluttua illalla. Yöllä nousi selvä kuume. Seuraavana aamuna kuumetta oli enää hieman yli +37 °C ja muut oireet olivat poissa, paitsi äänen menetys kesti noin viikon verran ja kuiva yskä kesti noin 3 viikkoa. Samassa tutkimuskohteessa työskennelleelle toiselle työntekijälle nousi myös kuume mittausten jälkeisenä yönä ja kuume poistui aamuun mennessä. Tämä henkilö oli kuitenkin ollut yskäinen jo ennen työvuoronsa aloittamista.

Tutkimuskohteen ilmassa esiintyi runsaasti biologisia ja kemiallisia altisteita. Mesofiilisten bakteerien pitoisuus oli maksimissaan 1,9 miljoonaa cfu/m³, termofiilisten bakteerien pitoisuus 69 000 cfu/m³ ja endotoksiinipitoisuus 2 900 EU/m³. Termotoleranttien sienien pitoisuus oli 220 000 cfu/m³, joista *A. fumigatus* -homesieniä 21 000 cfu/m³. Lisänä olivat seuraavat kemialliset altisteet merkittävänä pitoisuuksina: ammoniakki, hiili- rikki- ja typidioksidi sekä rikkivety.

Työntekijöillä oli käytössään henkilökohtaiset, puhallinavusteiset hengityksensuojaimet TH2ABEKP3 -suodattimilla. Suodattimien päiväykset olivat kunnossa eikä hajuja havaittu suojaimen kasvovisiirin sisällä. Laitteen akun lataus riitti koko työpäivän ajaksi ja laitteen ilmavirrat olivat normaalit, kun ne tarkistettiin sairastumisen jälkeen. Pahemmin sairastunut oli käyttänyt samaa suojainta suodattimineen 5 kertaa aikaisemmin työympäristöissä, joissa oli esiintynyt runsaasti biologisia altisteita. Hänen nenänsä limakalvoilta otetussa näytteessä havaittiin runsaasti *A. fumigatus* -sieniä ja *Streptomyces* -aktinobakteereita työpäivän jälkeen. Lievemmin sairastuneella suojaimen suodattimet olivat olleet vain keran aikaisemmin käytössä ja silloinkin niitä oli käytetty työympäristössä, jossa ei ollut esiintynyt biologisia altisteita. Hänen nenänsä limakalvoilla ei löytynyt *A. fumigatus* -sientä töiden jälkeen, mutta havaittiin *Streptomyces* -aktinobakteereita.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Biohajoavien jätteiden käsittelyprosessien aikana mikrobipitoisuudet ilmassa ovat selvästi pienempiä bioenergialaitoksilla kuin kompostointilaitoksilla. Bioenergiaprosessit poistavat tehokkaasti eläinperäisistä jätteistä peräisin olevat taudinaiheuttajabakteerit, mikä vähentää myös työntekijöiden mahdollista altistumista kyseisille bakteereille. Mahdollisimman suljetut prosessit ja osastoinnit vähentävät selvästi mikrobien aiheuttamia työturvallisuusriskejä. Sen sijaan kompostointilaitoksilla mikrobiologisten altisteiden leviämistä biomassasta ilmaan on hankala hallita ja estää, vaikka biomassan hygienisointi vähentää mesofii-lisia taudinaiheuttajabakteereiden määrää biomassassa.

Biologisten altisteiden määrät olivat kaikissa jätteenkäsittelylaitoksissa niin korkeita, että niiltä altistumisen vähentämiseen tarvitaan tiiviit P3-luokan hiukkassuodattimet työntekijöiden hengityksensuojaimiin ja työkoneiden ohjaamoiden ilmansuodatusjärjestelmiin. Tutkimuksessa havaittiin mikrobeita esiintyvän työntekijöiden hengityselimissä, vaikka heillä oli käytössään hengityksensuojaimet. Käytettyjen suojaimien suojauskertoimet eivät olleet riittävät tai niiden suojaustehokkuudet olivat muista syistä heikentyneet. Riskiä saattaa aiheutua myös siitä, että hengityksensuojain poistetaan liian aikaisin kasvoilta, sillä mikrobien määrää ei pystytä ilmasta aistimaan silmämääräisesti eikä haistelemalla.

Korkeiden pitoisuuksien tunnistamiseen ei ole hälytyslaitteita biologisille altisteille eikä niitä saa nopeasti tuuletettua pois varsinkaan sisähallien ilmassa. Erityisesti pieni-itiölliset mikrobit kuten aktinobakteerit leijailevat pitkään ilmassa. Työntekijöiden, jotka liikkuvat kompostointihalleissa tai ulkona kompostointikentällä biojätteiden tai niiden tukiaineiden käsittelyjen aikana, olisi käytettävä aina hengityksensuojainta. Bioenergialaitoksissa hengityksensuojaimia tarvitaan ainoastaan jätteiden avoimissa vastaanottotiloissa ja prosessilinjojen avaus- ja huoltotilanteissa.

Työturvallisuusriskeiksi havaittiin biohajoavan jätteen käsittelylaitoksissa kemiallisista altisteista ammoniakki, häkä, rikkidioksidi, rikkivety ja typpidioksidi. Kaikille jätteenkäsittelylaitoksissa työskenteleville on suositeltavaa hankkia liiallisista pitoisuuksista hälyttävät kaasunilmaisimet. Tuuletuksen lisääminen ja asianmukaisten henkilösuojaimien käyttö ovat erittäin tärkeitä varsinkin kaasunilmaisimen antaman hälytyksen aikana.

Jätteiden ja biomassan sekoitus ja siirto tehdään usein pyöräkuormaajalla ja siksi on huomioitava työolot myös työkoneiden ohjaamoissa. Jätteenkäsittelytiloissa työskentelevien pyöräkuormaajien ja muiden työkoneiden kuljettajien on turvallisinta työskennellä suljetuissa ohjaamoissa, joissa on toimivat, ylipaineistetut ilmansuodatusjärjestelmät. Työkoneissa ei yleensä ole vakiovarusteena ohjaamon ilmastointia, vaan se on saatavilla lisävarusteena. Koneissa normaalisti olevat raittiin ilman suodattimet eivät ole riittävät

estämään mikrobien kulkeutumista ohjaamoihin. Niihin pitää asentaa karkean P1/F5-luokan hiukkassuodattimen lisäksi P3/H13-luokan hepasuodatin, joka pystyy estämään myös pienten mikrobiperäisten hiukkasten kulkeutumisen ohjaamon sisäilmaan. Työkoneissa lisävarusteena olevat sisäkiertosuodattimet vähentävät myös mikrobipitoisuuksia ohjaamoissa.

On tärkeää muistaa näiden hiukkassuodattimien säännöllinen huoltaminen ja vaihtaminen sekä ohjaamoiden tiiveyden valvominen, jotta sisäilman mikrobipitoisuudet eivät pääse lisääntymään ohjaamoissa. Työkoneiden ovet ja ikkunat tulee ehdottomasti pitää suljettuina jätteitä käsiteltäessä. Työntekijöiden vaatteiden ja jalkineiden mukana kulkeutuu pieniä määriä mikrobeita ohjaamoon. Siksi on suositeltavaa myös ohjaamon sisätilojen säännöllinen puhdistaminen.

Pyöräkuormaajien ohjaamoihin pääsee kulkeutumaan myös terveydelle haitallisia kaasuja kuten ammoniakkia ja rikkivetyä. Jos pyöräkuormaajien ohjaamoihin ei saada riittävää tiiveyttä tai kaasuja poistavia suodatinjärjestelmiä, niin silloin pyöräkuormaajien ohjaamoissa on suositeltavaa olla työntekijöiden käytössä kaasunilmaisimet. Hallitiloissa poistumista pyöräkuormaajista tulee välttää ilman asianmukaisia hengityksensuojaimia jätteenkäsittelyprosessin ollessa käynnissä. Ohjaamoista poistuttaessa jätteenkäsittelytiloihin tai kaasuhälytystilanteissa kuljettajien tulee käyttää hengityksensuojaimia, jotka suojaavat mikrobien lisäksi kemiallisilta altisteilta. Tiiviit P3-hiukkas- ja ABEK-kaasusuodattimella varustetut hengityksensuojaimet ovat asianmukaiset suojaimet myös työkoneiden kuljettajille ohjaamoista poistumistilanteisiin samoin kuin muillekin jätteenkäsittelylaitoksilla työskenteleville.

Työntekijät, myös ulkopuoliset urakoitsijat ja muut tilapäisesti jätteenkäsittelylaitoksilla työskentelevät, on perehdytettävä laitoksilla esiintyviin riskeihin ja vaaratekijöihin sekä vaatia heitä työskentelemään ja tarvittaessa myös suojautumaan ohjeiden mukaisesti (Työturvallisuuslaki 738/2002, luku 6).

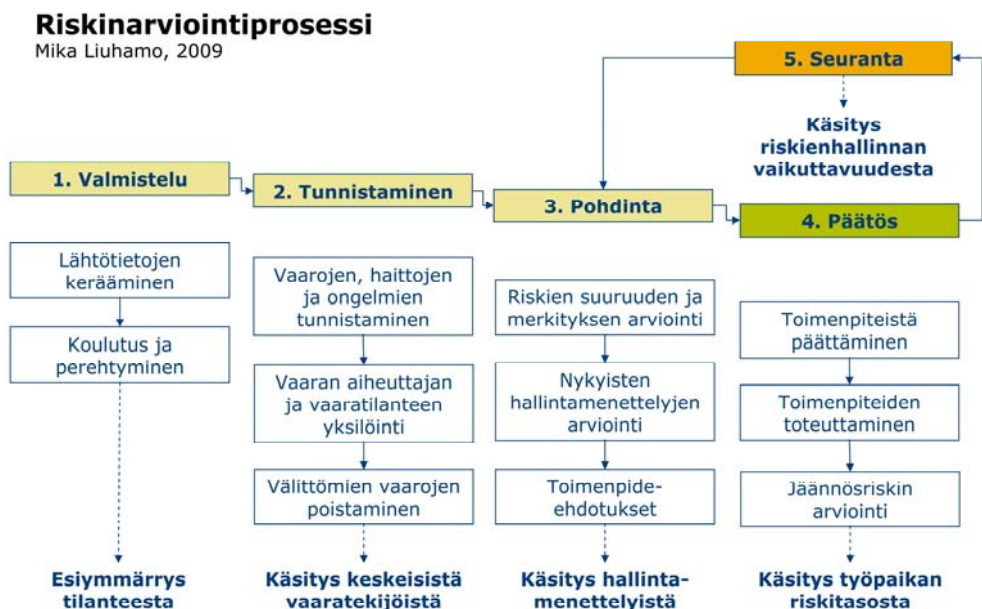
7 SUOSITUKSET

7.1 Työturvallisuusriskien arviointi

Työturvallisuuslain mukaan yritys vastaa työn vaarojen ja haittojen arvioinnista. Työnantajan on selvitettävä ja tunnistettava työstä, työtilasta, muusta työympäristöstä ja työolosuhteista aiheutuvat haitta- ja vaaratekijät. Jos niitä ei voida poistaa, työnantajan on arvioitava niiden merkitys työntekijöiden turvallisuudelle ja terveydelle. Työturvallisuusriskien arvioinnissa yritys voi käyttää asiantuntija-apuna työterveyshuoltoa (työterveyshuoltolaki 4 § 1 mom.) tai työsuojelu- ja paloviranomaisia tai muita työsuojelun asiantuntijatahoja.

Riskinarviointiprosessi työpaikalla etenee vaara- ja kuormitustekijöiden tunnistamisesta altistuvien työntekijöiden selvittämiseen, josta edelleen seurausten vakavuuden ja todennäköisyyden arvioimiseen (kuva 6). Näiden tietojen perusteella määritetään riskin suuruus (esim. merkityksetön, vähäinen, kohtalainen, merkittävä tai sietämätön). Toimenpiteiden tarve vaaran poistamiseksi tai riskin pienentämiseksi ja hallitsemiseksi päätetään työpaikalla riskin suuruuden perusteella.

Kuva 6. Riskinarviointiprosessi työpaikalla.



Riskinhallinnan yleisperiaate työturvallisuuslain mukaan on, että vaarat tulisi poistaa ennakolta ja työntekijöiden työturvallisuus tulisi huomioida jo prosessien suunnitteluvaiheessa. Mahdollisuudet työympäristön kohentamiseen ovat parhaimmat uudisrakentamisen, laajennuksien tai muutosinvestointien yhteydessä.

Työturvallisuusriskien arviointi on työpaikalla jatkuva prosessi, jossa seurataan ja tarkastetaan riskinarvioinnin ajantasaisuutta säännöllisin väliajoin. Riskien hallinta on selkeä osa turvallisuusjohtamista ja turvallisuusjohtamisen työväline.

7.2 Riskien hallinta

7.2.1 Altisteiden vähentäminen ilmasta ja leviämisen estäminen

Työntekijöiden turvallisuus tulee huomioida jätteenkäsittelylaitoksilla ja prosessit pitää pyrkiä rakentamaan mahdollisimman suljetuiksi, mikä vähentää terveydelle haitallisten altisteiden leviämistä ilmaan. Tämä onnistuu helpommin bioenergialaitoksilla kuin kompostointilaitoksilla. Esimerkiksi prosessijäännösten linkouksessa tulee käyttää linkoja, jotka ovat niin tiiviitä, ettei suuria määriä kaasuja ja mikrobiologisia altisteita pääse vuotamaan niistä ilmaan normaalin toiminnan aikana. Lisäksi lingot on sijoitettava tilaan, jossa on tehokas ilmanvaihto ja joka voidaan tarvittaessa osastoida, sillä lingon avauksen ja pesun yhteydessä lingolta leviää ilmaan epäpuhtauksia.

Sisähallien ristituuletuksella jättämällä ulko-ovet auki voi nopeasti tehostaa ilmanvaihtoa. Ympäristönsuojelusyistä jätteenkäsittelylaitokset pyrkivät pitämään ovensa kiinni, jolloin ainoaksi ratkaisuksi jää osastointi ja tehokkaan koneellisen ilmanvaihdon rakentaminen, johon on yhdistetty biosuodattimet tai muut vastaavanlaiset kaasupesurit ympäristölle haitallisten kaasujen poistoon. Kohdepoistoilla voidaan tehokkaasti kohdentaa ilmanvaihtoa prosesseihin, joista epäpuhtauksia leviää helposti ilmaan.

Sisähalleissa toinen vaihtoehto, varsinkin työkoneiden tuottamien kaasumaisten altisteiden poistoon, on pakokaasusuodattimien asentaminen työkoneisiin. Valitettavasti häkää ei pysty suodattamaan millään suodattimella.

Jätteenkäsittelylaitoksilla käytettävien työkoneiden ohjaamot tulisi varustaa ylipaineistetuilla ilmansuodatusjärjestelmillä, joihin on asennettuna karkean hiukkassuodattimen lisäksi P3/H13-luokan hepasuodatin mikrobien poistoon ja aktiivihiihi-suodatin kemiallisten altisteiden poistoon. Tällainen systeemi on työkoneissa pakollinen mm. Hollannin jätteenkäsittelylaitoksissa. Siellä työkoneissa on ulkoisesti näkyvillä vihreä merkkivalo, joka ilmoittaa ohjaamon ilmansuodatusjärjestelmän olevan toiminnassa ja ainoastaan silloin työkoneella pääsee jätteenkäsittelytehtäviin.

7.2.2 Altisteiden seuranta

Jätteiden käsittelylaitoksilla työskentelevillä työntekijöille tulee olla käytössään kaasunilmaisimet, joita voi käyttää kaasujen seurantaan ja jotka hälyttävät näkyvästi ja kuuluvasti vaaratilanteessa. Työntekijät on perehdytettävä ilmaisimen käyttöön yksityiskohtaisesti, jotta he varmasti ymmärtävät, miten ne toimivat. Kannettava kaasunilmaisimien on aina otettava mukaan poistuttaessa valvomosta prosessitiloihin. Kannettavan kaasunilmaisimen voi työntää työtilan ovesta tai luukusta sisään ennen kuin työntekijä menee sinne itse. Näin on tehtävä varsinkin umpinaisiin säiliötiloihin mentäessä.

Kiinteästi, esimerkiksi hallin seinälle asennettavat kaasunilmaisimet ovat tarpeelliset sellaisia henkilöitä varten, jotka liikkuvat vaarallisissa tiloissa kuten jätteen vastaanottotiloissa vain tilapäisesti tai jotka eivät ole varautuneet hengityksensuojainten käyttöön.

Kaasunilmaisimiin on asennettu valmiiksi rajapitoisuudet, joiden ylittyessä ilmaisimet hälyttävät ja viimeistään silloin pitää hengityksensuojain asettaa kasvoille tai tehostaa tilojen tuuletusta tai poistuttava kyseisestä tilasta. Tämän hälytysrajan voi tarvittaessa säätää itse hälyttämään alemmassakin pitoisuudessa. Kaasunilmaisimista tulee varmistaa, että ne mittaavat kaasuja, joita on havaittu prosessitiloissa esiintyvän ja kaasunilmaisimet on myös huollettava säännöllisesti niiden toimintakyvyn varmistamiseksi.

Anaerobeihin prosesseihin perustuvilla bioenergiailaitoksilla hiilimonoksidin, rikkivedyn, metaanin, vedyn tai muiden vastaavanlaisten kaasujen lisääntymisestä ilmassa saattaa muodostua syttymis- ja räjähdysvaara. Jos näitä kaasuja havaitaan esiintyvän jätteenkäsittelylaitoksen ilmassa merkittäviä määriä, niistä aiheutuvan onnettomuusriskin selvittämiseksi tulee tehdä työ- ja tuotantoprosessin kokonaisvaltainen arviointi ja siihen liittyvät riskinhallintatoimenpiteet (ATEX, TUKES-opas, 2012).

Tiloissa, joissa on haitallisten kaasujen merkittävä muodostumisvaara ja akuutti terveysvaara, ei tule jättää ketään työskentelemään yksin ilman valvontaa.

7.2.3 Henkilönsuojainten käyttö

Jos terveydelle haitallisten altisteiden määrää tai niiden leviämistä ei pystytä vähentämään teknisillä toimenpiteillä, tulee työntekijöiden käyttää henkilökohtaisia suojaimia. Tällöin työntekijät on koulutettava henkilönsuojainten oikeanlaiseen käyttöön. Tärkeää on valita asianmukainen, työntekijän kasvoihin tiivistä asettuva hengityksensuojain. Valinta tulee tehdä huolellisesti sovittamalla henkilökohtaisesti erilaisia vaihtoehtoja.

Paras vaihtoehto jätehuoltotöihin on P3-luokan hiukkassuodattimella varustettu puhallinavusteinen hengityksensuojain, jonka suojausluokka on TH3 tai TM3. Muut suojausluokat ovat riittämättömiä biojätteiden käsittelevien työntekijöiden suojaamiseen. Puhallinsuojaimen voi tarvittaessa yhdistää myös kemikaaleilta suojaavan kaasusuodattimen. Asianmukainen kaasusuojain on ABEK-P3-yhdistelmäsuodatinta. Se suojaa organisille

kaasuilta (suodatintyyppi A), rikkivedyltä (suodatintyyppi B), rikkidioksidilta (suodatintyyppi E) ja ammoniakilta (suodatintyyppi K). Kaasuilta suojaavan hengityksensuojaimen käyttö on tarpeellista varsinkin silloin, kun tiloissa havaitaan haitallisia kaasuja. Suurilta hiilimonoksidi- ja typpidioksidipitoisuuksilta ei pysty suojautumaan millään suodattimella. Ainoastaan paineilmalaitte soveltuu niiltä suojautumiseen. Paineilmalaitetta tulee käyttää myös silloin, jos ilman happipitoisuus on alle 17 %. Rähähdyksuhteissa hengityksensuojaimien tulee olla Ex-merkittyjä.

Mikrobiologisten altisteiden tunnistamiseen ei ole hälytyslaitteita ja siksi riskityövaiheissa on hyödyllistä käyttää aina vähintään hengityksensuojainta FFP3, joka on helppo kuljettaa taskussa mukana ja sen saa nopeasti asetettua kasvoille. Pitkäaikaisiin työtehtäviin sitä ei voi suositella, sillä sitä käytettäessä mikrobeja saattaa kulkeutua hengityselimiin varsinkin ohivirtauksina, jos siitä ei saa tiiviisti asetettua nenän ja suun alueelle. Kokonaan pään tai vähintään kasvot suojaavan hengityksensuojaimen käyttö on paras vaihtoehto mahdollisten ohivirtausten estämisen vuoksi ja koska mikrobiologiset ja kemialliset altisteet aiheuttavat haittavaikutuksia myös silmille. Varsinkin nestemäisenä esiintyvien tai nestemäiseksi muuntuneiden kemiallisten altisteiden roiskeet silmään voivat aiheuttaa vakavaa syövytystä silmässä tai näön sumenemisen. Hoito roiskeille on silmien välitön huuhtelu ja siksi työtiloihin tulee olla järjestettynä erityinen silmienhuuhtelupaikka.

Henkilökohtainen suojain on tehokas vain silloin, jos sitä käytetään, huolletaan ja säilytetään suojaimen valmistajan ohjeiden mukaisesti. Suojaimille tulee olla järjestettynä myös pesutilat. Kaasusuodattimien suodatuskyky perustuu aktiivihiliin. Aktiivihili menettää suodatuskykynsä, jos sitä ei säilytetä ilmatiiviisti. Yleensä laitevalmistajat antavat korkeintaan puoli vuotta säilyvyysaikaa avatulle kaasusuodattimelle. Suodattimen käyttö ympäristössä, jossa on paljon epäpuhtauksia ja ilmankosteutta voi viedä suodattimen tehokkuuden hyvinkin nopeasti, jopa minuuteissa tai yhden työvuoron aikana. Myös suodattimeen kerääntyvät mikrobit voivat nopeasti viedä suodattimen suojaustehokkuuden, jos ne pääsevät lisääntymään suodattimessa sopivan kosteissa ja lämpöisissä olosuhteissa.

Työntekijöiden tulee käyttää myös suojakäsineitä ja huolehtia henkilökohtaisesta hygieniastaan varsinkin ennen ruokailua ja työpaikalta poistuttaessa, jotta mikrobit eivät pääse kulkeutumaan käsien kautta ruuansulatuskanavaan ja aiheuttamaan sitä kautta oireita ja sairauksia.

Muiden työturvallisuuteen vaikuttavien riskien osalta havaittiin mittausten aikana kuivaa pölyä varsinkin sisähallien ja kompostointikenttien ilmassa niin paljon, että se häiritsee näkyvyyttä ja aiheutti siten selvän tapaturmavaaran. Näkyvällä varoitusvaatetuksella voidaan vähentää tämäntyyppisessä tilanteessa tapaturmariskiä. Varoitusvaatteen merkitys korostuu töissä, joissa työntekijää ei voida täysin suojata nopeasti liikkuvilta työkaluilta, vaikka työntekijöiden käytössä olisi esimerkiksi radiopuhelimet. Jätehallien kaltaisiin tiloi-

hin näkyvässä varoitusvaatteessa tulee olla sekä fluoresoiva että heijastava materiaali. Näkyvänä suojavaatteena työasun päälle puettava erillinen varoitusliivi tai -valjaat ovat usein taloudellinen ja järkevä ratkaisu. Varoitusliiviä ei yleensä tarvitse pestä usein, koska se ei likaannu niin herkästi kuin muu suojavaate. Kun heijastusteho heikentyy, varoitusliivin voi vaihtaa uuteen.

7.2.4 Työntekijöiden terveystarkastukset

Biologisille ja kemiallisille tekijöille altistuvien työntekijöiden terveystarkastuksista on määrätty valtioneuvoston asetuksessa terveystarkastuksista erityistä sairastumisen vaaraa aiheuttavissa töissä (1485/2001). Työnantajan on järjestettävä terveystarkastukset asetuksen mukaisesti. Alkutarkastus on pyrittävä tekemään ennen erityistä sairastumisen vaaraa aiheuttavan työn aloittamista, mutta se on tehtävä viimeistään kuuden kuukauden kuluessa työn aloittamisesta. Työn jatkuessa määräaikaistarkastus on toistettava yleensä 1-3 vuoden välein asetuksen ja sen liitteenä olevan esimerkkiluettelon mukaisesti. Työterveyshuoltolain (1383/2001) perusteella työntekijä ei saa ilman perusteltua syytä kieltäytyä osallistumasta terveystarkastuksiin, joita tehdään työssä olevan erityisen sairastumisen vaaran vuoksi.

Terveystarkastustarpeen arviointi ja sisällön suunnittelu perustuvat työpaikalla tehtyyn riskien arviointiin, työterveyshuollon tekemään työpaikkaselvitykseen ja muihin työpaikan ja työn altisteisiin liittyviin tietoihin. Terveystarkastustarpeen arvioinnista sekä alku- ja määräaikaistarkastusten sisällöstä saa eri altisteiden osalta tarkempaa tietoa valtioneuvoston asetuksen nojalla annetusta sosiaali- ja terveysministeriön ja Työterveyslaitoksen julkaisemasta kirjasta "Terveystarkastukset työterveyshuollossa" (Työterveyslaitos ja sosiaali- ja terveysministeriö 2005).

Työturvallisuuslain (728/2002) 40 § käsittelee työn biologisia vaaratekijöitä. Biologisista vaaratekijöistä työssä on annettu EU:n parlamentin ja neuvoston direktiivi (2000/54/EY), joka on Suomessa saatettu voimaan valtioneuvoston päätöksellä työntekijöiden suojelemisesta työhön liittyvältä biologisten tekijöiden aiheuttamalta vaaralta (1155/1993) ja sosiaali- ja terveysministeriön asetuksella biologisten tekijöiden luokituksesta (921/2010).

Toiminnassa, johon voi liittyä biologisille tekijöille altistumista, on työntekijöiden altistumisen luonne, määrä ja kesto määritettävä, jotta voidaan arvioida työntekijän terveyteen ja turvallisuuteen kohdistuva riski ja päättää tarvittavista toimenpiteistä. Päätöksissä biologiset vaaratekijät jaetaan neljään vaaraluokkaan, jonka mukaisesti määräytyvät erilaiset valtioneuvoston päätöksen edellyttämät toimenpiteet, kuten torjuntakeinot, ennakkoilmoitukset ja altistuvien työntekijöiden luettelointivelvoitteet sekä terveystarkastustarve. Biologisille tekijöille ei ole vahvistettu ilman terveysperusteisia raja-arvoja, jotka mahdollistaisivat kvantitatiivisen riskinarvion. Keskeistä arvioinnissa on todeta, mitä biologisia altisteita työpaikalla esiintyy, mitkä ovat niiden vaaraluokat, missä työvaiheissa ja ketkä

työntekijät altistuvat ja missä määrin, sekä arvioinnin perusteella ryhtyä toimenpiteisiin vaarojen vähentämiseksi. Biojätteiden käsittelylaitoksissa esiintyvät biologiset altisteet kuuluvat ryhmään kaksi, joka tarkoittaa sellaista tekijää, joka voi aiheuttaa ihmiselle sairauden ja joka voi siten olla vaarallinen työntekijöille, mutta ei kuitenkaan todennäköisesti leviä väestöön; käytettävissä on yleensä tehokas ehkäisykeino tai hoito.

Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen liitteessä on myös mainittu ne biologiset tekijät, joita vastaan on saatavilla tehokas rokote. Tehokkaita rokotuksia on mahdollisuuksien mukaan, riskinarvioinnin perusteella, annettava niille työntekijöille, jotka eivät ennestään ole immuuneja biologisille tekijöille, joille he altistuvat tai voivat altistua. Rokotussuosituksista saa tietoa myös kirjasta ”Rokotukset työelämässä” (Leino ym. 2007).

Työssä esiintyvien kemiallisten altisteiden osalta altistekohtaisia ohjeita terveystarkastustarpeen arviointiin sekä alku- ja määräaikaistarkastusten toteuttamiseen ja sisältöön löytyy edellä mainitusta kirjasta ”Terveystarkastukset työterveyshuollossa”. Työterveyslaitos tuottaa kemikaaliturvallisuutta edistäviä tiedonlähteitä, jotka ovat maksutta käytettävissä ja löytyvät Työterveyslaitoksen nettisivuilta. Ova-ohjeista (onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet -turvallisuusohjeet) ja kansainvälisistä kemikaalikorteista löytyy altistekohtaisesti tietoa mm. terveyshaitoista, suojautumisesta sekä toimenpiteistä onnettomuustilanteissa ensiapuohjeineen.

Biologisten tekijöiden luokitus perustuu vaikutuksiin terveisiin työntekijöihin. Vaikutuksia työntekijöihin, joiden herkkyyteen voi vaikuttaa jokin muu syy, kuten olemassa oleva sairaus, lääkitys, immuunipuutos, raskaus tai imetys ei ole otettu huomioon. Nämä asiat on huomioitava yksilöllisesti terveystarkastusten yhteydessä, myös kemiallisten altisteiden osalta. Raskaana oleva voi olla oikeutettu erityisäitiysrahaan, jos hänen työtehtävänsä tai työolonsa vaarantavat hänen tai sikiön terveyden (laki sairausvakuutuslain 23 §:n muuttamisesta 63/2001). Raskaana oleva on pyrittävä siirtämään muihin sopiviin tehtäviin, jollei vaaratekijää voida poistaa työstä tai työoloista. Jos muuta työtä ei voida järjestää, hän voi olla oikeutettu erityisäitiysvapaaseen ja -rahaan. Lisätietoa saa kirjasta ”Ohjeet vaaran arvioimisesta erityisäitiysvapaan tarvetta harkittaessa” (Taskinen ym. 2006).

Terveystarkastusten yhteydessä huomiota kiinnitetään erityisesti myös työntekijän edellytyksiin noudattaa työssä tarvittavaa tarkkuutta ja huolellisuutta sekä annettuja ohjeita työhön ja suojautumiseen liittyen. Jos terveydelle haitallisten altisteiden määrää tai niiden leviämistä ei pystytä vähentämään teknisillä toimenpiteillä, tulee työntekijöiden käyttää henkilökohtaisia suojaimia. Tärkeää on valita asianmukainen, työntekijän kasvoin tiivistä asettuva hengityksensuojain. Valinta tulee tehdä huolellisesti sovitamalla henkilökohtaisesti erilaisia vaihtoehtoja.

8 JATKOTUTKIMUSTARPEET

- Suojainmateriaalien tehokkuus ja niiden vaihtovälit sekä hengityksensuojaimissa että työkoneiden ohjaamoiden ilmansuodatusjärjestelmissä.
- Pilot-kokeena käytetyn, qPCR-mikrobianalytiikkaan perustuvan altistumismitausmenetelmän kehittäminen ja validointi esimerkiksi työterveyshuoltojen käyttöön.
- Työntekijöiden nenän limakalvoilla runsaasti esiintyneiden kampylobakteerien syiden ja merkityksen selvittäminen.
- Kompostin ja bioenergialaitosten biomassan lopputuotteistus mullaksi ja valmistusprosessi.

LÄHTEET

Albrecht A, Fischer G, Brunnemann-Stubbe G, Jäckel U, Kämpfer P. Recommendations for study design and sampling strategies for airborne microorganisms, MVOC and odours in the surrounding of composting facilities. *Int J Hyg Environ Health*, 211(1-2):121-31, 2008.

ATEX Räjähdyksvaarallisten tilojen turvallisuus. TUKES-opas, 2012. 19 s.

Biologiset vaarat työssä. Työsuojeluoppaita ja -ohjeita 41 (2006).

Bünger J, Schappler-Scheele B, Hilgers R, Hallier E. A 5-year follow-up study on respiratory disorders and lung function in workers exposed to organic dust from composting plants. *Int Arch Occup Environ Health*, 80(4):306-12, 2007.

Carli KT, Unal CBN, Caner V, Eyigor A. Detection of salmonellae in chicken feces by a combination of tetrathionate broth enrichment, capillary PCR, and capillary gel electrophoresis. *J Clin Microbiol*, 39(5):1871-76, 2001.

Carlin F, Brillard J, Broussolle V, Clavel T, Duport C, Jobin M, Guinebretière M-H, Auger S, Sorokine A, Nguyen-Thé C. Adaptation of *Bacillus cereus*, an ubiquitous worldwide-distributed foodborne pathogen, to a changing environment. *Food Res Int*, 43: 1885-1894, 2010.

Chen S, Yee A, Griffiths M, Larkin C, Yamashiro CT, Behari R, Paszko Kolva C, Rahn K, Degrandis SA. The evaluation of a fluorogenic polymerase chain reaction assay for the detection of *Salmonella* species in food commodities. *Int J Food Microbiol*, 35(3):239-50, 1997.

Conn KL, Leci E, Kritzman G, Lazarovits G. A quantitative method for determining soil populations of *Streptomyces* and differentiating potential potato scab-inducing strains. *Plant Disease* 82: 631-638, 1998.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2000/54/EY Työntekijöiden suojelemisesta vaaroilta, jotka liittyvät biologisille tekijöille altistumiseen työssä. Euroopan unionin virallinen lehti L 262:21-45, 2000.

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus EY/2003/2003. Euroopan unionin virallinen lehti L 304, 2003. 194 s.

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus EY/1069/2009. Euroopan unionin virallinen lehti L 300, 2009. 33 s.

Hoorfar J, Malorny B, Abdulmawjood A, Cook N, Wagner M, Fach P. Practical considerations in design of internal amplification controls for diagnostic PCR Assays. *J Clin Microbiol*, 42(5):1863-68, 2004.

Haugland RA, Brinkman N, Vesper SJ. Evaluation of rapid DNA extraction methods for the quantitative detection of fungi using real-time PCR analysis. *J Microbiol Methods*, 50(3):319-23, 2002.

HTP-arvot 2012. Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisu- ja. 2012:5. 93 s.

Huttunen M.J ja Kuittinen V. Suomen biokaasulaitosrekisteri nro 15. Tiedot vuodelta 2011. Publications of the University of Eastern Finland. Reports and Studies in Forestry and Natural Sciences No 8, 2012. 44 s.

Impiö M, Perkiö-Mäkelä M, Kallunki H, Viluksela M, Penttinen J ja Liesivuori J: Terveysriskien arviointi jätealalla, Kuopion aluetyöterveyslaitoksen loppuraportti Työsuojelurahastolle 2004 (hanke nro 101331).

Inglis GD and Kalischuk LD. Use of PCR for direct detection of *Campylobacter* species in bovine feces. *Appl Environ Microbiol*, 69(6):3435-47, 2003.

Jensen JS, Björnелиus E, Dohl B, Lidbrink P. Use of Taqman 5' nuclease for quantitative detection of *Mycoplasma genitalium* DNA in males with and without urethritis who were attendees at a sexually transmitted disease clinic. *J Clin Microbiol*, 42(2):683-92, 2004.

Kansallinen strategia biohajoavan jätteen kaatopaikkakäsittelyn vähentämisestä. Ympäristöministeriö, 2004.

Keramas G, Bang DD, Lund M, Madsen M, Bunkenborg H, Tellemann P, Christensen CBV. Use of culture, PCR analysis, and DNA microarrays for detection of *Campylobacter jejuni* and *Campylobacter coli* from chicken feces. *J Clin Microbiol*, 42(9):3985-91, 2004.

Lannoitevalmistelaki 539/2006.

Lehtomäki A, Paavola T, Luostarinen S ja Rintala J. Biokaasusta energiaa maatalouteen – raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet. Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedoksiantoja 85, 2007. 64 s.

Leino L, Hannu T, Taskinen H ja Hovi T. Rokotukset työelämässä. Työterveyslaitos ja Kansanterveyslaitos, 2007.

Linton D, Owen RJ, Stanley J. Rapid identification by PCR of the genus *Campylobacter* and of five *Campylobacter* species enteropathogenic for man and animals. *Res Microbiol*, 147(9):707-18, 1996.

Liuhamo M. Työympäristövaarojen selvittäminen, arviointi ja hallinta puusepänteollisuudessa. Työsuojeluhallinto. Työsuojelujulkaisuja 89, 2009. 46 s.

Logan JM, Edwards KJ, Saunders NA, Stanley J. Rapid identification of *Campylobacter* spp. by melting peak analysis of biprobes in real-time PCR. J Clin Microbiol, 39(6):2227-32, 2001.

Lohila A, Hyvönen S ja Liesivuori J: Jätehuollon terveys- ja ympäristövaarat: nykytila ja kehitystarpeet. Kuopion aluetyöterveyslaitoksen raportti TEKESille 2000.

Lu J, Sanchez S, Hofacre C, Maurer JJ, Harmon BG, Lee MD. Evaluation of broiler litter with reference to the microbial composition as assessed by using 16S rRNA and functional gene markers. Appl Environ Microbiol, 69(2):901-8, 2003.

Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista 14/2011.

Maa- ja metsätalousministeriö ja Kasvintuotannon tarkastuskeskus. Soveltamisopas V, 2004. Kompostointi- ja biokaasulaitokset sekä lantaa teknisesti käsittelevät laitokset. 29 s.

Maher M, Finnegan C, Collins E, Ward B, Carroll C, Cormigan M. Evaluation of culture methods and a DNA probe-based PCR assay for detection of *Campylobacter* species in clinical specimens of feces. J Clin Microbiol, 41(7):2980-86, 2003.

Malorny B, Hoorfar J, Bunge C, Helmuth R. Multicenter validation of the analytical accuracy of *Salmonella* PCR: Towards an international standard. Appl Environ Microbiol, 69(1):290-6, 2003.

McGarvey JA, Miller WG, Santchez S, Stanker L. Identification of bacterial populations in dairy wastewaters by use of 16S rRNA gene sequences and other genetic markers. Appl Environ Microbiol, 70(7):4267-75, 2004.

Niskala K. Jätevesilietteen aumakompostoinnin kehittäminen ilmaan purkautuvien hajukaasujen vähentämiseksi. Oulun yliopisto, 2010. 99 s.

Numminen A. Laboratorioanalyysit biohajoavan jätteen kompostoinnin tutkimisessa. Opinnäytetyö, Savon ammatti- ja aikuisopisto, 4/2012. 25 s.

Perrott, JK, Armstrong D. *Aspergillus fumigatus* densities in relation to forest succession and edge effects: implications for wildlife health in modified environments. EcoHealth 8: 290-300, 2011.

Pääkkönen R, Rantanen S ja Uitti J. Työn terveysvaarojen tunnistaminen. Työterveyslaitos, Sosiaali- ja terveysministeriö 2005. 99 s.

Radhika B, Padmapriya BP, Chandrashekar N, Keshava N, Varadaraj MC. Detection of *Bacillus cereus* in foods by colony hybridization using PCR-generated probe and characterization of isolates for toxins by PCR. *Int J Food Microbiol*, 74(1-2):131-8, 2002.

Rahn K, Degrandis SA, Clarke RC, Mcewen SA, Galan JE, Ginocchio C, Curtiss R, Gyles CL. Amplification of an *invA* gene sequence of *Salmonella typhimurium* by polymerase chain reaction as a specific method of detection of *Salmonella*. *Mol Cell Probes*, 6(4):271- 9, 1992.

Rainisalo A, Romantschuk M, Kontro MH. Evolution of *clostridia* and *streptomyces* in full-scale composting facilities and pilot drums equipped with on-line temperature monitoring and aeration. *Bioresource technology*, 102(17):7975-83, 2011.

Rintala H, Nevalainen A, Rönkä E, Suutari M. PCR primers targeting the 16S rRNA gene for the specific detection of *streptomyces*. *Mol Cell Probes*, 15(6):337-47, 2001.

Rintala H, Nevalainen A, Suutari, M. Diversity of *streptomyces* in water-damaged building materials based on 16S rDNA sequences. *Letters in Applied Microbiology*, 34(6):439-43, 2002.

Schraft H and Griffiths MW. Specific oligonucleotide primers for detection of lecithinase-positive *Bacillus* spp. by PCR. *Appl Environ Microbiol*, 61(6):98-102, 1995.

Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja 2015:5. HTP-arvot 2012. Haitalliseksi tunnetut pitoisuudet.

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus biologisten tekijöiden luokituksesta (921/2010).

Taskinen H, Lindholm M-L ja Frilander H. Ohjeet vaaran arvioimisesta erityisäitiysvapaan tarvetta harkittaessa. Työterveyslaitos, 2006.

Terveystarkastukset työterveyshuollossa. Työterveyslaitos ja sosiaali- ja terveysministeriö, 2005.

Trebesius K, Harmsen D, Rakin A, Schmelz J, Heesemann J. Development of rRNA-targeted PCR and in situ hybridization with fluorescently labelled oligonucleotides for detection of *Yersinia* species. *J Clin Microbiol*, 36(9): 2557-64, 1998.

Työturvallisuuslaki (738/2002).

Työterveyshuoltolaki (1383/2001).

Valtioneuvoston asetus terveystarkastuksista erityistä sairastumisen vaaraa aiheuttavissa töissä (1485/2001).

Valtioneuvoston päätös työntekijöiden suojelemisesta työhön liittyvältä biologisten tekijöiden aiheuttamalta vaaralta (1155/1993).

Ympäristöministeriö. Kohti kierrätysyhteiskuntaa. Valtakunnallinen jätesuunnitelma vuoteen 2016. Suomen ympäristö 32/2008. 54 s.

Zanardini E, Andreoni V, Borin S, Cappitelli F, Daffonchio D, Talotta P, Sorlini C, Ranalli G, Bruni S, Carlati F. Lead-resistant microorganisms from red stains of marble of the Certosa of Pavia, Italy, and use of nucleic acid-based techniques for their detection. *Int Biodet Biodegr*, 40:171-82, 1997.

LIITTEET

Liite 1 Tiedote

Liite 2 Suostumuskaavake

LIITE 1. TIEDOTE

5.4.2011

MIKROBIOLOGISTEN TERVEYSVAAROJEN SELVITYS BIOHAJOAVIEN JÄTTEIDEN LAITOSMAISESSA KÄSITTELYSSÄ**1. Tutkimuksen tavoitteet**

Altistumismittausten päätavoitteena on löytää mikrobiologisia terveysvaaroja aiheuttavat riskityövaiheet biohajoavien jätteiden käsittelylaitoksista ja selvittää, millä toimenpiteillä terveysriskejä saadaan vähennettyä. Tavoitteeseen pyritään

1. tutkimalla biohajoavien jätteiden erilaisten käsittelytapojen vaikutusta ilman haitallisten bakteerien ja homesienten pitoisuuksiin.
2. selvittämällä normaalisti käytössä olevien suojavälineiden (mm. työkoneiden tuloilman-suodattimien ja hengityssuojainten) riittävyyttä työntekijän suojaamiseen ja selvittämällä jätteenkäsittelyprosessissa tapahtuvien poikkeamatilanteiden vaikutusta työntekijän kokonaisaltistumisen määrään bakteereille ja homesienille.
3. tutkimalla nenänielunäytteen soveltuvuutta työntekijöiden ilman kautta tapahtuvan altistumisen arviointiin terveydelle haitallisille bakteereille ja homesienille.

2. Tutkimusmenetelmät

Työympäristön ilmanäytteitä otetaan jätteenkäsittelyprosessin eri vaiheista. Ilmanäytteet kerätään Teidän hengitysvyöhykkeeltänne pienille IOM-keräimille, jotka kiinnitetään työvaatteisiinne yhdessä noin 1 kg painavan näytteenottopumpun kanssa. Näytteenkeräys ei estä työtehtävien normaalia hoitamista. Näytteenottoaika on 0,5-2 tuntia senhetkisten työtehtävienne mukaisesti. Lisäksi Teidän nenän limakalvoilta otetaan steriileillä pumpulitikuilla mikrobinäyte. Näytteenottaminen on Teille kivuton ja nopea toimenpide. Nenä- ja nenänielunäytteistä etsitään terveydelle haitallisia bakteereita ja homesieniä.

3. Vapaaehtoisuus ja tietosuoja

Tutkimustuloksista annetaan Teille henkilökohtainen palaute ja Teillä on mahdollisuus kysyä tulostenne merkityksestä tutkimusryhmän henkilöiltä. Tutkimuksesta tehtävässä raportissa tuloksianne käsitellään Teitä tunnistamattomassa muodossa. Tutkimukseen osallistumisenne on vapaaehtoista ja tuloksianne käsitellään luottamuksellisesti.

Tuloksien yksilötasoinen luovutus muualle on mahdollista vain siinä tapauksessa, että olette antaneet tähän suostumuksenne. Teillä on mahdollisuus keskeyttää tutkimukseen osallistuminen milloin vain. Henkilötunnistettavat tiedot jäävät suojattuina Työterveyslaitoksen tutkimusarkistoon.

4. Tutkimuksesta saatava hyöty ja mahdollinen haitta tutkimukseen osallistuvil-le

Tutkimuksen avulla saadaan merkittävää ja käyttökelpoista uutta tietoa siitä, millaisia mikrobiologisia terveysriskejä esiintyy biohajoavia jätteitä käsittelevien työntekijöiden työpaikoilla. Tulosten perusteella voidaan parantaa työntekijöiden suojautumista bakteerien ja homesienien aiheuttamaa sairastumisvaaraa vastaan. Kokonaisuudessaan tutkimus edesauttaa työntekijöiden työ- ja toimintakyvyn säilymistä hyvänä ja mahdollisten sairaspotilaiden vähenemistä. Tuloksia hyödynnetään bakteereille ja homesienille altistuvien työntekijöiden terveysriskien tunnistamisessa ja arvioinnissa sekä terveydentilan seurannassa mm. työterveyshuolloissa.

Tutkimus ei aiheuta tutkittavalle kipua eikä haittaa.

5. Tutkimusryhmän yhteystiedot

Vastuullinen johtaja: teemajohtaja Kari Reijula, Työterveyslaitos, puh. 030-4742932

Päätutkija: erikoistutkija Sirpa Laitinen, Työterveyslaitos, puh. 030-4747233

Tutkijalääkäri: ylilääkäri Pirjo Jokela, Työterveyslaitos, puh. 030-4747258

sähköpostit: etunimi.sukunimi@ttl.fi

Tutkimusryhmä kiittää yhteistyöstä!

LIITE 2. SUOSTUMUSKAAVAKE

5.4.2011

MIKROBIOLOGISTEN TERVEYSVAAROJEN SELVITYS BIOHAJOAVIEN JÄTTEIDEN LAITOSMAISESSA KÄSITTELYSSÄ

Olen saanut riittävästi kirjallista ja suullista tietoa tutkimuksesta "Mikrobiologisten terveysvaarojen selvitys biohajoavien jätteiden laitosmaisessa käsittelyssä" ja haluan osallistua siihen. Olen tietoinen, että osallistuminen on vapaaehtoista ja että voin keskeyttää osallistumiseni milloin tahansa ilman että se mitenkään vaikuttaa hoitooni / kohteluuni nyt tai vastaisuudessa. Samalla annan suostumukseni, että Työterveyslaitos saa käyttää nyt tehtävässä tutkimuksessa minua koskevia näyte- ja analyysitietoja sekä Työterveyslaitos saa antaa minua koskevia, tässä tutkimuksessa saatuja tuloksia työterveyshuollon käyttöön.

_____	____/____/____
paikkakunta	päivä kuukausi vuosi
_____	_____
nimikirjoitus	henkilötunnus
_____	_____
nimen selvennys	ammattinimike

tutkittavan työpaikka ja -osoite	

suostumuksen vastaanottajan allekirjoitus	

nimen selvennys	

Tutkittavalle toimitetaan kopio tästä suostumuskAAVAKKEESTA.

Jätteiden hyötykäyttö kierrättämällä on lisääntymässä. Biohajoavien jätteiden kierrätyskäsittelystä saattaa seurata työntekijöille työturvallisuusriskejä, joita selvitettiin tässä hankkeessa. Tutkimuskohteina oli auma-, tunneli- ja rumpu-kompostointilaitoksia ja jätteitä bioenergiaksi hyödyntäviä laitoksia.

Mahdollisimman suljetut prosessit ja osastoinnit vähentävät selvästi työntekijöille aiheutuvia työturvallisuusriskejä, joita ovat jätemassojen prosessoinneista työilmaan leviävät bakteerit ja homesienet sekä kaasumaiset yhdisteet. Työntekijöiden suojaustoimenpiteiden kehittämiseen tulee kiinnittää enemmän huomioita.

TYÖTERVEYSLAITOS

Työterveyslaitos, Työympäristön kehittäminen, Biologiset haitat ja sisäilma -tiimi
Topeliuksenkatu 41 a A, 00250 Helsinki

www.ttl.fi

ISBN 978-952-261-347-9 (nid.)
ISBN 978-952-261-348-6 (pdf)



Työsuojelurahasto
Arbetarskyddsfonden
The Finnish Work Environment Fund

EKOKEM