



SAVONIA

TOIMISTOTYÖYMPÄRISTÖN SISÄILMASTO JA BIOLOGISEN PUHDISTUS- LAITTEEN TUOTEKEHITYS

TEKIJÄ: Veera Ronkainen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Ympäristötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Veera Ronkainen			
Työn nimi Toimistotyöympäristön sisäilmasto ja biologisen puhdistuslaitteen tuotekehitys			
Päiväys	1.6.2016	Sivumäärä/Liitteet	59/6
Ohjaaja(t) Yliopettaja Merja Tolvanen ja yliopettaja Pasi Pajula			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Naturvention Oy			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kokeellisen ilmanpuhdistuslaitteen käyttökuntoon saattaminen kaikkine laitteineen sekä koejärjestelyn suunnittelu ja toteutus, jolla laitteen ilmanpuhdistuskapasiteettia pyrittiin selvittämään. Lisäksi tehtiin kirjallisuuskatsaus, johon on koottu tietoa sisäilmasta, sisäilman epäpuhtauksista ja niiden lähteistä sekä terveysvaikutuksista, ilmanvaihtojärjestelmistä, käytetyistä sisäilmanpuhdistimista ja ilman biologisista puhdistusmenetelmistä, kohteissa, joissa ei ole tuotannosta tai muistakaan syistä johtuvia yksittäisiä, voimakkaita päästölähteitä. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi koulut, toimistot ja virastot.</p> <p>Ilmanpuhdistuslaitteen tuotekehittely tapahtui Jyväskylässä Naturvention Oy:n toimitiloissa syksyllä 2015. Laitteen toiminta perustuu biotransformaatioon, jonka avulla ilman epäpuhtauksien kemiallista rakennetta muutetaan mikro-organismien avulla terveydelle vaarattomampaan muotoon. Koejärjestelyt ja näytteenotto suoritettiin kolmessa osassa, kahtena eri näytteenottopäivänä 11.11.2015 ja 26.11.2015. Näytteenotto tehtiin Tenax-adsorbtioputkinäytteinä. Adsorbtioputkinäytteillä saadaan selville ilmanäytteen sisältämien eri VOC-yhdisteiden määrät ja näin voitiin selvittää laitteen tulo- ja poistoilman VOC-määrien erotuksesta laitteen puhdistuskapasiteettia. Ensimmäinen koejärjestely testasi laitteen puhdistuskapasiteettia silloin, kun laitteessa on ilman epäpuhtauksia hajottavia mikro-organismeja, toisessa koejärjestelyssä prosessia koetettiin tehostaa parannetulla kasvualustalla ja kolmas koejärjestely oli niin sanottu vertailumittaus, jossa selvitettiin kuinka paljon ilman epäpuhtauksista, varsinkin vesiliukoisista VOC-yhdisteistä poistuu pelkästään laitteen vedenkierron ansiosta. Ennen viimeistä näytteenottoa laite oli puhdistettu ja desinfioitu mikro-organismien poistamiseksi.</p> <p>Laitteen läpi virtaavan ilman VOC-yhdisteiden reduktio oli parhaimmillaan parannetulla kasvualustalla ja heikommillaan vertailumittauksen aikana. Kokonais-VOC-pitoisuuden reduktio parannetulla kasvualustalla tehostetussa prosessissa oli 95,3 %, ilman paranneltua kasvualustaa 88,2 % ja vertailumittauksessa 83,8 %.</p>			
Avainsanat sisäilma, sisäilmasto, sisäilman epäpuhtaudet, biotransformaatio			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology			
Author(s) Veera Ronkainen			
Title of Thesis Indoor Air in Work Environment and the Product Development of Biological Purifying Device			
Date	1 June 2016	Pages/Appendices	59/6
Supervisor(s) Ms. Merja Tolvanen, Principal Lecture, Mr. Pasi Pajula, Principal Lecture			
Client Organisation /Partners Naturvention Oy			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to set up an experimental air cleaning device with all of its components as well as to design an experimental arrangement to determine the air cleaning capacity of the air cleaning device. This thesis also contains a literature review about indoor air and its pollutants, their sources and health effects, ventilation systems and filters used in them, and biological filters that are used in locations with no single major sources of air pollution. This kind of locations include for example schools, offices and bureaus.</p> <p>The development of the air cleaning device took place in the offices of Naturvention Ltd., in Jyväskylä, in the fall of 2015. The operating principle of the device is based on biotransformation, with what the impurities in the air are transformed by microbes into compounds that are less harmful to health. The experimental setup included three different configurations of the device, and the sampling was done on two separate days, on 11 of and 26 of November, 2015. The sampling was done with Tenax absorption tubes. With these absorption tube samples, the concentrations of different VOCs in the air were determined from the inlet and outlet air streams of the device, and the reduction capacities of different configurations were calculated. The first configuration was used to determine the reduction efficiency when the process contained only microbes for cleaning the air. The second configuration tested the possibility of enhancing the reduction efficiency by using improved growing media in the system with microbes. The third configuration contained neither microbes nor improved growing media, but only cleaned the air by washing the impurities into water. The third configuration was used as a control to determine the efficiency by which the system removed VOCs and especially the more insoluble VOCs from the air when biological removal techniques were not used and only water was used. To measure the purifying capacity with the third configuration, the device was cleaned and disinfected before using it with only water without any microbes.</p> <p>As a result of this thesis, it can be stated that the reduction efficiency for VOCs from the airflow was obtained when improved growing media was used, and the smallest when using the control configuration. The reduction for the total VOC concentration in the process with improved growing media was 95.3 %, without improved growing media 88.2 %, and in the control configuration 83.8 %.</p>			
<p>Keywords</p> <p>indoor air, indoor air pollutants, biotransformation</p>			

ESIPUHE

Tämä opinnäytetyö on tehty Naturvention Oy:n toimeksiannosta syksyn 2015 ja kevään 2016 aikana. Haluan kiittää Naturventionin toimitusjohtajaa Niko Järvistä mielenkiintoisesta opinnäytetyön aiheesta, ohjaamisesta sekä avusta ja ideoista kokeelliseen osuuteen liittyen, Mika Leppäahoa, joka osoittautui huomattavasti minua näppärämmäksi järjestelmäkameran käytössä, sekä koko Naturventionin henkilöstöä mukavista työpäivistä. Lisäksi haluaisin kiittää opinnäytetyötä ohjanneita opettajiani, yliopettaja Merja Tolvasta ja yliopettaja Pasi Pajulaa.

Koko opiskelujeni aikaisesta kannustuksesta ja tuesta kiitän vanhempiani, sekä erityisesti isoveljeäni. Viimeisimpänä, muttei vähäisimpänä, haluan vielä osoittaa valtavan kokoisen hymyn parhaalle ystävälleni aivan verrattomasta vertaistuesta ja monesta itkunsekaisestakin naurusta opiskelujemme aikana; Mari, we did it - ympäristötekniikan insinöörit, kevät 2016!

Jyväskylässä 3.6.2016

Veera Ronkainen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	SISÄILMA JA SISÄILMASTO	8
2.1	Sisäilmastoluokitus	8
2.1.1	Sisäilmastoluokat	9
2.1.2	Rakennusmateriaalien päästöluokitus	9
2.2	Ilmanvaihto- ja ilmastointijärjestelmät	10
2.2.1	Ilmanvaihtojärjestelmät	10
2.2.2	Ilmastointijärjestelmät	12
3	SISÄILMAN EPÄPUHTAUDET	13
3.1	Yleisimmät sisäilman epäpuhtaudet	13
3.1.1	Hiukkaset ja teolliset mineraalikuidut	13
3.1.2	Epäorgaaniset kaasumaiset yhdisteet	15
3.1.3	VOC-yhdisteet (<i>eng. volatile organic compounds</i>)	16
3.1.4	Mikrobit	17
3.2	Epäpuhtauksien lähteet	18
3.2.1	Ulkoilma	18
3.2.2	Rakennusperäiset ja rakennuksen sisäiset päästölähteet	19
3.3	Terveysvaikutukset	20
3.3.1	Hiukkaset ja teolliset mineraalikuidut	20
3.3.2	Epäorgaaniset kaasumaiset yhdisteet	20
3.3.3	VOC-yhdisteet	22
3.3.4	Mikrobit	22
3.4	Ennaltaehkäisy	22
4	SISÄILMAN PUHDISTIMET	24
4.1	Käyttökohteet ja käyttötarve	24
4.2	Yleisimmät sisäilman puhdistimet	24
5	BIOLOGISET PUHDISTIMET	26
5.1	Biosuodattimet, biovalutussuodattimet ja biopesurit	26
5.1.1	Biosuodatin	27
5.1.2	Biovalutussuodatin	29
5.1.3	Biopesuri	31

5.1.4	Viherseinät ja kasvipuhdistimet	32
5.1.5	Kalvoreaktorit	33
6	KOKEELLISEN TYÖN AIHEEN RAJAUS, TAVOITTEET JA LÄHTÖKOHDAT	34
7	LAITTEEN KEHITTÄMISVAIHEET JA OSAT	34
7.1	Ilmavirtaus	34
7.2	Kastelujärjestelmä ja veden kierto (vain tilaajan käyttöön)	35
7.3	Puhdistuspatruuna (vain tilaajan käyttöön)	35
8	LAITTEEN TESTAUKSEN KOEJÄRJESTELYT	36
8.1	Mittauksissa käytetyt laitteet.....	36
8.2	Mittauksissa käytetyt kemikaalit	37
8.3	Koejärjestely.....	38
9	TULOKSET	39
9.1	Laitteen puhdistuskapasiteetti mikro-organismien avulla.....	39
9.2	Tehostettu kasvatusalusta	40
9.3	Vertailumittaus	42
9.4	Tulosten yhteenvedo	43
10	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	44
	LÄHTEET	46
	LIITE 1 YLEISIMMÄT VOC-YHISTEIDEN PÄÄSTÖLÄHTEET.....	50
	LIITE 2 MITTAUSTULOKSET 11.11.2016 SUORITETUISTA NÄYTTEENOTOISTA	52
	LIITE 3 MITTAUSTULOKSET 26.11.2016 SUORITETUISTA NÄYTTEENOTOISTA (VAIN TILAAJAN KÄYTTÖÖN).....	54

1 JOHDANTO

Sisäilmaongelmiin kiinnitetään nykyisin paljon huomiota ja sisäilmaongelmien syitä, ennaltaehkäisyä ja vaikutuksia tutkitaan näiden haittojen poistamiseksi. Tässä työssä keskitytään sisäilmaongelmiin tiloissa, joissa ei ole tuotannolle tyypillisiä, yksittäisiä ja selviä sisäilman epäpuhtauksien päästölähteitä. Tällaisia tiloja ovat niin sanotut siistin sisätyön kohteet kuten toimistot, koulut ja virastot. Sisäilman epäpuhtaudet voivat aiheuttaa vakaviakin terveyshaittoja mutta koettu sisäilmasto ja oireiden ilmeneminen ovat hyvin yksilöllistä. Ongelmien taustalla voi olla home- tai kosteusvaurio, jokin muu päästölähde tai näiden yhdistelmä. Sisäilman laatua heikentäviä päästölähteitä ovat esimerkiksi ulkoilma, rakennus- ja sisustusmateriaalit sekä ihmisen toiminta. Mikäli päästölähdettä ei voida poistaa tai kyseessä ei ole korjaustoimenpiteitä vaativa kosteus- tai homevaurio, sisäilman epäpuhtauksien hallinnassa merkittävin tekijä on ilmanvaihtojärjestelmä. Ilmanvaihtojärjestelmän tarkoituksena on huolehtia riittävästä puhtaan korvausilman määrästä ja epäpuhtauksia sisältävän ilman poistamisesta sisätiloista.

Sisäilman epäpuhtauksien hallinnassa tärkeää on ongelmien ennaltaehkäisy. Ennaltaehkäisyä toteutetaan erilaisten ohjearvojen ja rakennusmääräysten noudattamisella sekä esimerkiksi rakentamisessa ja sisustamisessa käytettävien materiaalien valinnalla. Ennaltaehkäisyssä tärkeitä tekijöitä ovat myös sisäilmaston fysikaalisten ominaisuuksien hallinta sekä rakennusten tarkoituksenmukainen käyttö ja huolto. Sisäilman laatua voidaan lisäksi parantaa erilaisilla sisäilman puhdistimilla ja suodattimilla.

Tämän opinnäytetyön tilaajana toimii Naturvention Oy. Yritys valmistaa sisäilmaa puhdistavia ja luonnollistavia aktiiviviherseiniä. Viherseiniä ilmanpuhdistus perustuu biotransformaatioon, jossa yhdisteiden kemiallista rakennetta muutetaan organismien avulla. Kasvien juuriston mikrobikanta hajottaa ilman epäpuhtauksia muodostaen terveydelle vaarattomia yhdisteitä.

Opinnäytetyön kokeellisessa osuudessa tarkoituksena on selvittää onko vastaavaa ilmanpuhdistusta mahdollista suorittaa ilmanpuhdistuslaitteen uuden version prototyypillä, ja minkälainen puhdistuskapasiteetti laitteella saadaan aikaan. Idean ja prototyypin alustavan rakenteen on kehittänyt Naturventionin toimitusjohtaja Niko Järvinen. Opinnäytetyön tavoitteena on prototyypin käyttökuntoon saattaminen kaikkine laitteineen, koejärjestelyn suunnittelu ja mittausten suorittaminen, joilla prototyypin ilmanpuhdistuskapasiteettia pyritään selvittämään. Toisena tavoitteena työssä on kirjallisuuskatsaus sisäilmasta. Kirjallisuuskatsauksessa käsiteltäviä aihealueita ovat sisäilman epäpuhtaudet ja sisäilmanpuhdistimet. Epäpuhtauksista perehdytään niiden ominaisuuksiin, päästölähteisiin, terveysvaikutuksiin sekä ennaltaehkäisyyn. Sisäilman puhdistimista taas tarkastellaan tällä hetkellä käytettyimpien puhdistimien toimintaperiaatteita sekä biologisia ilmanpuhdistimia.

2 SISÄILMA JA SISÄILMASTO

Sisäilma on sisätiloissa hengitettävää ilmaa. Ilman lisäksi sisäilmassa saattaa olla monenlaisia kaasuja ja hiukkasmaisia yhdisteitä. Sisäilmasto taas tarkoittaa tilan sisäilmaa ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Puhuttaessa sisäilmastosta työssä tarkoitetaan sellaisten tilojen sisäilmastoa, joissa ei ole tuotantoa tai sellaisia toimintoja, jotka aiheuttavat sisäilmaan erityisiä päästöjä. Yleisesti sisäilman katsotaan olevan hyvää, mikäli suurin osa tilan sisäilmaa käyttävistä henkilöistä ovat ilmanlaatuun tyytyväisiä, eivätkä sisäilman epäpuhtaudet aiheuta terveydellistä haittaa. Koettu sisäilma on kuitenkin yksilöllinen asia. Toiset ihmiset ovat huomattavasti herkempiä sisäilman epäpuhtauksille ja muille tekijöille. (Sisäilmayhdistys ry, 2016)

Sisäilmastoon vaikuttavia fysikaalisia tekijöitä ovat ilman liike ja veto, kosteus, lämpötila, melu, valaistus ja säteily, kuten radon (Sisäilmayhdistys ry, 2016). Työssä ei erikseen käsitellä kaikkia sisäilmaan vaikuttavia fysikaalisia tekijöitä, mutta työssä sivutaan joidenkin fysikaalisten tekijöiden vaikutusta ilman epäpuhtauksien syntyyn sekä ilmanpuhdistukseen ja kokeelliseen osuuteen liittyen. Fysikaaliset tekijät voivat vaikuttaa myös kemiallisten epäpuhtauksien syntyyn. Kosteus ja korkea lämpötila esimerkiksi nopeuttavat joidenkin epäpuhtauksien vapautumista rakennusmateriaaleista. (Sosiaali- ja terveysministeriö, 2003.)

Terveellisen ja hyvän sisäilman takaamisen kannalta suuri tekijä on riittävä ilmanvaihto. Ilmanvaihdon tehtävänä on poistaa sisäilmaa, johon erilaiset päästölähteet ovat tuottaneet epäpuhtauksia ja taata riittävästi puhdasta korvausilmaa. Ilmanvaihto mitoitetaan todennäköisen henkilömäärän ja riittävän hajunpoiston mukaan. (Siikanen, 2014, 204.) Ilmanvaihtoa suunniteltaessa ilmavirrat voidaan mitoittaa joko määriteltujen ohjearvojen perusteella, tai määrittelemällä tilan epäpuhtaus- kosteus- ja lämpökuormitukset (Sandberg, 2014, 98). Sisäilman laatua voidaan parantaa myös tuulettamalla sisätiloja, mutta hyöty on vain hetkellistä koska sisäilman päästölähteet yleensä vapauttavat epäpuhtauksia jatkuvasti. Tuulettamisesta voivat lisäksi vaikeuttaa tai estää esimerkiksi sääolot, ulkoilman epäpuhtaudet sekä melu. (Guieysse, Hort, Platel, Munoz, Ondarts ja Revah, 2008)

2.1 Sisäilmastoluokitus

Vuonna 1995 on julkaistu Sisäilmaston, rakennustöiden ja pintamateriaalien luokitus, sitä seurasi vuonna 2001 Sisäilmastoluokitus 2000 sekä nykyisin käytössä oleva, vuonna 2008 julkaistu Sisäilmastoluokitus 2008. Sisäilmastoluokituksen tarkoituksena on toimia ohjenuorana rakennettaessa sisäilmastoltaan terveydelle vaarattomia ja viihtyisiä rakennuksia. Luokitus sisältää sisäilman tavoite- ja ohjearvot, sekä rakennusmateriaalien luokittelun niiden sisäilmanlaatua heikentävien ja terveydelle haitallisten päästöjen mukaan. Sisäilmastoluokitusta voidaan siis soveltaa rakennus- ja talotekniseen suunnitteluun, urakointiin ja rakennusteollisuuteen. Osittain sisäilmastoluokitus soveltuu avuksi myös korjausrakentamiseen. (Säteri, Andersson, Hongisto ja Kurnitsi, 2008, 5.)

2.1.1 Sisäilmastoluokat

Sisäilmastoluokituksessa on määritelty sisäilmaluokat S1, S2 ja S3. Luokista paras on S1. Luokat on asetettu niin, että heikoimman luokan, S3 viitearvoja käytettäessä terveille henkilöille ei aiheudu sisäilmastosta haittaa, mikäli tilassa ei ole erityisiä epäpuhtauksien lähteitä ja rakennuksen ilmanvaihdon toimivuus vastaa suunniteltua. Luokan S3 määritelmä on laadittu vastaamaan terveydensuojelulain 309/2006, RT STM-21319, LVI STM-00341 ja KH STM-10460, sekä maankäyttö- ja rakennuslain, RT YM1-21357, LVI YM-00365 ja KH YM-10488, vaatimuksia. (Säteri ym., 2008, 8.)

Laatuluokat (Sisäilmastoluokitus 2008)

S1 Yksilöllinen sisäilmasto

Tilan sisäilman laatu on erittäin hyvä eikä tiloissa ole havaittavia hajuja. Sisäilmaan yhteydessä olevissa tiloissa tai rakenteissa ei ole ilmanlaatua heikentäviä vaurioita tai epäpuhtauslähteitä. Lämpöolot ovat viihtyisät eikä vetoa tai ylikämpenemistä esiinny. Tilan käyttäjä pystyy yksilöllisesti hallitsemaan lämpöoloja. Tiloissa on niiden käyttötarkoituksen mukaiset erittäin hyvät ääniolosuhteet ja hyviä valaistusolosuhteita tukemassa yksilöllisesti säädettävä valaistus.

S2 Hyvä sisäilmasto

Tilan sisäilman laatu on hyvä eikä tiloissa ole häiritseviä hajuja. Sisäilmaan yhteydessä olevissa tiloissa tai rakenteissa ei ole ilmanlaatua heikentäviä vaurioita tai epäpuhtauslähteitä. Lämpöolot ovat hyvät. Vetoa ei yleensä esiinny, mutta ylikämpeneminen on mahdollista kesäpäivinä. Tiloissa on niiden käyttötarkoituksen mukaiset hyvät ääni- ja valaistusolosuhteet.

S3 Tyydyttävä sisäilmasto

Tilan sisäilman laatu ja lämpöolot sekä valaistus- ja ääniolosuhteet täyttävät rakennusmääräysten vähimmäisvaatimukset.

2.1.2 Rakennusmateriaalien päästöluokitus

Sisäilmaluokituksessa määritetyt rakennusmateriaalien päästöluokitukset taas lajittelevat rakennusmateriaaleja sen mukaan, kuinka paljon ne vapauttavat kemikaaleja. Luokat ovat M1, M2 ja M3. Luokka M1 on paras ja luokka M3 huonoin. Luokkaan M3 kuuluvat kaikki tutkitut rakennusmateriaalit jotka vapauttavat enemmän kemikaaleja, kuin luokkien M1 ja M2 materiaalit. Luokkaan M1 ja M2 kuuluvien rakennusmateriaalien vapauttamien kemikaalien emissiorajat on nähtävissä taulukossa 1.

Taulukko 1 Luokkien M1 ja M2 materiaaliemissio vaatimukset (Säteri ym., 2008)

Emissionopeus	Laatuluokka	
	M1 (mg/m ² h)	M2 (mg/m ² h)
TVOC	0,2	0,4
Formaldehydi	0,05	0,125
Ammoniakki	0,03	0,06

Lisäksi M1 ja M2 luokkiin kuuluvien materiaalien IARC:n (International Agency for Research on Cancer) luokittelun mukaisten karsinogeenisten aineiden emissioiden on formaldehydiä lukuun ottamatta, määritelty erikseen, oltava alle 0,005mg/m²h, tasoitteet, laastit ja silotteet eivät saa sisältää kaseiinia, eivätkä materiaalit kouluttamattoman paneelin mukaan haise (hajun hyväksyttävyys alle 0,1). (Säteri ym., 2008, 32–33.)

2.2 Ilmanvaihto- ja ilmastointijärjestelmät

Ilmanvaihtojärjestelmän tarkoituksena on hallita tilan ilman puhtautta. Ilmanvaihto mitoitetaan tarvittavan tuloilman määrän perusteella, mutta joissakin kohteissa tuloilman määrä voi olla myös säädeltävissä. Ilmanvaihtojärjestelmän ja ilmastointijärjestelmän ero on siinä, että jälkimmäisessä pyritään hallitsemaan ilman fysikaalisia ominaisuuksia, erityisesti lämpötilaa, mutta joissain tapauksissa myös kosteutta. Ilmastointijärjestelmä voidaan mitoittaa tarvittavan jäähdytyskuorman perusteella, jolloin jäähdytetyn tuloilman määrä on mitoittava tekijä. Tilassa voi myös olla erillisiä jäähdytyslaitteita, jolloin huoneilmaa kierrätetään näin aikaansaaden tarvittavan huoneilman jäähdytyksen. Ilmastointijärjestelmässä tuloilmaa tarvittaessa voidaan jäähdytyksen lisäksi kuivattaa, ettei suhteellinen kosteus huoneilmassa nousisi liian korkeaksi. Joissakin tapauksissa tuloilmaa voidaan myös kostuttaa, mikäli se on tarpeen. (Sandberg, 2014, 113.) Pientaloissa ja asuin kerrostaloissa, samoin kuin muissakin rakennuksissa kuten kouluissa, päiväkodeissa, asuntoloissa, ravintoloissa ja myymälöissä on käytetty enimmäkseen ilmanvaihtojärjestelmiä. Nykyäänkin pien- ja kerrostaloihin asennetaan yleisimmin ilmanvaihtojärjestelmä, mutta muihin rakennuksiin tavallisen ratkaisu on ilmastointijärjestelmä. (Sandberg, 2014, 125.)

2.2.1 Ilmanvaihtojärjestelmät

Periaatteeltaan jaoteltuna ilmanvaihtojärjestelmät ovat painovoimainen ilmanvaihtojärjestelmä, koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä sekä koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä. Pientaloissa painovoimainen ilmanvaihtojärjestelmä oli käytetyin menetelmä 1970-luvulle asti. 1960-luvun puolivälin paikkeilla koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä alkoi yleistyä, ja menetelmää asennettiin 2000-luvun taitteeseen, joskin suosituimmillaan se oli 1970-luvulla. Energian hinnan noustessa öljykriisin takia 1970-luvulla pientalojen energiankulutukseen alettiin kiinnittää enemmän huomiota, tämän seurauksena tulivat poistoilman lämmöntalteenottolaitteet ja myös tuloilma koneellistettiin, jotta sen lämmittäminen olisi mahdollista. Koneellinen poisto- ja tuloilmanvaihtojärjestelmällä on ollut sen

kehityskaaren aikana useampia sovelluksia mutta edelleen se on yleisimmin käytetty ilmanvaihtojärjestelmä. Kerrostalojen yleisimmät ilmanvaihtojärjestelmät ovat muuttuneet pääosin samalla kaa-
valla pientalojen ilmanvaihtojärjestelmien kanssa, mutta kerrostaloissa tulo- ja poistoilmanvaihtojär-
jestelmä yleistyi vasta 1990-luvulla. Lisäksi samoihin aikoihin alettiin käyttää hajautettua järjestel-
mää, jossa kussakin huoneistossa on oma ilmanvaihtokoneensa. (Sandberg, 2014, 113–128.)

Painovoimaisessa ilmavaihtojärjestelmässä ilman liike syntyy ulko- ja sisäilman tiheyseroista. Läm-
min poistoilma on kevyempää kuin ulkoa tuleva korvausilma. Huoneiston poistoilma ohjataan
yleensä niin sanotuista likaisista tiloista, eli wc-tiloista, kylpyhuoneista, keittiöstä sekä saunasta pois-
toilmareittejä pitkin vesikatolle. Korvausilma johdetaan tiloihin epätiivin rakennuksen vaipan läpi
korvausilmareittejä, kuten erilaisia venttiilejä pitkin. Korvausilmaventtiilit ovat yleensä varustettu jon-
kinlaisella suodattimella, mutta suurin osa ulkoilman epäpuhtauksista kulkeutuu sellaisenaan sisäti-
loihin. Tuulisella säällä korvausilma tulee yleensä tuulen puolelta. Ilmanvaihto perustuu ilmapuotojen
lisäksi makuu- ja olohuoneiden ikkunatuuletukseen. Pientaloissa korvausilma voidaan johtaa raken-
nukseen myös alapohjan kautta. Painovoimainen ilmanvaihtojärjestelmä toimii korkeissa rakennuk-
sissa paremmin, kuin matalissa ja näin ollen kerrostaloissa ilmanvaihto voi olla talvella suurista sisä-
ja ulkoilman lämpötilaoloista johtuen hyvinkin voimakas. (Sandberg, 2014, 114–121.)

Koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä yleensä keittiö, sauna, WC ja vaatehuoneet varuste-
taan poistoilmaventtiilillä. Poistoilma johdetaan vesikatolla sijaitsevalle huippuimurille. Huippuimurin
avulla rakennukseen luodaan alipaine, jonka seurauksena korvausilma epäpuhtauksineen tulee pai-
novoimaisen ilmanvaihtojärjestelmän tapaan rakennuksen epätiivin vaipan läpi. Joissain tapauksissa
rakennuksiin on asennettu tuloilmaventtiileitä keittiöön sekä makuu- ja olohuoneeseen ilmanvaihdon
helpottamiseksi. Tuloilmaventtiilien asennus on ollut tarpeellista varsinkin rakennuksissa, joita on
ilmanvaihtojärjestelmän asennuksen jälkeen tiivistetty tai lisä-lämpöeristetty. Huoneistojen sisällä
ilmanvaihto eri tiloissa saadaan aikaan oviraoilla, joiden kautta ilma ohjautuu poistoilmaventtiilillä
varustettuihin huoneisiin. Kerros- ja pientaloissa koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän toteutus
on muuten yhtenevä, mutta kerrostaloissa poistoilma ohjataan taloyhtiön yhteiseen keskusilman-
vaihtolaitokseen. (Sandberg, 2014, 115–122.)

Koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmässä taas nimensä mukaan myös tuloilma on ko-
neellistettu. Järjestelmässä käytetään hyväksi poistoilmasta lämmönvaihtimen avulla talteen otettua
energiaa tuloilman lämmittämiseksi. Pelkkään poistoilmanvaihtojärjestelmään verrattuna tuloilman
koneellistaminen mahdollistaa myös esimerkiksi pienhiukkasten suodattamisen tuloilmasta, sekä
ulko- ja sisäilman painesuhteiden paremman hallinnan. Asuinkerrostaloissa koneellinen tulo- ja pois-
toilmanvaihtojärjestelmä voidaan toteuttaa joko keskitetysti tai hajautetusti. Keskitetyssä järjestel-
mässä ei ole huoneistokohtaista ilmapirran säätöä, toisin kuin hajautetussa järjestelmässä.
(Sandberg, 2014, 118–123.)

Suurin osa muista rakennuksista, kuten kouluista, päiväkodeista, vanhustentaloista ja asuntoloista,
kaupoista, ravintoloista ja varastoista sekä urheilu- ja teollisuushalleista on toteutettu ilmanvaihto-

järjestelmillä. Nykyisin osaan näistä rakennuksista asennetaan ilmastointijärjestelmä, mutta edelleenkin myös tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmät ovat käyttökelpoinen vaihtoehto. Joissakin ilmanvaihtojärjestelmällä toteutetuissa kohteissa, kuten opetustiloissa, ravintoloissa ja kaupoissa voi olla kuitenkin tarpeen säädellä ilmavirtaa. Sääto on tila-, vyöhyke tai rakennusosakohtainen. Ilmavirran ohjaaminen tapahtuu esimerkiksi läsnäolon, hiilidioksidipitoisuuden tai lämpötilan perusteella. Monissa rakennuksissa lisäksi varaudutaan jäähdytystarpeen lisäykseen asentamalla tuloilmakoneisiin mahdollisuus jäähdytyspatterin lisäämiseen. (Sandberg, 2014, 25–28.)

2.2.2 Ilmastointijärjestelmät

Ilmastointijärjestelmällä tarkoitetaan ensisijaisesti sisäilman lämpötilan ja kosteuden hallintaan käytettäviä laitteistoja. Ilmastoinnin vaikutus sisäilman lämpötilaan ja ilman kosteuteen täytyy huomioida kokonaisuutena ilmanvaihtojärjestelmän kanssa; lämpötila ja ilman kosteus vaikuttavat esimerkiksi mikrobien kasvumahdollisuuksiin, sekä pienhiukkasten käyttäytymiseen sisäilmassa. Ilmastointi voidaan toteuttaa sisätiloissa esimerkiksi erillisellä huonekohtaisella ilmaa jäähdyttävällä laitteella, ilmalämpöpumppuun sisältyvän, tai ilmanvaihtojärjestelmään integroidun ilman jäähdytystoiminnon avulla. Ilmastointijärjestelmien luokittelu perustuu siihen, miten jäähdytysteho tuodaan huoneeseen. Järjestelmät voidaan jakaa neljään eri ryhmään, joita ovat: ilmajärjestelmät, ilma-vesijärjestelmät, vesijärjestelmät ja hajautetut järjestelmät. (Sandberg, 2014, 129.)

Ilmajärjestelmässä ilmastointi on tyypillisesti integroitu ilmanvaihdon yhteyteen, ja joskus samalla ilmavirralla hoidetaan myös lämmitys. Ilmavirran mitoituksen määrää yleensä jäähdytystehon tarve. Ilmanvaihdon kannalta mitoitusilmavirta on tarpeettoman suuri, mikä asettaa järjestelmän säätämiselle omat haasteensa optimaalisen ilmanvaihdon näkökulmasta. Ilma-vesijärjestelmässä taas jäähdytys- ja lämmitysteho tuodaan huoneeseen sekä ilman että lämmityspattereissa virtaaman veden mukana ilmavirran määräytyessä pääasiassa ilmanvaihdon tarpeen mukaan. Huonekohtaista lämpötilaa säädetään vesivirtaa säätelemällä. Huoneilman kosteuden tiivistyminen huonelaitteiden jäähdytyspattereihin estetään kuivaamalla tuloilma. Vesijärjestelmässä, joka on ilmanvaihto-osasta erillään oleva järjestelmä, jäähdytys- ja lämmitysteho tuodaan huoneeseen ainoastaan veden avulla. Ilmanvaihtojärjestelmän tuloilman lämpötila voi poiketa huoneilman lämpötilasta, koska tuloilmaa ei erikseen jäähdytetä. Näin ollen huoneilman kondensoituminen jäähdytyspattereihin on mahdollista. (Sandberg, 2014, 130.)

Hajautettua järjestelmää käytetään tiloissa, joita ei haluta käyttötarkoituksensa tai poikkeuksellisen jäähdytystarpeensa vuoksi liittää osaksi keskitettyä ilmastointijärjestelmää. Tällaisia tiloja ovat esimerkiksi ATK-laitehuoneet, muuntamot, sähköpääkeskukset ja lämmönjakohuoneet. (Sandberg, 2014, 130.)

3 SISÄILMAN EPÄPUHTAUDET

Sisäilman laatuun vaikuttavat monet eri kemialliset, biologiset ja fysikaaliset tekijät. Tavallisesti epäpuhtaudet havaitaan epämiellyttävinä hajuina ja ilman ”tunkkaisuutena”. Sisäilman epäpuhtaudet voivat myös vaikuttavat haitallisesti ihmisen terveyteen. Erilaiset epäpuhtaudet aiheuttavat erilaisia haittavaikutuksia, mutta yleisimpiä ovat esimerkiksi väsymys, limakalvojen ja silmien ärsytys sekä pääkipu. (Hengityслиitto, 2015.)

3.1 Yleisimmät sisäilman epäpuhtaudet

Sisäilman epäpuhtaudet vaihtelevat kohteen mukaan. Tyypillisesti toimistotyöympäristön sekä asuinrakennusten epäpuhtaudet ovat orgaanisia ja epäorgaanisia kaasuja, erilaisia hiukkasia sekä mikrobeja, itiöitä ja viruksia. Orgaaniset kaasut ovat haihtuvia orgaanisia yhdisteitä eli VOC-yhdisteitä (*eng. Volatile organic compounds*). Yleisimmät hiukkaset ja epäorgaaniset kaasumaiset yhdisteet on esitetty taulukossa 2. (Salonen ym., 2011, 15.)

Taulukko 2 Sisäilman yleisimmät hiukkaset ja epäorgaaniset kaasumaiset epäpuhtaudet (Salonen, ym., 2011, 15.)

Hiukkaset	Epäorgaaniset kaasumaiset epäpuhtaudet
<ul style="list-style-type: none"> • Hiilimonoksidi • Hiilidioksidi • Rikkidioksidi • Typpidioksidi • Otsoni • Ammoniakki • Radon 	<ul style="list-style-type: none"> • Huonepöly (sisältäen ihmisten ja eläinten hilseen) • Liikenteen ja energiantuotannon hiukkaspäästöt • Mikrobit ja niiden aineenvaihdunta tuotteet • Kuidut (esim. asbesti ja teolliset mineraalikuidut) • Tupakansavu

3.1.1 Hiukkaset ja teolliset mineraalikuidut

Hiukkaset jaotellaan eri kategorioihin. Kaikkia ilmassa leijuvia hiukkasia kutsutaan yhteisnimellä kokonaisleijuma. Kokonaisleijuman massasta suurin osa on suuria hiukkasia, eli karkeaa pölyä. Karkean pölyn hiukkasten halkaisija on yli 10 µm, alle 10 µm halkaisijaltaan olevia hiukkasia taas kutsutaan hengitettäväksi hiukkasiksi. Hengitettävät hiukkaset jaotellaan edelleen karkeiksi hengitettäväksi hiukkasiksi; halkaisijaltaan 2,5–10 µm, pienhiukkasiksi; 0,1–2,5 µm ja ultrapieniksi- tai nanohiukkasiksi, joiden halkaisija on alle 0,1 µm. Hiukkaset laskeutuvat sitä hitaammin, mitä pienempiä ne ovat. Käytännössä kuitenkin alle 5 µm halkaisijaltaan olevat hiukkaset kulkeutuvat ilmapirran mukana, eivätkä laskeudu pinnoille. (Sandberg, 2014, 59–60; Salonen, ym., 2011, 26.)

Mikäli sisätiloissa tupakoidaan, merkittävin pienhiukkasten lähde on yleensä tupakointi. Muita pienhiukkasten lähteitä sisätiloissa ovat ihminen itse (iho), ihmisen toiminta, kuten ruuanvalmistus, lemmikkieläimet sekä erilaiset materiaalit, kuten tekstiilit, pintaverhouslevyt ja paperitavara. Suurin sisäilman hiukkasten lähde on kuitenkin ulkoilma. Tuotanto- ja teollisuustilojen pienhiukkasten sisälähteet ovat luonnollisestikin kytköksissä käytettäviin raaka-aineisiin ja tuotantomenetelmiin.

(Sandberg, 2014, 60.)

Ilmanvaihtojärjestelmän tuloilman suodatus vaikuttaa ulkoilmasta kulkeutuvien pienhiukkasten määrään. Ulkoilman pitoisuuksien ollessa korkeita, yleensä myös sisäilman pitoisuudet kasvavat. Suurimpia hiukkasten lähteitä ulkoilmassa ovat liikenne, polttoprosessit ja maaperä. Sisäilman hiukaspitoisuus voidaan ilmoittaa massapitoisuutena tai lukumääränä. (Salonen, ym., 2011, 26–29.)

Teolliset mineraalikuidut jaetaan koostumuksensa mukaan kolmeen eri ryhmään (Salonen ym., 2011, 27.):

- 1) lasikuidut (lasivilla ja jatkuvat filamentti(tekstiili)-lasikuidut)
- 2) kivivilla- ja kuonavillakuidut
- 3) keraamiset kuidut.

Teolliset mineraalikuidut ovat amorfisia eli lasimaisia, yksisäikeisiä kuituja, joiden raaka-aineina käytetään lasia, savea, kiveä sekä metallikuonaa. Sisäilmassa yleisimmin esiintyviä mineraalikuituja ovat lasivilla, vuori- eli kivivilla sekä lasikuidut. Mineraalikuiduista käytetään eri nimityksiä MMVF (*eng. man-made vitreous fibre*), MMMF (*eng. man-made mineral fibre*) ja SVF (*eng. synthetic vitreous fibre*). (Salonen, ym., 2011, 27.)

Teollisten mineraalikuitujen (MMVF) käytön myötä 1940-luvulta lähtien merkittävimpiä mineraalikuitujen lähteitä toimisto- ja asuinrakennuksissa ovat äänen- ja lämmöneristeet sekä melun vaimentamiseen käytetyt akustiikkalevyt. Pääasiassa mineraalikuituja vapautuu huoneilmaan asennuksen, korjauksen ja huoltotoimenpiteiden yhteydessä. Materiaalit voivat myös vapauttaa kuituja ajan myötä tapahtuvan kulumisen tai rikkoutumisen seurauksena. Teollisten mineraalikuitujen halkaisija on yleensä yli 5 µm ja pituus kymmen- tai jopa satakertainen. Halkaisijaltaan yli 4 µm kuidut laskeutuvat nopeasti lähelle lähdemateriaalia, koska ne kulkeutuvat ilmapirran mukana huonosti. Tällaisten kuitujen kertymiseen huonepinnoilla vaikuttaa keskeisesti kuitulähteiden esiintyminen ja voimakkuus sekä siivoustiheys. Ilmanvaihdon avulla ilmasta voidaan poistaa merkittävästi vain halkaisijaltaan alle 3 µm kuituja. MMVF-materiaalinen asennuksen jälkeen huolellinen siivous on merkittävin keino vähentää sisäilman kuitupitoisuuksia. (Salonen, ym., 2011, 28.)

3.1.2 Epäorgaaniset kaasumaiset yhdisteet

Hiilimonoksidi eli häkä

Hiilimonoksidi (CO) eli häkä – hiilen ja hapen yhdiste – on hajuton ja mauton kaasu, jota syntyy epätäydellisen palamisen tuloksena esimerkiksi takan tai muun tulisijan käytön yhteydessä. Häkää esiintyy myös mm. polttomoottoreiden pakokaasuissa sekä tupakan savussa. (Sandberg, 2014, 64.)

Hiilidioksidi

Hiilidioksidi (CO₂) – hiilestä ja hapesta koostuva yhdiste – on hiilipitoisten aineiden palamisen ja soluhengityksen sivutuotteena syntyvä kaasu, jota kertyy sisäilmaan pääasiassa ulohengitysilmaasta ja kaikenlaisen palamisen tuloksena, kuten kynttilöistä, kaasuliedestä tai tupakoinnista (Sandberg, 2014, s. 63). Maan ilmakehässä hiilidioksidia esiintyy pieninä pitoisuuksina. Luonnollisen ilmakehässä esiintyvän hiilidioksidin lisäksi ihmisen toiminta aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä. Merkittävin hiilidioksidin lähde on fossiilisten polttoaineiden käyttö. (SYKE, Aalto-yliopisto, YTK, Ilmatieteen laitos, 2016)

Rikkidioksidi

Rikkidioksidi (SO₂) – rikin ja hapen yhdiste – on syövyttävä ja ärsyttävä kaasu, joka on väritöntä sekä pistävän hajuista. (Työterveyslaitos, 2016) Rikkidioksidia vapautuu ilmaan poltettaessa rikki-
toisia polttoaineita teollisuusprosesseissa ja energiantuotannossa. Rikkidioksidi hapettuu ilmassa ja muodostaa ilman kosteuden kanssa rikkihappoa. (Ilmatieteenlaitos, 2016)

Typpidioksidi

Typpioksideja (NO_x) – typen ja hapen yhdiste – syntyy palamisen yhteydessä korkeissa lämpötiloissa, esimerkiksi lämmitykseen tai ruoan valmistukseen käytetyn kaasun polton yhteydessä. Keskeisimmät typpioksidien lähteet ulkoilmassa ovat liikenteen sekä lämmön ja sähkön tuotannon aiheuttamat päästöt. (Sandberg, 2014, 64.)

Otsoni

Otsonimolekyyli muodostuu kolmesta happiatomista (O₃). Yläilmakehän otsoni muodostaa otsonikerroksen, joka suojaa maata auringon ultraviolettisäteilyltä. Alailmakehän otsoni on korkeina pitoisuuksina kasvillisuudelle ja terveydelle haitallista. (Ilmatieteenlaitos, 2016) Otsonin ulkolähteitä ovat sähkön purkaukset ja valokemialliset reaktiot. Otsonia muodostuu kemiallisissa reaktioissa auringonvalon vaikutuksesta saasteiden kulkeutuessa tuulten mukana. Saasteiden pitoisuudet ilmassa ja auringonvalon määrä vaikuttavat ratkaisevasti vallitsevaan otsonipitoisuuteen. Otsonin sisälähteinä on yleisimmin sähköllä toimivat tekniset laitteet, kuten lasertulostimet, kopiokoneet ja sähkösuodattimet. (Työterveyslaitos, 2015)

Ammoniakki

Ammoniakki on voimakkaan, pistävän hajuinen, hyvin ärsyttävä kaasu. Kosteusvaurioiden yhteydessä syntyy yleensä ammoniakkipäästöjä, koska valkuaisaineita sisältävät tasoitteet kostuvat ja ha-
joavat.

(Sandberg, 2014, 66.) Muita sisälähteitä ovat pesu- ja puhdistusaineet, eläinten eritteet, viemäri sekä tupakointi (Sosiaali- ja terveysministeriö, 2003).

Radon

Kaikkialla maaperän kiviaineksessa, erityisesti Suomen graniitissa ja moreenissa, esiintyvän radiumin hajoamistuotteena syntyvä radon on radioaktiivinen jalokaasu. Radonin sisälähteitä ovat rakennusmateriaalit, kiviainekset, porakaivovesi sekä maaperästä sisälle kulkeutuva ilma. Huoneilmaan radonkaasu pääsee kulkeutumaan maaperän halkeamista ja huokosista rakennusten alapohjan kautta. On huomattava, että pelkkä ilmanvaihdon tehostaminen voi jopa nostaa radonin pitoisuutta huoneilmassa. Mikäli poistoilmavirta on tuloilmavirtaan nähden liian suuri, se synnyttää huonetiloihin alipaineen joka tehostaa kaasumaisen radonin kulkeutumista huoneilmaan. (Sandberg, 2014, 64–65.)

3.1.3 VOC-yhdisteet (*eng. volatile organic compounds*)

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet ovat hiiltä sisältäviä yhdisteitä, joilla on huoneen lämpötilassa korkea höyrynpaine. VOC-yhdisteet voidaan jakaa myös haihtuvuutensa mukaan eri ryhmiin. Erittäin haihtuvat orgaaniset yhdisteet (*eng. Very volatile organic compounds, VVOC*), haihtuvat orgaaniset yhdisteet (*eng. Volatile organic compounds, VOC*), puolihaihtuvat orgaaniset yhdisteet (*eng. Semi-volatile organic compounds, SVOC*), hiukkasiin sidotut orgaaniset yhdisteet (*eng. Particulate organic matter, POM*). VVOC yhdisteet ovat kaikkein haihtuvimpia, kun POM yhdisteet puolestaan pysyvät hiukkasiin ja pintoihin sitoutuneina, kunnes niitä kuumennetaan tarpeeksi. (Tuomi, Lappalainen, Laaja, Hovi ja Svinhufvud, 2012) Taulukossa 3 on esitetty kiehumispisteet joiden perusteella yhdisteet jaotellaan.

Taulukko 3 VOC-yhdisteiden jaottelu niiden kiehumispisteiden perusteella (RSLab Oy, 2015)

	Kiehumispiste (°C) alkaen	Kiehumispiste (°C) päättyen
VVOC	<0	50–100
VOC	50–100	240–260
SVOC	240–260	380–400
POM	380–400	>400

VOC-yhdisteiden sulamispiste on normaalia huoneenlämpöä alhaisempi, samoin kuin niiden kiehumispiste. Kun puhutaan VOC-yhdisteistä ilmassa, puhutaan usein TVOC-pitoisuudesta (*eng. Total volatile organic compounds*), jolla tarkoitetaan niiden yhteenlaskettua pitoisuutta. VOC-yhdisteitä ovat esimerkiksi liuottimena käytetyt yhdisteet, kuten aseton, etanoli ja propanoli. VOC-yhdisteisiin kuuluvat myös useimmat polysykliset aromaattiset hiilivedyt (*eng. Polycyclic aromatic hydrocarbons*), jotka ovat yhteen liittyneistä aromaattisista hiilirenkaista muodostuvia yhdisteitä. PAH-yhdisteet ovat usein peräisin orgaanisen aineen epätäydellisestä palamisesta, esimerkiksi ruuanlaitosta. (Työterveyslaitos, 2015.) Näiden lisäksi VOC-yhdisteisiin lasketaan orgaaniset yhdisteet, jotka eivät ole aromaattisia. Näitä ovat alkaanit, alkeenit, alkyynit ja niiden johdannaiset. VOC-yhdisteisiin kuuluu myös kirjo kasvipärisiä hiilivetyjä, kuten terpeenit. (Tuomi ym., 2012; World Health Organization (WHO), 2010.)

Toimistotyöympäristössä yleisimmin tavattavat VOC-yhdisteet ovat aromaattiset hiilivedyt, aldehydit, alkoholit, esterit ja halogenoidut yhdisteet. (Hengitysliitto, 2015.) Yleisimmin yhdisteet ovat peräisin rakennus- ja sisustusmateriaaleista. Vasta rakennetuissa tai remontoituissa rakennuksissa sisäilman VOC-pitoisuudet voivat olla jopa 100-kertaiset vanhempiin rakennuksiin verrattuna. Materiaalien vapauttavat päästöt vähenevät ajan myötä, ja huomattavinta päästöjen pieneneminen on muutamien kuukausien aikana. Päästöjen vapautumisen tasoittuminen vie kuitenkin yleensä noin kaksi vuotta. (Salonen, ym., 2011, 23–24.)

Ilmanvaihdolla on suuri merkitys VOC-yhdisteiden esiintymiseen sisäilmassa. Vaikutus korostuu kylminä vuodenaikoina, jolloin ikkunat ja ovet pidetään yleensä suljettuina. Ilmanvaihtoa tehostamalla korvausilman määrää saadaan lisättyä, jolloin VOC-yhdisteiden pitoisuus sisäilmassa laskee. (Salonen, ym., 2011, 24.)

Laajasti teollisuudessa liima- sekä pintakäsittelyaineiden valmistukseen käytettyä formaldehydiä käytetään yleisesti myös laminaattien, päällysteiden, tekstiilien ja lakkojen valmistuksessa. Formaldehydipitoisuudet sisäilmassa ovat sidoksissa lämpötilaan ja kosteuteen, jotka vaikuttavat keskeisesti materiaalien formaldehydipäästöihin. (Sandberg, 2014, 65.)

3.1.4 Mikrobit

Sisäilmassa esiintyy erilaisia mikrobeja, kuten sieni-itiöitä ja bakteereja. Sieni-itiöt ovat yleensä peräisin ulkoilmasta, ja bakteerit ihmisestä. Mikäli rakennuksessa on kosteusvaurio sisäilmassa voi esiintyä sienisukuja ja -ryhmiä sekä bakteerilajeja, joita ei sisäilmasta yleensä löydy, mutta myös sisäilmassa yleisesti esiintyvien sienien ja bakteerien määrä voi kasvaa. Joissakin tapauksissa sisäilman mikrobi tasot voivat olla tavanomaista luokkaa, vaikka rakennuksessa olisi silminnähtävä mikrobivaurio. Tällaisia tapauksia selittää osaltaan sieni-itiöiden vapautuminen tilan sisäilmaan vain tietyssä kasvuvaiheessa tai olosuhteissa, sekä mikrobien epätasainen levittyminen ilmassa. Koska suurin osa bakteereista on peräisin ihmisestä itsestään, kohonneet sisäilman bakteeritasot kertovan yleensä riittämättömästä ilmanvaihdosta tai liian suuresta ihmismäärästä tilassa. (Salonen, ym., 2011, 18–21.)

Taulukossa 4 esitetään ulkoilman, sisäilman ja kosteusvaurioisen rakennuksen yleisimmät sienisuvut ja -ryhmät. Ulko- ja sisäilman sienilajit ovat osittain samoja, koska kosteusvauriottomassa rakennuksessa suurin osa sieni-itiöistä on peräisin ulkoilmasta. Sisäilman mikrobipitoisuuteen vaikuttaa vuodenaika ja rakennuksen ilmanvaihtotyyppi sekä sijainti. Kesällä ja syksyllä, kun ulkoilman sieni-itiöpitoisuudet ovat korkeimmillaan, myös sisäilman pitoisuudet voivat kasvaa, kun taas talvella lumen peittäessä maan pitoisuudet ovat pienempiä. Rakennuksen ilmanvaihtotyyppillä on mikrobien määrään merkitystä siinä suhteessa, että koneellisen tuloilmanvaihdon yhteydessä tuloilma suodatetaan, jolloin mikrobit eivät pääse kulkeutuman ulkoa sisäilmaan. Sijainnin vaikutus näkyy siinä, että maaseudulla sieni-itiöpitoisuudet ovat suurempia, kuin kaupunkialueella. (Salonen, ym., 2011, 18–21.)

Taulukko 4 Ulkoilmassa, sisäilmassa ja kosteusvaurioituneen rakennuksen sisäilmassa yleisimmin tavattavat sienisuvut ja -ryhmät (Salonen, ym., 2011)

Ulkoilma	Sisäilma	Kosteusvaurioitunut rakennus
<ul style="list-style-type: none"> • Aspergillus • Alternaria • Basidiomykeetit • Cladosporium • Hiivat • Penicillium • Steriilirihmasto 	<ul style="list-style-type: none"> • Aspergillus (tiettyt lajit) • Cladosporium • Hiivat • Penicillium 	<ul style="list-style-type: none"> • Aktinobakteerit (suurimaksi osaksi streptomykeettejä) • Aspergillus fumigatus • Aspergillus versicolor • Chaetomium • Fusarium • Phialophora • Stachybotrys • Trichoderma

3.2 Epäpuhtauksien lähteet

3.2.1 Ulkoilma

Ulkoa tuleva ilmanvaihdon korvausilma tuo tullessaan monia epäpuhtauksia, tosin niiden pitoisuudet voivat muuttua; toisten määrä vähenee huomattavasti, kun taas toisten pitoisuus voi kasvaa. Ulkoilmasta peräisin olevat epäpuhtaudet ovat suurimmilta osin ihmisen toiminnan aiheuttamia, mutta myös maaperä vapauttaa epäpuhtauksia. Ulkoilman päästölähteitä ovat liikenne, teollisuus, energiantuotanto, puun pienpoltto ja jätteenkäsittely, osa päästöistä voi kulkeutua ilmapurtojen mukana kaukaakin, joten myös kaukokulkeumat voivat vaikuttaa ratkaisevasti ilmanlaatuun (Hengitysliitto, 2015). Ulkoilmasta kulkeutuu sisäilmaan myös kasvien siitepölyä sekä erilaisia itiöitä.

(Työterveyslaitos, 2015.) Ulkoilman päästöjen määrään vaikuttavat siis vuoden- ja vuorokaudenaika, viikonpäivä ja sijainti. Sijainnissa vaikuttavia tekijöitä ovat liikenneväylien läheisyys, paikkakunta ja korkeus maanpinnasta. (Siikanen, 2014, 208.)

Liikenne on huomattava tekijä ilmanlaadun kannalta varsinkin kaupunkien keskustoissa ja taajama-alueilla. Kaupunkien keskustoissa ilman epäpuhtauksista jopa 90 % voi olla peräisin liikenteestä. (Säteri ym., 2008, 208.) Päästöjen määrä riippuu sijainnin ohella myös vuoden- ja vuorokaudenajasta. Pahimmillaan liikenteen päästöt ovat arkipäivinä ruuhka-aikaan, kun taas yöllä ja sunnuntaisin liikennettä on paljon vähemmän. Liikenteestä vapautuu monia kaasumaisia sekä hiukkasmaisia epäpuhtauksia, kuten hiilidioksidia, hiilimonoksidia, erilaisia hiilivetyjä, PAH- ja VOC-yhdisteitä sekä metalliyhdisteitä (Terveysten ja hyvinvoinnin laitos, 2016). Merkittävimpiä hengitysilman kannalta kuitenkin ovat pienhiukkaset ja typen oksidit. Lisäksi hiilivetyjen ja typenoksidien reagoitessa keskenään muodostuu otsonia. Keväisin tilannetta huonontaa vielä teiltä hengitysilmaan kohoava katu-pöly, joka on suurimmaksi osaksi jauhautunutta hiekoituksessa käytettyä hiekkaa sekä asfalttia. Katupöly sisältää kaiken kokoisia hiukkasia, karkeista pienhiukkasiin. (Hengitysliitto, 2015)

Teollisuuden ja energiantuotannon päästöt vaihtelevat alueittain. Eri teollisuudenaloille ja tehtaille on asetettu omat päästöraajansa. Teollisuuden päästöt aiheutuvat osaltaan teollisuudessa tarvittavan energian tuotannosta. Energian tuotannon päästöihin taas vaikuttaa tuotantomenetelmä. Lisäksi teollisuudessa ja energiantuotannossa päästöjä aiheuttavat myös raaka-aineen tai polttoaineen, ja teollisuudessa valmiiden tuotteiden kuljetus. Tarvittaessa teollisuus- ja energialaitosten päästöjä voi tiedustella suoraan laitoksesta, tai kunnan ympäristöviranomaiselta. Energiantuotannon ja teollisuuden yleisimpiä päästöjä ovat hiukkaset, rikkidioksidi ja typenoksidit. Lisäksi teollisuuden prosesseissa ilmaan vapautuu esimerkiksi hiilivetyjä, sekä rikkiyhdisteitä. (Hengitysliitto, 2015)

Energiantuotantoon sisältyvä puun pienpoltto on nykyisin Suomessa suurin yksittäinen pienhiukkasten päästölähde. Vuonna 2014 puun poltolla tuotettiin 23 % asutuksen vaatimasta energiankulutuksesta. (Tilastokeskus, 2015) Puun käyttö on yleistynyt 1980-luvulta lähtien, ja yleisimmin sitä käytetään omakoti- ja paritalojen lämmitykseen, joko ensisijaisena lämmitysmuotona, tai lisälämmityskieronona. Puun käytön lisääntymistä voidaan selittää polttoaineiden hinnan nousulla, joka on kääntynyt laskuun vasta viime vuosien aikana. (Tilastokeskus, 2015) Toinen puunkäyttöä lisäävä tekijä ovat ympäristönäkökulma, ja siihen liittyvä väärin ymmärrys. Puu on hiilineutraali polttoaine, joka ei lisää hiilidioksidipäästöjä toisin kuin fossiiliset polttoaineet, tosin tätä puun poltto on vain parhaimmillaan, ja oikein toteutettuna. Lisäksi kiinnitettäessä huomiota polttoaineen hiilipäästöihin, puun polton muut haitat on sivuutettu. (Itä-Suomen Yliopisto, 2016) Suurimmillaan pienpoltosta aiheutuvat päästöt ovat talvisin tiheään rakennetuilla pientaloalueilla. Pienhiukkasten lisäksi puun pienpoltto vapauttaa ilmaan hiilimonoksidia, PAH- ja VOC-yhdisteitä sekä mustahiiltä (Terveystieteiden tutkimuskeskus, 2016).

3.2.2 Rakennusperäiset ja rakennuksen sisäiset päästölähteet

Rakennusperäisiä päästölähteitä ovat rakennus- ja sisustusmateriaalit sekä ilmanvaihtolaitteet (Siikanen, 2014). Rakennus- ja sisustusmateriaaleista päästölähteitä ovat esimerkiksi katot, seinät, lattiat, huonekalut ja tekstiilit sekä erilaiset tiivisteet, maalit, liimat ja tasoitteet (Sandberg, 2014, 99). Päästöt voivat johtua materiaaleista itsestään sekä niiden vanhenemisesta ja kulumisesta, mutta myös kosteus nopeuttaa joidenkin materiaalien rapautumista sekä vapautumista huoneilmaan, ja emissioiden syntymistä. Toisaalta taas liian kuiva ilma haurastuttaa rakennus ja sisustusmateriaaleja, ja edistää näin pölyn muodostumista. (Siikanen, 2014, 207.)

Ilmanvaihtolaitteista peräisin olevat epäpuhtaudet taas ovat yleisesti joko rakennustuotteiden sisältämiä, rakentamisen ja asennuksen aikana kertyviä tai käytön aikana kertyviä epäpuhtauksia. Varustoinnin ja työmaavaiheen aikana ilmanvaihtojärjestelmään pääsevä pöly ja lika olivat ongelma varsinkin vielä 1990-luvulla. Nykyisin tilanne on kohentunut, ja asennettaessa sekä varastoidessa ilmanvaihtojärjestelmien osia, voidaan työltä edellyttää Sisäilmastoluokituksessa määriteltyjä periaatteita, kuten ilmanvaihtokanavan osien ja keskeneräisen asennuksen riittävää suojausta. (Holopainen, Pasanen, Railio, Säteri ja Virranta, 2008, 23–26; Säteri ym., 2008, ss. 29–30.)

Ihmisen toiminnalla on suuri vaikutus sisäilman epäpuhtauksien määrään. Monet arkipäiväiset toiminnot aiheuttavat tilaan epäpuhtauksia ja varsinkin VOC-yhdisteitä. Tällaisia toimintoja ovat kosmetiikan käyttö, siivoaminen, ruoanlaitto ja tupakointi. Lisäksi eri kemikaalien ja toimistolaitteiden, kuten tietokoneiden, tulostimien ja kopiokoneiden käyttö vapauttaa ilmaan epäpuhtauksia. (Salonen, ym., 2011, 24.) Ihmiset ja lemmikit ovat myös itsessään yksi sisäilman päästölähde. Ihmisistä ja lemmikeistä ilmaan vapautuu hiukkasia, mikrobeja ja kaasumaisia epäpuhtauksia. Ihmisestä vapautuvien epäpuhtauksien määrä on kuitenkin yleensä niin pieni, ettei siitä ole terveydelle haittaa. (Siikanen, 2014, 210.) Lemmikkieläinten hilse tai lemmikeistä johtuvat voimakkaat hajut taas voivat aiheuttaa vakavia allergiaoireita tai laukaista astma-kohtauksen. (Allergia- ja astmaliitto, 2016)

Kosteusvaurio syntyy kun rakenteisiin tai materiaaleihin pääsee tavallisesta poikkeavaa kosteutta. Mikäli kosteusvaurio ei pääse kuivumaan, ja muut olosuhteet, kuten lämpötila ovat otolliset mikrobikasvustolle, syntyy homevaurio. Homevaurio on yleensä rakenteissa tai materiaaleissa oleva mikrobi-, sieni- tai bakteerikasvusto. (Salonen, ym., 2014)

LIITE 1 yleisimmät VOC-yhdisteiden päästölähteet, on taulukoitu tarkemmin yksittäisten VOC-yhdisteiden yleisimpiä päästölähteitä.

3.3 Terveysvaikutukset

3.3.1 Hiukkaset ja teolliset mineraalikuidut

Hiukkasten koko ja koostumus vaikuttavat niiden terveyshaittoihin. Yleensä mitä pienempiä hiukkasia, sitä vaarallisempia ne ovat terveydelle. Pienet hiukkaset pääsevät kulkeutumaan hengityselimissä paremmin ja lopulta syvemmälle keuhkoihin. Pienhiukkasten on todettu edistävän hengityselinoireilua, keuhkosyöpää sekä sydän- ja verisuonisairauksia. (Salonen, ym., 2011, 36.)

Teolliset mineraalikuidut poistuvat elimistöstä altistuksen lakattua. Kuidut eivät siis yleensä aiheuta pitkäaikaista terveydellistä haittaa. Yleisimpiä altistusoireita ovat silmien ja ihon ärsytys sekä hengitystie oireet. Kuidut saattavat aiheuttaa kohonneen riskin ylähengitysteiden tulehduksille. Teollisten mineraalikuitujen koko ja pitoisuudet vaikuttavat oireiden esiintymiseen. Henkitorveen asti kulkeutuvat kuidut ovat kooltaan 3–5 µm, ja alle 3 µm kuidut voivat kulkeutua jo syvälle keuhkoihin. Kuitenkin eniten ärsytystä aiheuttavat kuidut ovat kooltaan 5 µm ja sitä suurempia, kun taas alle 1 µm kuitujen ei ole todettu aiheuttavan ärsytysoireita. (Salonen, ym., 2011, 37.)

3.3.2 Epäorgaaniset kaasumaiset yhdisteet

Hiilimonoksidi eli häkä

Hiilimonoksidin hengittäminen aiheuttaa hapenpuutteen elimistössä, koska veren hemoglobiini sitoo

hapensijasta itseensä hiilimonoksidia. Hapenpuutteet seurauksena ilmenee pahoinvointia, oksentelua, sekä pääkipua ja hämäränäön heikkenemistä. Pahimmillaan häämyrkytyksestä seuraa tiedottomuus ja jopa kuolema. (Sandberg, 2014, 64.)

Hiilidioksidi

Hiilidioksidi ei sellaisenaan reagoi ihmisen elimistön kanssa. Sisäilman korkeat hiilidioksidi pitoisuudet voivat kuitenkin aiheuttaa päänsärkyä, heikentää keskittymiskykyä ja aiheuttaa levottomuutta. Hiilidioksidin määrää ilmassa voidaan käyttää kuvaamaan ilman laatua ja ilmanvaihdon toimivuutta. (Sandberg, 2014, 63.)

Rikkidioksidi

Rikkidioksidi lisää hengitystieinfektioiden riskiä niin lapsilla, kuin aikuisillakin. Sisäilman korkeat pitoisuudet ärsyttävät ylähengitysteitä ja suuria keuhkoputkia. Astmaa sairastavat henkilöt ovat erityisen herkkiä rikkidioksidin vaikutuksille, ja pakkanen voimistaa oireita. Rikkidioksidille altistumisen äkillisiä oireita ovat hengenahdistus ja yskä sekä keuhkoputkien supistuminen. (Hengityслиitto, 2015)

Typpidioksidi

Jo pieninä pitoisuuksina typpioksidia aiheuttaa hengitysteiden pintasoluissa muutoksia ja näin hengitysvastus kasvaa. Typpioksidille altistuminen näkyy esimerkiksi hengitystieinfektioiden pitkittymisenä ja niiden määrän lisääntymisenä. Typpioksidi käyttäytyy hiilimonoksidin tavoin joutuessaan kosketuksiin veren hemoglobiinin kanssa. (Sandberg, 2014, 64.)

Otsoni

Hengitysteihin vaikuttavista kaasuista otsoni on kemiallisesti herkimmin reagoiva. Tästä syystä otsonin terveysvaikutukset eivät ole suoraviivaisia, vaan otsoni voi reagoiessaan muiden sisäilman epäpuhtauksien kanssa muodostaa haitallisia reaktiotuotteita, kuten hiukkasia tai yhdisteitä. (Sandberg, 2014, 64.) Otsonin aiheuttamia terveysvaikutuksia ovat limakalvojen ärsytys sekä silmäoireet. Terveysvaikutukset ilmenevät usein infektioherkkyyden lisääntymisenä. Hengityssairailta ihmisillä oireet ovat erityisen voimakkaita, ja otsoni saattaa voimistaa siitepölyallergisen oireita. (Hengityслиitto, 2015)

Ammoniakki

Ammoniakki aiheuttaa limakalvojen ärsytysoireita. (Hengityслиitto, 2015)

Radon

Radon on lyhytikäinen ja muodostaa hajotessaan muun muassa alfasäteilyä, joka on gammasäteilyä 20 kertaa haitallisempaa. Radonin hajotessa keuhkoissa, voi alfasäteily vaurioittaa keuhkoja ja aiheuttaa keuhkosityöpää. (Sandberg, 2014, 64–65.) Radonperäisiä keuhkosityöpätapauksia arvellaan olevan noin 300 vuosittain (Hengityслиitto, 2015).

3.3.3 VOC-yhdisteet

Herkkyys VOC-yhdisteille on hyvin yksilöllistä, ja oireiden ilmeneminen vaihtelee suuresti eri henkilöiden välillä. Yleensä sisäilman VOC-pitoisuudet eivät aiheuta oireita, ellei tilassa ole jotakin yksittäistä voimakasta lähdettä, kuten esimerkiksi viallista lattiamateriaalia. VOC-yhdisteiden aiheuttamat haitat ovat yleensä ensisijaisesti hajuhaittoja, mutta myös hengitysteiden ärsytysoireita. Haitallisuus riippuu tilassa esiintyvistä yhdisteistä ja niiden pitoisuuksista. VOC-yhdisteistä yksi terveydelle haitallisimpia on formaldehydi. Kansainvälinen syöväntutkimuslaitos IARC (International Agency for Research on Cancer) on vuonna 2004 luokitellut formaldehydin ihmiselle karsinogeeniseksi, eli syöpää aiheuttavaksi yhdisteeksi. (Salonen, ym., 2011)

3.3.4 Mikrobit

Kosteus- ja mikrobivaurioiset rakennukset voivat aiheuttaa rakennusten käyttäjille monia eri oireita ja sairauksia. Yleisiä oireita ovat hengitystieoireet kuten kohonnut yskän, keuhkoputkentulehduksen ja astman riski, erilaiset allergia-, iho- ja silmäoireet. Mikrobeille altistuminen voi laukaista myös kroonisia keuhkosairauksia, mutta ne ovat toimistoympäristössä melko harvinaisia. (Salonen, ym., 2011, 32-33.)

Kaikkia mikrobien terveysvaikutuksia ja erilaisia oireiden, sekä sairauden aiheuttajien mekanismeja ei vielä tunneta. Kuitenkin kosteusongelmaisten rakennusten, mikrobivaurioiden ja haitallisten terveysvaikutusten syy-yhteys on melko selkeä, varsinkin kun oireet monesti vähenevät tai lakkaavat altistumisen loputtua. Mikrobien toiminnasta aiheutuvien haihtuvien aineenvaihduntatuotteiden pitoisuudet ovat kosteusvauriorakennuksissakin niin pieniä, etteivät ne yleensä yksin voi toimia oireiden aiheuttajina. Mikrobien haitallisia terveysvaikutuksia aiheuttaakin homevaurio, eli voimakas mikrobikasvu. (Salonen, ym., 2011, 32–33.)

3.4 Ennaltaehkäisy

Sisäilmasto-ongelmien kannalta ennaltaehkäisy on paras tapa ongelmien välttämiseksi. Ennaltaehkäisyä toteutetaan niin rakennuksen suunnittelu-, työmaa- kuin käyttövaiheessakin. Suunniteltaessa rakennusta on otettava huomioon rakennuksen tuleva käyttötarkoitus ja ilmanvaihdon mitoitus, sekä materiaalivalinnat on tehtävä palvelemaan tätä tarkoitusta. Mikäli valmiista rakennuksesta vuokrataan tai ostetaan toimitilaa, on tässäkin tapauksessa tärkeää kartoittaa tilojen käyttötarkoitus sekä yleiskunto, ilmanvaihdon toimivuus, sekä esimerkiksi kosteus- ja homevaurioiden mahdolliset riskitekijät. (Salonen, ym., 2014)

Rakennuksen työmaavaiheessa sisäilmaongelmia voidaan ehkäistä suunnittelemalla ja toteuttamalla rakennustöiden ja ilmanvaihtojärjestelmän puhtaudenhallintaa. Ohjeita ja vaatimuksia puhtaudenhallinnalle on esitetty esimerkiksi Sisäilmastoluokituksessa. Näillä ohjeilla ja vaatimuksilla pyritään

estämään epäpuhtauksien tai hiukkasten pääsy rakennusvaiheessa rakenteisiin tai ilmanvaihtokanavaan, mistä epäpuhtaudet voisivat myöhemmin kulkeutua valmiin rakennuksen sisäilmaan. (Säteri ym., 2008)

Rakennusten tai tilojen käyttövaiheessa sisäilman epäpuhtauksien ehkäisy perustuu rakennuksen tai tilojen suunnittelun mukaiseen ja säännölliseen huoltoon sekä ylläpitoon. Tämä tarkoittaa sitä, että rakennuksia kartoitetaan mahdollisten riskitekijöiden löytämiseksi, ja että mahdolliset riskitekijät, kuten kosteusvaurio pyritään poistamaan mahdollisimman nopeasti niiden ilmentyessä. Tilojen ylläpitoon kuuluu myös perusteellinen ja säännöllisesti toistettava siivous, jolla pienennetään pölyn ja pienhiukkasten ja näiden mukana kulkeutuvien epäpuhtauksien määrää sisäilmassa. (Lahtinen, Lappalainen ja Reijula, 2006)

4 SISÄILMAN PUHDISTIMET

Sisäilman laadusta ja riittävästä ilmanvaihdosta vastaa aina ensisijaisesti ilmanvaihtojärjestelmä. Sisäilman laatua ja viihtyvyyttä voidaan tarvittaessa parantaa erilaisilla siirrettävillä ilmanpuhdistimilla. Ilmasta voidaan poistaa erilaisia hajuja ja pölyä, sekä kaasumaisia yhdisteitä. (Holopainen, Hautamäki, Hämeri, Kukkonen, Kulmala, Kurnitski, Lehtimäki, Lähde, Palonen, Pasanen, Seppänen, Sätri, Taipale ja Vartiainen, 2006)

Huoneilman puhdistimien kapasiteettia tarkkaillessa on otettava huomioon puhdistettavan tilan tilavuus, rakennuksen ilmanvaihdon voimakkuus sekä puhdistettavien partikkeleiden ominaisuudet ja määrä ilmassa. Huoneilman puhdistajan kapasiteetti on oltava sellainen, että se varmistaa merkittävän epäpuhtauksien pitoisuuksien pienenemisen. Virtauksen ja ilmanpuhdistimen kapasiteetin (tehokkuus x virtaus) on oltava merkittävästi suurempi, kuin tilan poisto- tai tuloilman virtaus. Lisäksi puhdistetun ilman virtauksen on oltava selkeästi suurempi, kuin epäpuhtauden luonnollinen poistumisvirtaus, jotta tilan sisäilma ehtii suodattua ja ilmasta poistuu partikkeleita. (Holopainen, Hautamäki ym., 2006)

Huoneilman puhdistimissa käytettävien suodattimien huono puoli on yleensä se, että ne poistavat ilmasta hyvin valikoivasti vain tiettyjä yhdisteitä. Jollekin yhdisteelle suodatusteho voi olla hyvinkin korkea, jopa 100 %, kun taas toisiin se ei tehoa ollenkaan. Hiukkassuodattimissa suodatettavien hiukkasten koko vaikuttaa siihen, kuinka suuri suodatusteho on. Tehokkaimpien ilmanpuhdistimien ongelmana voi myöskin olla melko korkea melutaso. (Holopainen, Hautamäki ym., 2006)

4.1 Käyttökohteet ja käyttötarve

Siirrettäviä puhdistimia voidaan käyttää sisäilman laadun parantamiseen riippumatta siitä, minkälainen ilmanvaihtojärjestelmä rakennuksessa ennestään on. Puhdistimia ei liitetä ilmanvaihtojärjestelmään, vaan ne koostuvat tarvittaessa ilman kierrätysosasta, eli tuulettimista tai puhaltimista sekä suodattimista. Puhdistimia käytetään esimerkiksi asuinhuoneistoissa, toimistoissa ja ravintoloissa. Ilmanpuhdistimien kysyntä nousee sitä mukaa, kun kuluttajat valveutuvat sisäilman laadun merkitykseen terveyden kannalta. Laadultaan hyvä sisäilma edistää ihmisen jaksamista ja tuotteliaisuutta, niin kotona kuin työpaikoillakin. (Holopainen, Hautamäki ym., 2006)

4.2 Yleisimmät sisäilman puhdistimet

Puhdistimet jaotellaan niiden toimintaperiaatteen mukaan elektrostaattisiin puhdistimiin, ionisoiviin puhdistimiin, kemiallisiin ja mekaanisiin suodattimiin, otsonoiviin puhdistimiin sekä UV-säteilytykseen tai fotokatalyyttiseen oksidaatioon perustuviin laitteisiin. Ilmanpuhdistimet voivat olla myös puhdistinjärjestelmiä, joissa on yhdistelty useampaan periaatteeseen perustuvia laitteita. Yleisimmin laitteissa on varsinaisen puhdistimen lisäksi mekaaninen esisuodatus. Lisäksi on olemassa hiilidioksidia

poistavia laitteita, jotka sitovat hiilidioksidin itseensä ja esimerkiksi vapauttavat sen huoneilmaan sellaisina aikoina, kun tilassa ei ole ihmisiä. Hiilidioksidia sitovat laitteet sisältyvät yleensä puhdistusjärjestelmiin, joissa hiilidioksidin sitomisen lisäksi on kemiallinen ja mekaaninen suodatus. (Hengityслиitto, 2015.)

Elektrostaattiset puhdistimet, eli sähkösuodattimet, varaavat ilman epäpuhtaushiukkaset sähköisesti ja näin hiukkaset tarttuvat vastakkaisella varauksella varustettuun suodatinmateriaaliin. Laite suodattaa ilmasta hiukkasia, kuten huone- ja siitepölyä. Puhdistin vaatii toimiakseen rauhallisen ja tasaisen ilmavirran. Sähkösuodatin on yleensä hyvin hoidettuna pitkäikäinen ja toimii tarkoituksenmukaisesti. (Hengityслиitto, 2015.)

Ionisoivissa laitteissa taas negatiivisesti varattujen hiukkasten on tarkoitus laskeutua positiivisesti varautuneille pinnoille, kuten lattialle, huonekaluille ja seiniin. Käytännössä pinnat kuitenkin ovat usein neutraaleja, joten joihinkin malleihin sisältyy hiukkasten kokooja. Ionisointi ei vaikuta ultra-pienten hiukkasten laskeutumiseen. Ionisointia käytetäänkin monesti osana monitoimi-ilmanpuhdistuslaitteita. (Hengityслиitto, 2015.)

Kemiallisilla suodattimilla poistetaan huoneilmasta kaasumaisia epäpuhtauksia, jotka voivat ilmentyä esimerkiksi erilaisina hajuina. Yleisin suodatinmateriaali on aktiivihili. Aktiivihilisuolettimia voidaan käyttää matalien kaasupitoisuuksien poistoon. Suodattimen käyttöikä riippuu ratkaisevasti ilmassa olevien epäpuhtauksien määrästä. Suodattimien käyttöikä on yleensä noin yksi vuosi, ja mikäli ilmassa on paljon epäpuhtauksia, suodatin saattaa menettää suodatustehoaan hyvinkin nopeasti. (Hengityслиitto, 2015.)

Mekaanisissa ilmanpuhdistimissa ilma johdetaan suodattimeen tuulettimien avulla. Laitteissa on esisuodatin joka suodattaa suuremman kokoluokan hiukkaset, ja tämän jälkeen varsinainen suodatin. Mekaanisia suodattimia on erilaisia riippuen siitä, minkä kokoisia hiukkasin tahdotaan suodattaa. Esi-suodattimet ovat puhdistettavia ja ne aika ajoin joko imuroidaan tai pestään vedellä. Esi-suodattimien käyttöikä on siis varsinaisia suodattimia pitempi. Laitteen kaikki suodattimet on vaihdettava laitteen valmistajan antamien aikavälien ja ohjeiden mukaan. Oikein käytettynä ja huollettuna laite on tehokas ilmansuodatin. (Hengityслиitto, 2015.)

Fotokatalyyttiseen oksidaatioon perustavat laitteet tappavat mikrobeja kuten bakteereja, viruksia sekä homeitiöitä ja poistavat ilmasta VOC-yhdisteitä hajottamalla niitä. Jotkin laitteista toimivat luonnonvalolla ja osa UV-lampulla. Fotokatalyyttiseen oksidaatioon perustuvat laitteet ovat osaltaan kiistanalaisia, koska hajotettaessa yhdisteitä niistä saattaa muodostua terveydelle haitallisia välituotteita. (Hengityслиitto, 2015.)

UV-säteilyyn perustuvat puhdistimet muuttavat mikrobien DNA:ta niin, etteivät mikrobit voi enää kasvaa tai lisääntyä. UV-säteilyyn perustuvissa ilmanpuhdistimissa on aina myös suodatin, joka kerää hiukkaset ja mikrobit huoneilmasta. Säteilytyksen tehoon voi vaikuttaa ilman kosteus ja jotkut ilman sisältämät epäpuhtaudet sekä mikrobien säteilyn sietokyky. (Hengityслиitto, 2015.)

5 BIOLOGISET PUHDISTIMET

Tällä hetkellä käytetyimpien biologisten puhdistimien päätyypit ovat biosuodattimet (*eng. biofilters*), biovalutussuodattimet (*eng. biotrickling filters*) ja biopesurit (*eng. bioscrubbers*). Toimintaperiaate on samankaltainen kaikissa menetelmissä, mutta eroavaisuuksia löytyy mikro-organismien käytössä, mikrobien kasvatusalustan, eli rakennemateriaalin (*eng. biofilter bed*), tyypissä sekä puhdistettavan ilman epäpuhtauksien pitoisuuksissa. Muita biologisia puhdistimia ovat esimerkiksi kasvipuhdistimet (*eng. botanical purifiers*) ja kalvoreaktorit (*eng. membrane reactors*). Biologisia puhdistimia käytetään laajasti pääosin teollisuuden ja yhdyskuntajätteen ilmansaastepäästöjen ja hajuhaittojen pienentämiseen.

5.1 Biosuodattimet, biovalutussuodattimet ja biopesurit

Käytetyimpien menetelmien; bio- sekä biovalutussuodattimien ja biopesurin toimintaperiaatteet on esitelty tarkemmin kappaleissa 5.1.1 Biosuodatin, 5.1.2 Biovalutussuodatin ja 5.1.3 Biopesuri, mutta näille kaikille yhteisiä tekijöitä ovat seuraavaksi esiteltävät tekijät: hapen saatavuus, ravinteet, pH, kosteuspitoisuus ja mikro-organismit. (Mudliar, Giri, Padoley, Satpute, Dixit, Bhatt, Pandey, Juwarkar ja Vaidya, 2010.)

HAPEN SAATAVUUS

Hapen saatavuus vaikuttaa voimakkaasti biosuodattimen toimintaan. Perus periaatteena on, että biosuodatusprosesseissa koetetaan välttää anaerobisia oloja. Anaerobisissa olosuhteissa muodostuu yhdisteitä, jotka saattavat olla haitallisia tai haisevia, ja siksi tätä tulisi välttää. Joissakin tutkimuksissa kuitenkin on todettu että satunnaiset anaerobiset mikroympäristöt saattavat edesauttaa orgaanisten epäpuhtauksien hajottamista. (Mudliar ym., 2010.)

RAVINTEET

Biosuodattimeen johdetut epäpuhtaudet muodostavat merkittävän hiilen ja energian lähteen mikrobeille. Mikrobien käyttämä vety ja happi taas ovat peräisin ilmasta, kasvatusliuoksesta sekä VOC-yhdisteistä. Muut ravinteet kuten typpi, fosfori, kalium ja rikki sekä hivenaineet kuten metallit ja vitamiinit ovat osittain peräisin suodattimen rakennemateriaalista. Ravintoaineiden tasainen saanti on materiaalista riippumatta tärkein edellytys yhdisteiden mikrobien toiminnalle ja näin ollen epäpuhtauksien biologiselle hajottamiselle. Mikrobien toimintaan ja kasvamiseen tarvittavat ravinteet voidaan lisätä suodattimeen joko kiinteässä tai neste muodossa. Koska mikrobien käyttäytymiseen vaikuttavien ravinteiden kirjo on niin suuri, ravinneliuosten koostumuksen optimointi on haastava tutkimusalue. (Mudliar ym., 2010.)

pH

Kuten monissa muissakin biologisissa prosesseissa, myös biosuodatuksessa pH:lla on suuri vaikutus prosessin toimintaan. Suurin osa biosuodatuksessa käytettävistä mikro-organismeista vaati toimiakseen neutraalin ympäristön, ja mikäli pH ei ole mikrobien toiminnan kannalta optimaalisella alueella,

mikrobien aktiivisuus heikkenee voimakkaasti. VOC-yhdisteet jotka sisältävät rikkiä, happea tai typpeä hajoavat happamiksi yhdisteiksi. Nämä happamat reaktiotuotteet laskevat pH:ta, vaikuttaen näin mikrobien toimintaan ja aiheuttaen korroosiota suodattimen laitteistossa. (Mudliar ym., 2010.)

Maa- ja kompostiaines sekä puuhake toimivat luonnostaan pH puskureina, kun taas turpeet taas ovat alun perin happamia eivätkä puskuroi pH:n vaihtelua. Joissakin tapauksissa neutraalin pH:n ylläpitämiseksi suodatinmateriaaliin voidaan lisätä puskurointiaineita, kuten kalsiumkarbonaattia ja dolomiittia. pH:ta voidaan säätää myös lisäämällä puskurointiaineita ravinneliuokseen. Tällaisia puskurointiaineita ovat esimerkiksi kalsiumhydroksidi, natriumhydroksidi ja natriumvetykarbonaatti. (Mudliar ym., 2010.)

KOSTEUSPITOISUUS

Biosuodattimen kosteuspitoisuus on kriittinen tekijä suodattimen tehokkuuden kannalta, koska mikro-organismit tarvitsevat vettä normaalin aineenvaihduntansa ylläpitämiseksi. Kosteusolosuhteiden heikkeneminen johtaa suodattimen kuivumiseen, suodatinmateriaalin halkeiluun sekä edelleen puhdistusprosessin sivuuttamiseen. Kuivuus aiheuttaa merkittävää biohajotustoiminnan heikkenemistä. Liiallinen kosteus taas vaikeuttaa hapen ja hydrofobisten epäpuhtauksien kulkeutumista biofilmiin, joka johtaa anaerobisten alueiden muodostumiseen suodattimen sisälle. (Mudliar ym., 2010.) Suodattimen optimaalinen kosteuspitoisuus vaihtelee suodattimen rakennemateriaalista riippuen, optimaalinen kosteusprosentti on noin 40–60 massaprosenttia. Kosteutta ylläpidetään suodattimeen johdettavan kaasun esikosteutuksella sekä yleensä myös suodatinmateriaalin kastelulla. (Schlegelmilch, Streese ja Stegmann, 2005.)

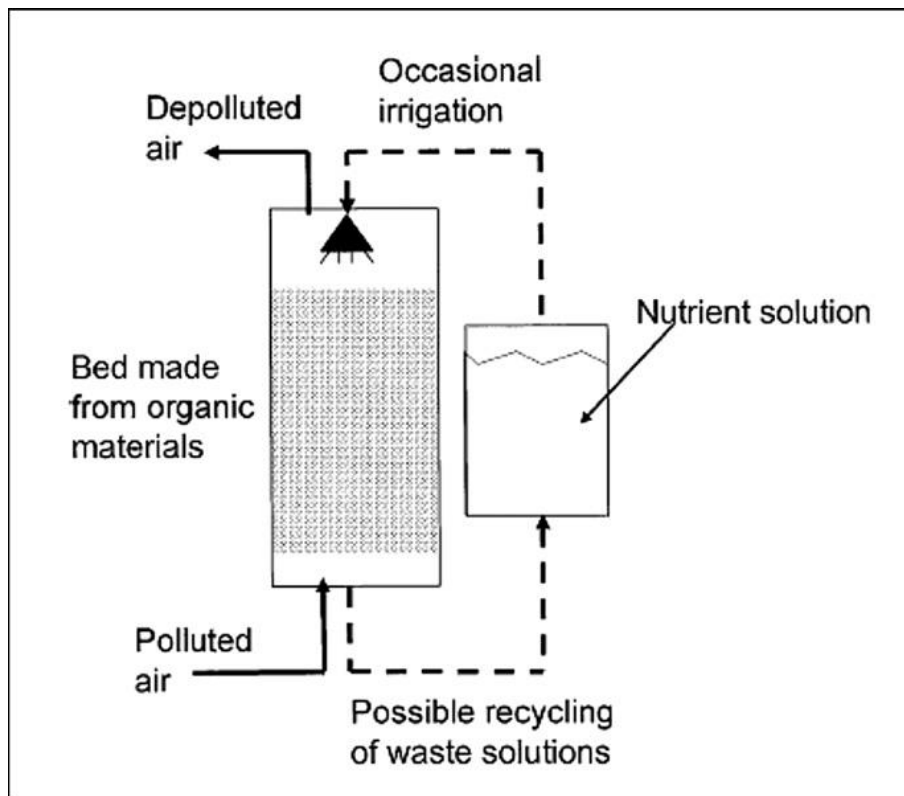
MIKRO-ORGANISMIT

VOC-yhdisteitä hajottavissa suodattimissa kasvaa yleensä heterotrofisia, eli toisenvaraisia mikro-organismeja. Tämä tarkoittaa organismeja, jotka eivät itse pysty tuottamaan tarvitsemaansa ravintoa vaan joutuvat hankkimaan sen muualla tavalla. Biosuodattimessa tällaiset organismit ovat useimmin bakteereja ja sieniä. Tarve lisätä mikro-organismeja suodattimeen riippuu suodatinmateriaalista ja hajotettavien yhdisteiden biohajoavuudesta. Yleisesti suositetaan käytettävän rakennemateriaalissa valmiiksi esiintyviä ekosysteemejä. Sopeutumisjakson jälkeen pieneliöstökanta muodostuu mikro-organismeista, joilla on paras sopeutumis- ja vastustuskyky niille haitallisille epäpuhtauksille. (Mudliar ym., 2010)

5.1.1 Biosuodatin

Biosuodattimia käytetään tyypillisesti käsiteltäessä suuria ilmamassoja, joissa on pieni pitoisuus epäpuhtauksia. Tällaisia epäpuhtauksia ovat VOC-yhdisteet sekä voimakkaan hajuiset kaasut, esimerkiksi ammoniakki, vetysulfaatti ja disulfidi. Biosuodattimessa puhdistettava ilmavirta johdetaan huokoisen rakennemateriaalin läpi, ja ilman epäpuhtaudet siirtyvät rakennemateriaalissa elävän mikrobikannan saataville. Tämän mahdollistaa epäpuhtauksien kulkeutuminen kaasufaasista nestefaa-

siin rakennemateriaalin kosteuden ansiosta. Biosuodattimen puhdistusprosessi voidaan jakaa vaiheisiin; ensin epäpuhtaudet siirtyvät kaasufaasista nestefaasiin, seuraavaksi neste imeytyy rakennemateriaalin ja biofilmiin ja lopulta mikrobikanta hajottaa epäpuhtaudet. Kuvassa 1 on nähtävissä biosuodattimen teoreettinen rakenne.



Kuva 1 Biosuodattimen periaatekuva (Mudliar ym., 2010.)

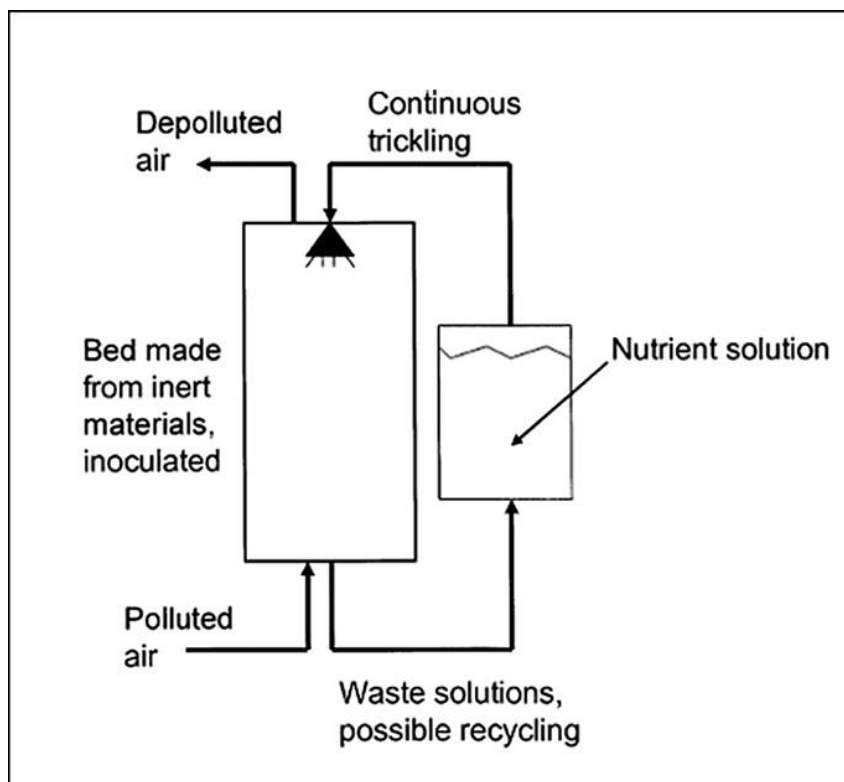
Biofilmillä tarkoitetaan organismien muodostamaa massaa rakennemateriaalin pinnoilla. Biofilmissä mikrobit kataboloivat epäpuhtauksia. Biofilmin paksuuteen vaikuttavat monet eri tekijät, kuten epäpuhtauksien ominaisuudet, massavirta biosuodattimen läpi, alustana käytettävä materiaali sekä puhdistuslaitteiston rakenne. Biofilmin paksuus vaihtelee kymmenistä mikrometreistä jopa yhteen senttimetriin, mutta yleisin biofilmin paksuus on noin yksi millimetri. Biofilmin aktiivisuus kasvaa filmin paksuuden myötä, kunnes saavutetaan niin kutsuttu "aktiivinen paksuus". Kun aktiivinen paksuus on saavutettu, rajoittavaksi tekijäksi muodostuu ravinteiden imeytyminen biofilmiin. (Schlegelmilch, Streese ja Stegmann, 2005; Mudliar ym., 2010.)

Rakennemateriaali muodostaa biosuodattimen rungon, koska se tarjoaa mikrobeille kasvualustan. Rakennemateriaalin tärkeimmät ominaisuudet ovat suuri pinta-ala massayksikköä kohti, huokoisuus, vedenpidätyskyky, luontaisten ravinteiden saatavuus sekä materiaalin rikas ja monimuotoinen luontainen pieneliökasvusto. Materiaalin suuri pinta-ala massayksikköä kohden takaa biofilmin suuren pinta-alan, huokoisuus edesauttaa kaasujen tasaista leviämistä materiaalissa, vedenpidätyskyky estää materiaalia kuivumasta, ravinteiden saatavuus edesauttaa mikrobien kasvua ja monimuotoinen pieneliökasvusto auttaa systeemiä sopeutumaan muutoksiin. (Schlegelmilch, Streese ja Stegmann, 2005.)

Rakennemateriaaleina käytetään yleisimmin turvetta, maa-ainesta, kompostia tai puuhaketta koska ne ovat kustannustehokkaita ja vastaavat parhaiten materiaaleille asetettuja vaatimuksia. Maa-ainoksen suuri etu on rikas ja monimuotoinen pieneliökasvusto. Maa-ainoksen heikkouksia ovat sen ravinnepöyhyy, pieni pinta-ala massayksikköä kohden sekä paineen vaihtelut materiaalin sisällä. Turve sisältää suuria määriä orgaanista aihetta, sillä on hyvä läpäisevyys sekä vedenpidätyskyky sekä suuri pinta-ala massayksikköä kohden, mutta turpeessa ei luonnostaan ole kivennäisravinteita eikä tiheää pieneliökantaa. Kompostimateriaalit ovat yleisimmin käytetty materiaali, koska ne sisältävät tiheän ja monipuolisen pieneliöstökannan, niillä on hyvä ilmanläpäisevyys sekä vedenpidätyskyky ja ne sisältävät paljon ravinteita. Lisäksi kompostimateriaalin käyttö biosuodattimissa mahdollistaa orgaanisen jätteen kierrätyksen. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi metsätalouden jätteet sekä aktiiviliete jätevesien puhdistuslaitoksilta. Kompostimateriaalit ovat epävakaampia kuin turve tai maa-aines ja ne tiivistyvät aiheuttaen paine-eroja materiaalin sisälle. Rakennemateriaalin tiivistymisen estämiseksi suositellaan yleisesti materiaaleja, jotka tarjoavat suodattimelle hyvän ja vankan rakenteen, ovat helppohoitoisia ja jotka estävät filtringin tukkeutumista. Nämä seikat lisäävät suodattimen käyttöikä. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi puuhake, vulkaaninen tuhka, vermikuliitti sekä muut savimineraalit, lasihelmet, polyuretaanivaahdo, polystyreeni sekä laavakivi. (Mudliar ym., 2010.)

5.1.2 Biovalutussuodatin

Biovalutussuodattimessa puhdistettava ilma ohjataan rakennemateriaalin läpi, jota kastellaan jatkuvasti biologisten organismien vaatimia ravinteita sisältävällä liuoksella. Puhdistettavan kaasun virtaussuunnalla suodattimen läpi ei ole todettu olevan vaikutusta puhdistimen suodatuskykyyn. Mikroorganismit kasvavat rakennemateriaalin pinnalla biofilminä. Aluksi ilman epäpuhtaudet liukenevat biofilmiä ympäröivään kosteuteen, jonka jälkeen yhdisteiden hajoaminen tapahtuu biofilmissä. Kuvassa 2 on nähtävissä biovalutussuodattimen rakenteellinen periaate. (Montebello, ym., 2012)



Kuva 2 Biovalutussuodattimen periaatekuva (Mudliar ym., 2010.)

Suodattimessa käytettävän rakennemateriaalin tulee mahdollistaa kaasun ja nesteiden virtaus suodattimen läpi, edesauttaa mikroflooran kehitystä, eikä materiaali ei saa tiivistyä tai sortua käytön aikana. Parhaiten vaatimuksia vastaavat materiaalit ovat elottomia materiaaleja kuten hartsi, keraamiset materiaalit, seliitti ja polyuretaani. Koska materiaalit eivät valmiiksi sisällä pieneliöstökasvustoa, se on erikseen lisättävä. Pieneliöstökannan istutukseen käytetään yleisimmin aktiivilietettä. (Mudliar ym., 2010; Montebello, Fernández, Almenglo, Ramírez, Cantero, Baeza ja Gabriel, 2012.)

Biovalutussuodattimet toimivat tehokkaammin vesiliukoisiin kuin hydrofobisiin yhdisteisiin, mikä johtuu jatkuvasta valuv veden syötöstä suodattimeen. Biovalutussuodatin kuitenkin poistaa puhdistettavasta ilmastä myös veteen niukasti liukenevia yhdisteitä, ja niukkaliukoisten yhdisteiden poisto on tehokkaampaa kuin biosuodattimissa. Biovalutussuodattimella pystytään puhdistamaan ilmvirtaa jonka VOC-pitoisuus on enimmillään 0,5 g/m³. (Mudliar ym., 2010.)

Koska mikro-organismit ja epäpuhtaudet ovat kontaktissa toisiinsa VOC-yhdisteiden liuettua vesifasiin, veden virtaama ja kiertonopeus suodattimessa ovat sen toiminnan kannalta tärkeitä tekijöitä. Tutkimusten pohjalta voidaan arvella, että nesteen virtausnopeuden lisääminen, lisää myös kaasumaisten epäpuhtauksien siirtymistä neste- ja kaasufaasien välillä. Tämä taas nopeuttaa yhdisteiden biohajoamista. Tutkimuksissa on myös osoitettu, että valuv veden ja ravinteiden pitäminen minimissään takaa suodattimelle hyvän puhdistuskapasiteetin. Tarvittava valuv veden ja ravinteiden määrä täytyy kuitenkin selvittää tapauskohtaisesti. (Mudliar ym., 2010.)

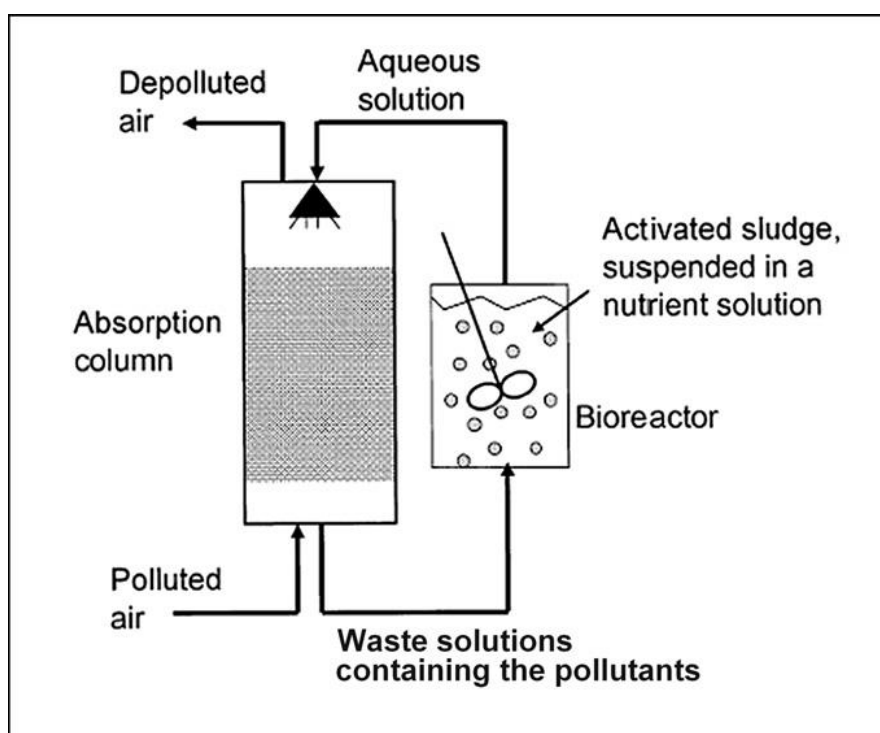
Biovalutussuodattimien heikkoutena on suodatinmateriaalin tukkeutuminen ylimääräisen biomassan muodostumisen takia. Tutkimuksissa on osoitettu, että biofilmin paksuus voi olla useita millimetrejä

ja tämä voi aiheuttaa suodattimen tukkeutumista, kaasun ja nesteen epätasaista virtausta rakenne- materiaalin läpi, anaerobisia alueita sekä lopulta puhdistustehon laskua. Tukkeutumisen estämiseksi on kehitetty kemiallisia, mekaanisia ja biologisia menetelmiä. Tehokkaimmaksi menetelmäksi on valikoitunut suodattimen vastavirta pesu vedellä. Tämä aiheuttaa vähiten haittaa suodattimen ekosysteemeille ja suodattimen toiminnalle. (Mudliar ym., 2010.)

Biovalutussuodatinta voidaan käyttää laajasti eri VOC- yhdisteiden sekä hajua aiheuttavien yhdisteiden poistoon. Biovalutussuodattimella poistettavien yhdisteiden kirjo on laajempi kuin biosuodattimien, joissa rakennemateriaalina käytetään komposti- tai maa-ainesmateriaaleja. Biosuodattimien kyky poistaa klooraamattomia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä on heikompi. Tämä johtuu siitä, että biovalutussuodattimen olosuhteita voidaan kontrolloida paremmin, ja myrkylliset, hajoamattoman yhdisteet voidaan poistaa suodatinsysteemistä. Lisäksi laboratorio-olosuhteissa biovalutussuodattimet tarjoavat mahdollisuuden käyttää puhdasviljeltyjä, eli vain tiettyjä pieneliöitä sisältäviä mikro-organismeja. (Mudliar ym., 2010.)

5.1.3 Biopesuri

Biopesurit koostuvat kahdesta yksiköstä; absorptio yksiköstä sekä bioreaktoriyksiköstä. Absorptioyksikössä kaasumaiset epäpuhtaudet siirtyvät nestefaasiin. Kaasu ja nestefaasit johdetaan vastakkaisiin suuntiin yksikön sisällä, joka voi sisältää jotakin rakennemateriaalia. Rakennemateriaalin tehtävänä on lisätä neste- ja kaasufaasin rajapinta-alaa, joka puolestaan lisää VOC-yhdisteiden siirtymistä nestefaasiin. Puhdistettu ilma vapautetaan laitteen yläosasta kun taas epäpuhtauksia sisältävä neste pumpataan bioreaktoriin. Kuvassa 3 esitetään biopesurin toimintaperiaate. (Schlegelmilch, Streese ja Stegmann, 2005.)



Kuva 3 Biopesurin periaatekuva (Mudliar ym., 2010.)

Reaktorin sisältämässä liuoksessa on valikoitu, tarkoituksenmukainen pieneliöstö sekä pieneliöstön hyvinvoinnille tarpeelliset ravinteet. Suurimmassa osassa reaktoreita käytetään ympäristön vedenpuhdistuslaitoksilta saatavaa aktiivilietettä. Joissakin tapauksissa bioreaktoreihin istutetaan pieneliöstökanta, joka hajottaa vain tiettyjä yhdisteitä. Biopesurien reaktoreiden viipymä aika on noin 20–40 vuorokautta, eli käytännössä bioreaktorit siis toimivat aktiivilietereaktoreina. (Mudliar ym., 2010.)

Biopesureista on olemassa monia erilaisia variaatioita. Pesureiden toiminnalliset erot liittyvät absorptioyksikön läpi virtaavaan luokseen tai pesurilla puhdistettavien yhdisteisiin. Esimerkiksi absorptioyksikön läpi virtaavaan liuokseen voidaan lisätä jotakin orgaanista liuotinta, jolloin voidaan tehokkaammin poistaa pesurin läpi virtaavasta kaasusta myös hydrofobisia yhdisteitä. (Mudliar ym., 2010.)

5.1.4 Viherseinät ja kasvipuhdistimet

Viherseinien toteutuksessa on hyvin erilaisia ratkaisuja. Seinät voivat olla joko tilan rakenteisiin kiinnitettyjä tai irrallisia moduuleja. Viherseinien ilmanpuhdistusteho perustuu kasvien toimintaan tai kasvien avulla ylläpidettävän mikrobikannan biotransformaatioon. Mikäli ilmanpuhdistusprosessia ei ole mitenkään tehostettu, kasvit tuottavat ilmaan happea, sitovat ilmasta pölyä, ja käyttävät ilman hiilidioksidia. Joillakin kasvilajikkeilla voi myös olla ilmaa puhdistavia vaikutuksia, mutta pääsääntöisesti kasvit itsessään eivät poista kuin murto-osan ilman epäpuhtauksista. Viherseinät kuitenkin kosteuttavat ilmaa, toimivat akustisina äänenvaimentimina ja sisustuselementteinä. (Green Fortune, 2016.)



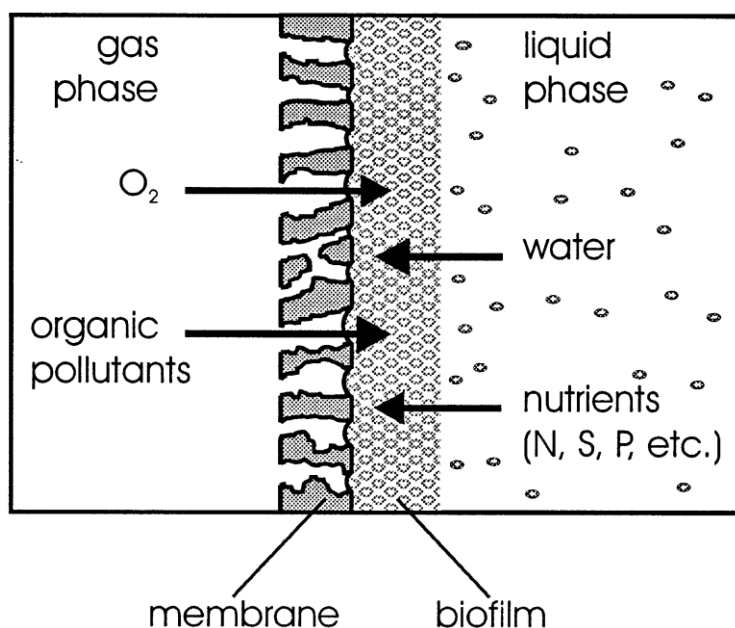
Kuva 4 Naturventionin ensimmäinen aktiivi viherseinämalli (Naturvention Oy, 2016.)

Kuvassa 4 on Naturventionin ensimmäinen viherseinä malli. Naturventionin aktiiviviherseinässä ilmanpuhdistusteho perustuu biotransformaatioon. Kasvien tehokkain osa ilmanpuhdistuksessa on kasvien juuristo. Juuriston ylläpitämä mikrobikanta hajottaa ilman epäpuhtauksia muuttaen ne terveydelle vaarattomaan muotoon. Juuriston mikrobien hyödyntäminen edellyttää, että kasvit kasvavat ilmaa hyvin läpäisevässä materiaalissa. Aktiiviviherseinässä kasvit kasvavat ilma- ja vesiviljelyn yhdistelmällä ja kasvatusalustana toimii epäorgaaninen seos. Sisäilma imetään viherseinään alipaineen avulla kasvien juuriston läpi, ja puhdistettu ilma ohjataan takaisin huonetilaan (Naturvention Oy, 2016.)

5.1.5 Kalvoreaktorit

Kalvoreaktoreita käytetään laajasti jätevesienpuhdistuksessa, mutta kalvoreaktoreiden mahdollisuuksia ilmavirtojen puhdistuksessa on myöskin tutkittu viime vuosikymmeninä. Ilmanpuhdistukseen tarkoitetussa kalvoreaktorissa kaasumaiset epäpuhtaudet kulkeutuvat kalvon lävitse nestefaasiin, jossa kalvon pinnalla sijaitsevan biofilmin mikro-organismit hajottavat epäpuhtauksia. Mikrobit voivat myöskin olla vapaasti suspendoituneina vesifaasissa. Epäpuhtauksien kulkeutuminen kalvon läpi perustuu kaasunestefaasien epäpuhtauksien konsentraatio eroon, joka pyrkii diffuusion vaikutuksesta tasoittumaan. (Reij, Keurentjes ja Hartmans, 1998.)

Kalvomateriaaleja on kahta eri tyyppiä; vettä hylkiviä mikrohuukoisia materiaaleja sekä tiiviitä materiaaleja, kuten silikonikumia. Mikrohuukoinen materiaali omaa yleensä suuren läpäisevyyden, mutta käytettäessä tiiviitä materiaaleja voidaan paremmin vaikuttaa siihen, mitä epäpuhtauksia kalvo läpäisee. (Reij, Keurentjes ja Hartmans, 1998.) Kuvassa 5 on kalvoreaktorin toiminnan periaatekuva.



Kuva 5 Mikrohuukoisesta materiaalista valmistetun kalvoreaktorin periaate (Reij, Keurentjes ja Hartmans, 1998)

6 KOKEELLISEN TYÖN AIHEEN RAJAUS, TAVOITTEET JA LÄHTÖKOHDAT

Opinnäytetyön kokeellisessa työssä oli tarkoituksena selvittää mikro-organismien toimintaan perustuvan ilmanpuhdistuslaitteen puhdistustehoa, sekä sitä, onko puhdistusteho riittävä, jotta laitteen tuotekehittely tulevaisuudessa olisi kannattavaa. Laitteen ilmanpuhdistusteho perustuu samaan prosessiin, eli biotransformaatioon, joka tapahtuu aktiiviviherseinissä. Biotransformaatio tarkoittaa kemiallisten yhdisteiden hajottamista organismien avulla. Aktiiviviherseinissä reaktio tapahtuu imettävässä ilmaa kasvualustana toimivan rakeen läpi, jolloin kasvien juuriston ylläpitämä mikrobikanta pääsee kosketuksiin sisäilman kemiallisten yhdisteiden kanssa.

Työn tavoitteena oli saattaa ilmanpuhdistuslaitteen prototyyppi käyttökuntoon ja optimoida laite vastaamaan mahdollisimman hyvin ominaisuuksia, joita tulevaisuudessa toivottaisiin mahdolliselta valmiilta tuotteelta. Lisäksi laitteella suoritettaisiin mittaukset, joilla voidaan tarkastella ilmanpuhdistuskapasiteettia. Laitteelle asetetut toiveet taas koskevat puhdistettavan ilmamassan määrää. Prototyypin kehittäessä toivotaan että lopullinen tuote olisi puhdistuskapasiteetiltaan parempi kuin nykyiset aktiiviviherseinät. Laitteen toimintaperiaate voisi kenties tulevaisuudessa tarjota ratkaisun huomattavan suurienkin ilmamassojen puhdistamiseen nopeasti ja pienessä tilassa. Kehitellyn tekniikan avulla voitaisiin esimerkiksi puhdistaa omakotitalon tai jopa taloyhtiön tuloilma ennen sen johtamista huoneistoon.

Idea laitteen kehittämisestä oli Naturventionin toimitusjohtajan Niko Järvisen. Laitteen runko on Järvisen suunnittelema, ja runko oli valmiiksi koottu ennen opinnäytetyön alkua. Prototyypissä käytettäviksi suunnitellut laitteet ja osat olivat pääosin samoja, joita käytetään nykyisissäkin tuoteversioissa.

7 LAITTEEN KEHITTÄMISVAIHEET JA OSAT

Ilmanpuhdistuslaitteen prototyypin runko oli suurimmaksi osaksi koottu ennen työn alkua, samoin kuin puhdistuspatruuna, mutta laitteesta puuttuivat tuulettimet, kastelujärjestelmä sekä mahdollisuudet veden pH:n sekä sähkönjohtavuuden mittauksiin. Lisäksi laitteen rakennelevyjen väliset saumat tiivistettiin, samoin laitteen sulkeva etulevy.

7.1 Ilmavirtaus

Osa tekstistä poistettu tilaajan pyynnöstä.

Alkuperäisiä tuulettimia käytettäessä ilmavirtausmittari ei antanut tulo- tai poistoilmalle minkäänlaisia lukemia. Mittauksissa käytettiin Trotec TA 300 kuimalanka anemometriä. Tehokkaammat tuulettimet olivat rakenteeltaan samanlaiset kuin aiemmin käytetyt, joten ne voitiin asentaa samaan kehikoon kuin edelliset.

Tehokkaammilla tuulettimilla tulo- ja poistoilmalle saatiin kuumalanka anemometrilla ilmavirtauksesta lukemat, mutta ne poikkesivat huomattavasti toisistaan. Erojen todettiin johtuvat mittausteknisistä syistä, koska laitteen läpi virtaava ilma ei pääse pakenemaan huomattavissa määrin suunnitellun reitin ulkopuolelle. Mitattaessa ilmavirtaa Kimo LV 120 siipipyörä anemometrillä siten, että tulo- ja poistoilman aukot oli osittain peitetty, ja näin vastasivat siipipyörän halkaisijaa mittaustulokset tulo- ja poistoilman kesken vastasivat toisiaan. Tällöin laitteen läpi kulkeva ilmavirta kävi kokonaisuudessaan ilmi mittaustuloksista.

Ilmavirta ei siltikään ollut toivotun voimakas, jotta laitteella suoritettavat mittaukset antaisivat realistisen vertailupohjan laitteen käytöstä sisäilman puhdistuksessa. Ilman patruunaa laitteen läpi virtaava ilmamäärä oli noin 138 m³/h. Ilmavirran kasvattaminen olisi ollut opinnäytetyön suoritukseen varatun ajan puitteissa, ja ilman laitteen rakenteellisia muutoksia hyvin haastavaa, joten mittaukset päätettiin suorittaa saavutetulla ilmavirralla.

7.2 Kastelujärjestelmä ja veden kierto (vain tilaajan käyttöön)

7.3 Puhdistuspatruuna (vain tilaajan käyttöön)

8 LAITTEEN TESTAUKSEN KOEJÄRJESTELYT

Laitteen testaus tapahtui kolmessa eri osassa. Ensimmäisenä koepäivä 11.11.2015 testattiin laitteen puhdistustehoa, kun patruunassa mikro-organismeja. Toinen testaus suoritettiin parannellulla kasvatusalustalla kahden viikon kuluttua ensimmäisestä koepäivästä, 26.11.2015. Ennen ensimmäistä ja toista koepäivää laitteen annettiin olla häiritsemättä käynnissä kaksi viikkoa. Kolmas mittausta oli niin sanottu vertailumittaus, jossa selvitettiin kuinka paljon ilman VOC-yhdisteistä pelkkä vesi poistaa. Vertailumittauksista varten laite purettiin, pestiin ja desinfioitiin perusteellisesti laitteen sisältämien mikro-organismien poistamiseksi. Mittaukset suoritettiin Naturvention Oy:n Jyväskylän toimipaikan tuotantohallissa.

8.1 Mittauksissa käytetyt laitteet

Alustavasti tulo- ja poistoilman VOC-määrien eroja mitattiin Niko Järvisen kokoamalla mittarilla. Mittarissa on neljä sensoria jotka mittaavat ilmasta eri VOC-yhdisteryhmien pitoisuuksia. Mittarin sensorit ovat Grove merkkisiä ja nimeltään Gas Sensor(MQ2), Gas Sensor(MQ3) HCHO Sensor ja Air quality sensor v1.3. Sensorit MQ2 ja MQ3 ovat esimerkiksi kaasuvuotojen etsintään käyttökelpoisia sensoreita, joiden havainnoimia yhdisteitä ovat mm. hiilimonoksidi, alkoholit, metaani ja nestekaasu. Lisäksi MQ2 havainnoi propaanin, butaanin, palokaasut ja vedyn, kun taas MQ3 heksaanin ja bentseenin. Mittareiden välillä on eroja myös mainittujen yhdisteiden minimipitoisuuksissa. HCHO sensori ilmentää nimensä mukaisesti formaldehydiä, ja ilmanlaatu sensori v1.3 havainnoi yleisimpiä sisäilman sisältämiä haitallisia yhdisteitä kuten hiilimonoksidia, alkoholia, asetonia sekä formaldehydiä. (Seedstudio, 2016.) Mittari kytketään tietokoneeseen ja se antaa mittaustulokset kahden sekunnin välein. Mittarilla ei kuitenkaan voida määrittää yhdisteiden varsinaisia pitoisuuksia, vaan mittari kertoo ainoastaan suhteellisen luvun mittarin herkkyysasetuksista riippuen. Näin voitiin esimerkiksi alustavasti selvittää muuttuuko sisäilman VOC-yhdisteiden määrä laitteen läpi kulkiessaan vertailemalla tulo- ja poistoilman suhteellisia arvoja keskenään.

Mittauspäivinä laitteen läpi kulkevan ilman VOC-määriä mitattiin RSLabilta vuokratulla ppbRAE 3000 TVOC-reaaliaikamittarilla. PpbRAE 3000 analysaattorin toiminta perustuu fotoionisaatiodetektorin (*eng. Photoionization Detector, PID*) toimintaan. Fotoionisaatiodetektorissa analysoitava kaasu altistetaan korkeaan energialle ultraviolettisäteilylle, joka ionisoi osan kaasun molekyyleistä. Koska ultraviolettisäteilyn taajuus on suurempi kuin näkyvän valon, ja siten sen aallonpituus lyhempi, on sillä enemmän energiaa, ja se on myös ionisoivaa toisin kuin esimerkiksi näkyvä valo ja infrapunasäteily. Molekyylien ionisoituessa detektorissa ne muodostavat positiivisesti ja negatiivisesti varautuneita hiukkasia eli ioneja, jotka muodostavat jännite-eron UV-säteilyn lähteen lähellä olevien elektrodien välille. Jännite-ero on riippuvainen ionisoituvien yhdisteiden pitoisuudesta analysoitavassa kaasussa, ja niinpä signaalin voimakkuudesta voidaan laskea analysoitavien yhdisteiden pitoisuus. Koska laite havainnoi vain jännite-erossa tapahtuvia muutoksia, ei se voi tunnistaa mistä yhdisteestä ionit ovat peräisin vaan laite mittaa VOC yhdisteiden kokonaispitoisuutta. (Honeywell, 2016; International Sensor Technology, 2016, 73–81.)

Lopulliset mittaukset suoritettiin aktiivi VOC-näytteenottoina Tenax adsorptioputkinäytteillä. Aktiivisessa VOC-näytteenotossa käytetään ATD-keräintä (*eng. Automatic thermal desorption*), jonka sisällä on Tenax-adsorbenttia (poly(2,6-difenyylip-fenyleenioksidi)). Keräimestä puhuttaessa viitataan siihen myös Tenax-putkena. Tenax-putki on noin 10–13 cm pitkä metallinen molemmista päistä auki oleva putki jonka lävitse voidaan pumpata ilmaa, josta näyte halutaan kerätä. (RSLab Oy, 2015)

ATD-keräimen toiminta perustuu adsorbentin kykyyn sitoa itseensä putken lävitse kulkeman ilman sisältämiä molekyylejä. Keräin pidetään molemmista päistä suljettuna kuljetuksen aikana, sekä silloin kun näytteen otto ei ole aktiivisessa vaiheessa. Näin estetään muista lähteistä kuin halutusta mitauskohteesta peräisin olevien yhdisteiden pääsy keräimeen. Näytteen keräyksen ajaksi keräin liitetään pumppuun, joka imee ilmaa putken lävitse. Näytteenotossa tulee tuntee pumpun luoman tilavuusvirran teho ja näytteenottoaika, jotta voidaan laskea keräimen lävitse kulkeneen ilmamassan tilavuus mitattujen yhdisteiden pitoisuuden määrittämistä varten. Adsorbenttiin keräyksen aikana tarttuneet yhdisteet saadaan siitä irti analyysiä varten kuumentamalla putkea, jolloin kerätyt yhdisteet kaasuuntuvat, ja ne voidaan analysoida esimerkiksi kaasukromatogrammiin yhdistetyllä massaspektrometrillä. (Berezkin ja Grugov, 1991)

8.2 Mittauksissa käytetyt kemikaalit

Mittausten toteuttamista varten laitteen läpi virtaavan ilman VOC-määriä haluttiin nostaa noin 30 % hallissa yleisesti vallitsevaan sisäilman VOC-pitoisuuteen nähden. Ilman VOC-määriä nostettiin asettamalla haihtuvia yhdisteitä sisältäviä astioita laitteen tuloilma-aukon läheisyyteen. VOC-määriä pyrittiin nostamaan yleisillä, kodeistakin löytyvillä kemikaaleilla, kuten maaleilla, liuottimilla, kosmetikalla ja pesuaineilla. Eri kemikaalien aiheuttamia pitoisuuksia seurattiin Groven nelisensorisella mittarilla, joka oli testin ajaksi asennettu laitteeseen.

Mittauksen kannalta paras tilanne saavutettaisiin kemikaaleilla, joiden vapauttamien VOC-yhdisteiden määrä tasoittuu nopeasti aineiden annostelun jälkeen ja pysyy kutakuinkin samansuuruisena näytteenoton ajan. Monet kemikaalit aiheuttivat hyvin suuria piikkejä niitä annostellessa, ja pitoisuudet myös laskivat hyvin nopeasti. Lopulta VOC-yhdisteitä tasaisimmin vapauttaviksi kemikaaleiksi selvisivät muovipesu- ja tiskiaine sekä kalustelakka.

Mittauksia varten määritettiin aika, jonka kuluessa kemikaalien haihtuminen tasaantuu riittävästi, kuitenkin niin että tuloilman VOC-määrä on noin 30 % suurempi, kuin ennen kemikaalien annostelua. Tämä tapahtui kirjaamalla ylös Grove-mittarin eri sensorien lukemat, määrittelemällä niistä keskiarvo ja laskemalla uusi, 30 % suurempi keskiarvo. Tavoitekeskiarvon ollessa tiedossa tuloilma-aukon läheisyyteen annosteltiin kemikaalit ja Grove-mittarin lukemia seuraamalla tarkasteltiin haihtumisen voimakkuuden muutosta. Sensoreiden lukemista laskettiin keskiarvo muutaman minuutin välein ja sitä verrattiin tavoiteltuun keskiarvoon. Noin 40 minuutin jälkeen haihtuminen oli tasoittunut riittävästi, ja tavoitekeskiarvo sekä sensoreiden keskiarvo vastasivat toisiaan.

8.3 Koejärjestely

Osa tekstistä poistettu tilaajan pyynnöstä.

Mittausten aikana, ja tuntia ennen mittausten alkua hallissa, laitteen lähialueella ei käytetty voimakkaita kemikaaleja kuten liuottimia tai maaleja. Ennen mittausten alkua Grove-mittari sijoitettiin laitteeseen ja eri sensoreiden lukemien keskiarvon perusteella laskettiin suuntaa-antava luku, joka vastaa 30 %:n korotusta ilman VOC-määrissä. Laitteen tuloilma aukkoon asetettiin kolme astiaa joista yhdessä oli astianpesuainetta, toisessa muovinpesuainetta ja kolmannessa kalustelakkaa. Kemikaalien haihtumispinta-ala oli kussakin astiassa noin 72 cm²:ä. Näytteiden haihtumisen annettiin tasautua 40 minuutin ajan. Tuloilman VOC-määrä tarkistettiin vertaamalla Grove-sensoreiden keskiarvoa tavoiteltuun keskiarvoon.

Reaaliaikamittarilla tarkistettiin tulo- ja poistoilman kokonais VOC-määrä. Näiden tulosten perusteella RSLab määritteli sopivat näytteen keräysajat erikseen tulo- sekä poistoilmalle Tenax aktiivi adsorptioputkinäytteitä varten. Tuloilmasta kerättiin näytteet 2 ja 5 minuutin ajan ja poistoilmasta 5 ja 10 minuutin ajan. Kaikilla kolmella mittauskerralla käytettiin samoja näytteen keräysaikoja suunnilleen samojen TVOC-määrien takia.

Näytteet kerättiin tulo- ja poistoilmasta aloittaen kahden ja viiden minuutin näytteenottoajan näytteet yhtä aikaa tulo- ja poistoilmasta ja näiden jälkeen aloittaen samalla hetkellä viiden ja 10 minuutin näytteet tulo- ja poistoilmasta.

Vertailunäytettä varten laite ja sen osat puhdistettiin ja desinfioitiin mikro-organismien poistamiseksi.

9 TULOKSET

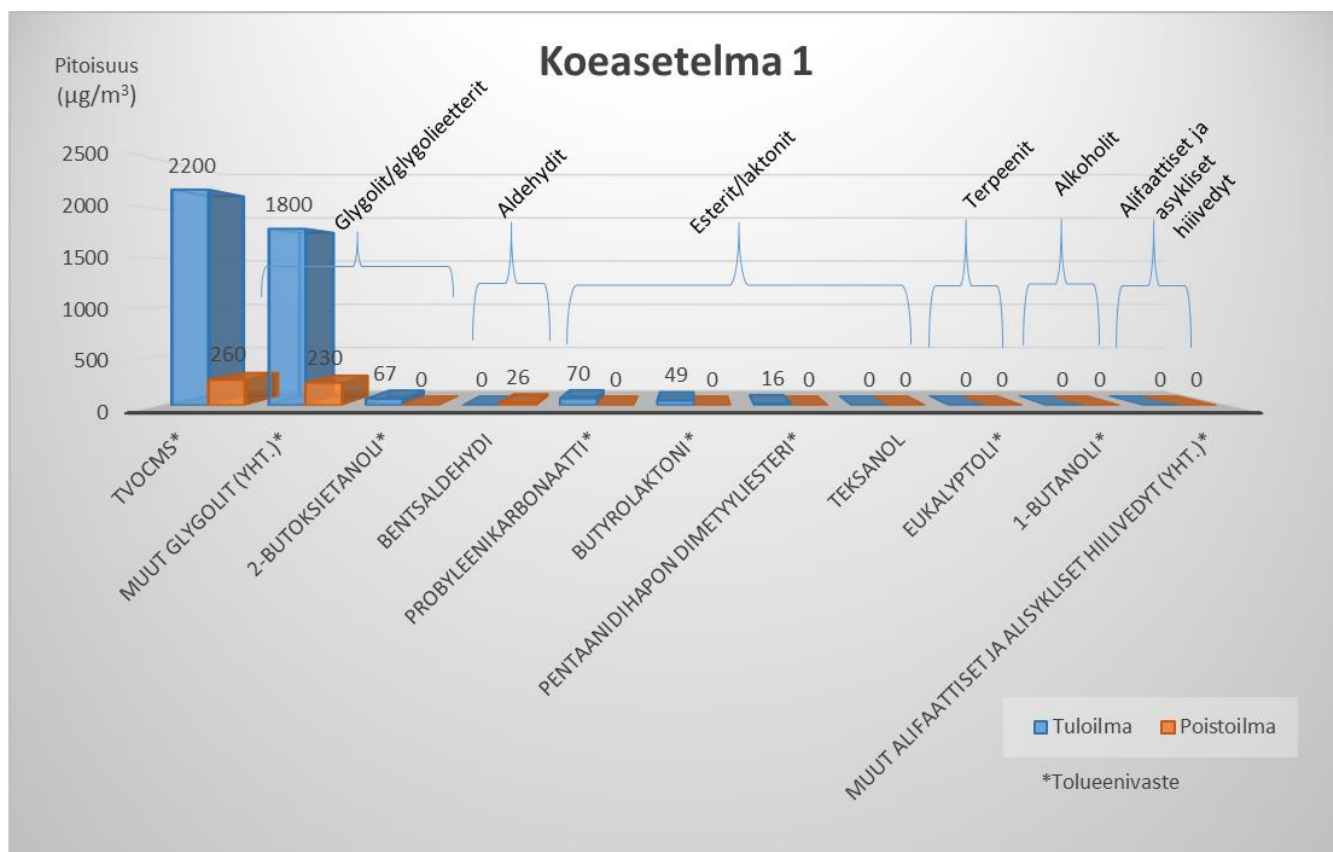
Kuvioissa 1, 2 ja 3 on esitetty vertailtavuuden vuoksi kaikilla kolmella eri näytteenottokerralla esiintyneet VOC-yhdisteet, vaikkei kaikkia yksittäisellä näytteenottokerralla olisikaan näytteestä löytynyt. Kuvioissa TVOC tarkoittaa VOC-yhdisteiden kokonaismäärää näytteessä. Yhdisteistä 2-butaksoetanoli on täysin veteen liukeneva, ja muut glykolit taas veteen melko hyvin liukenevia. Bentsaldehydi ja teksanoli taas ovat hyvin niukkaliukoisia.

9.1 Laitteen puhdistuskapasiteetti mikro-organismien avulla

Ensimmäinen näytteenotto suoritettiin 11.11.2015. Ennen näytteidenottoa mitattu ilmavirta laitteen läpi oli 46 m³/h ja ilmavirran lämpötila 18,4 °C. Veden lämpötila oli 16,4 °C, sähkönjohtavuus 588 µS ja pH 7,07. Näytteenoton aikana vallinneet tulo- ja poistoilman lämpö- ja kosteusolot on esitetty taulukossa 5, ja mittaustulokset kuviossa 1.

Taulukko 5 Tulo- ja poistoilman lämpötila sekä kosteus ensimmäisen näytteenottokerran aikana

Aika	Tuloilman lämpötila °C	Poistoilman lämpötila °C	Tuloilman kosteus %	Poistoilman kosteus %
12:19:12	19.9	18.9	40.2	84.7
12:25:39	20.0	19.0	38.1	84.9
12:32:07	20.1	19.0	43.5	84.7
12:38:34	19.9	19.0	37.6	84.6
12:45:00	20.0	18.9	37.9	84.8
12:51:28	20.0	19.0	41.8	84.5
12:57:55	19.9	19.0	39.1	84.3
13:04:22	19.9	19.0	37.2	84.3
13:10:51	20.1	19.0	39.7	84.1
13:17:18	20.0	19.0	37.2	84.1



Kuvio 1 Koeasetelman 1 mittaustulokset

9.2 Tehostettu kasvatusalusta

Osa tekstistä poistettu tilaajan pyynnöstä.

Näytteenottoa ennen laitteen ilmavirta oli 16 m³/h, ja ilmavirran lämpötila 20,9 °C. Veden lämpötila oli 21,1 °C, sähkönjohtavuus 376 µS ja pH 7,16. Näytteenoton aikana vallinneet tulo- ja poistoilman lämpö- ja kosteus olot on esitetty taulukossa 6.

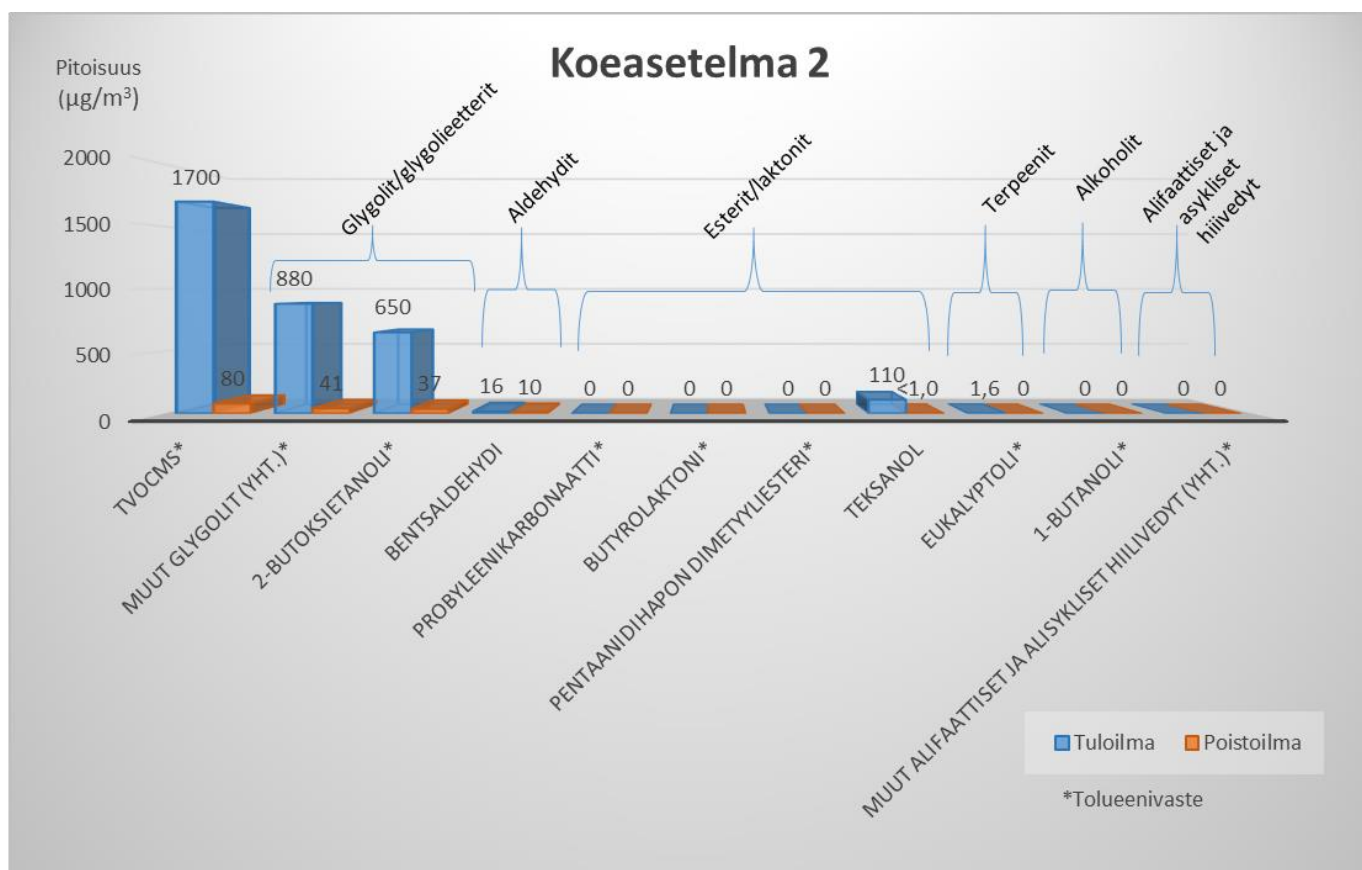
Taulukko 6 Tulo- ja poistoilman lämpötila ja kosteus toisen näytteenottokerran aikana

Aika	Tuloilman lämpötila °C	Poistoilman lämpötila °C	Tuloilman kosteus %	Poistoilman kosteus %
9:48:28	24.7	23.7	38.3	89.90
9:48:28	24.7	23.7	38.3	89.9
9:54:55	24.6	23.9	41.6	89.4
10:01:22	24.8	23.9	38.2	89.3
10:07:50	24.8	23.9	35.6	89.1
10:14:17	24.8	23.9	34.2	89.3
10:20:44	24.9	23.8	35.7	89.4
10:27:14	24.9	23.8	38.2	89.5
10:33:40	24.8	23.8	34.9	89.7
10:40:07	24.6	23.8	36.3	89.8
10:46:34	24.7	23.7	38.1	89.9

Mittauspäivänä 26.11.2015 ilmapinnan heikkous tuli yllätyksenä. Toisen näytteenottopäivän aamuna ilmapirta oli tippunut noin kolmasosaan odotetusta. Laitteen tukkeutumisen ja täytyntynyt olla hyvin nopea ja voimakas, ja sijoittua ajallisesti näytteenottoa edeltävälle vuorokaudelle, päätellen laitteen veden lämpötilasta. Veden lämpötila oli pysytellyt tasaisesti näytteenottoa edeltävinä päivinä 17–18°C, mutta näytteenottopäivän aamuna veden lämpötila oli kohonnut 3,3 astetta edeltävän päivän lukemiin nähden. Veden lämpötilat ovat nähtävissä taulukossa 7, ja mittaustulokset kuviossa 2.

Taulukko 7 Veden lämpötilat näytteenottoviikolla

Päivämäärä	Lämpötila (°C)
20.11.2015	17,8
23.11.2015	17,0
24.11.2015	17,3
25.11.2015	17,8
26.11.2015	21,1



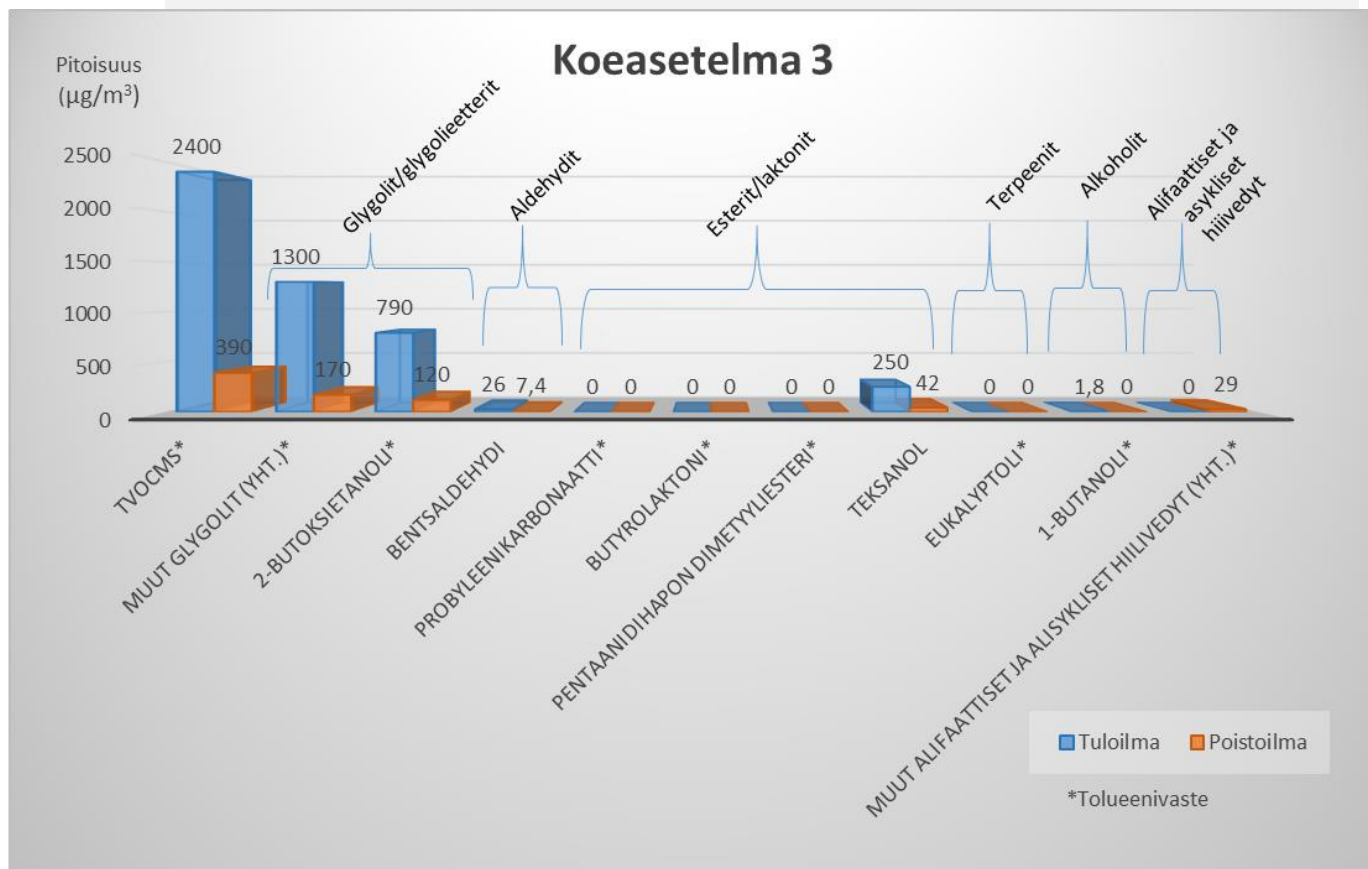
Kuvio 2 Koeasetelman 2 mittaustulokset

9.3 Vertailumittaus

Ennen vertailumittauksen aloittamista ilmavirta laitteen läpi oli 52 m³/h ja ilmavirran lämpötila 21,2 °C. Veden lämpötila oli 21,2 °C. Tuloilman lämpötila on huomattavasti korkeampi, kuin kahdella aikaisemmalla mittauksella. Tämä johtuu siitä, että vaikka kemikaalien annostelu ja haihdutuksen ta-soittuminen suoritettiin samalla tavalla kuin kahdella aikaisemmalla mittauksella, kemikaaleista ei jostain syystä haihtunut VOC-yhdisteitä yhtä tehokkaasti. Näin tuloilmaa, eli kemikaaliastioiden ohi virtaavaa ilmaa jouduttiin lämmittämään ilmapuhaltimella haihtumisen tehostamiseksi. Näytteenoton aikana vallinneet tulo- ja poistoilman lämpö- ja kosteus olot on esitetty taulukossa 8, ja mittaukselliset tulokset kuviossa 3.

Taulukko 8 Tulo- ja poistoilman lämpötila ja kosteus kolmannen näytteenottokerran aikana

Aika	Tuloilman lämpötila °C	Poistoilman lämpötila °C	Tuloilman kosteus %	Poistoilman kosteus %
17:35:41	18.6	22.4	47.5	93.1
17:42:08	18.6	22.3	42.1	92.0
17:48:35	18.6	22.1	41.2	91.4
17:55:02	18.6	22.0	44.7	90.3
18:01:29	18.7	21.9	40.6	90.5
18:07:56	32.9	22.0	14.6	89.4
18:14:25	40.2	22.1	5.7	88.2
18:20:51	44.2	22.5	5.0	87.1
18:27:18	46.6	22.8	5.0	85.8
18:33:45	48.0	23.1	5.0	84.6
18:40:13	49.2	23.3	5.0	83.8



Kuvio 3 Koeasetelman 3 mittaukselliset tulokset

9.4 Tulosten yhteenveto

Taulukossa 9 on nähtävissä mittaustuloksista lasketut reduktioprosentit eri yhdisteille. Yhdisteiden pitoisuudet ovat nähtävissä taulukkomuotoisina RSLabin analyysivastauksissa liitteissä 2 ja 3.

Taulukko 9 Yhdisteiden reduktioprosentit

Yhdisteryhmä	Yhdiste	Koeasetelma 1 (%)	Koeasetelma 2 (%)	Koeasetelma 3 (%)
Kokonais VOC-määrä	TVOCMS*	88,2	95,3	83,8
Glygolit/glygolieetterit	Muut glygolit (yht.)*	87,2	95,3	86,9
	2-butoksietanoli*	100	94,3	84,8
Aldehydit	Bentsaldehydi	**	37,5	71,5
Esterit/laktonit	Probyleenikarbo- naatti*	100	-	-
	Butyrolaktoni*	100	-	-
	Pentaanidihapon di- metyyliesteri*	100	-	-
	Teksanol	-	99,1	83,2
Terpeenit	Eukalyptoli*	-	100	-
Alkoholit	1-butanoli*	-	-	100
Alifaattiset ja alisykli- set hiilivedyt	Muut alifaattiset ja alisykliset hiilivedyt (yht.)*	-	-	**

* Tolueenivaste

**Reduktioprosenttia ei pystytä laskemaan koska yhdisteen pitoisuus on pienempi tuloilmassa kuin poistoilmassa. Bentsaldehydi: tuloilma 0 µg/m³, poistoilma 26 0 µg/m³. Muut alifaattiset ja alisykliset hiilivedyt (yht.): tuloilma 0 µg/m³, poistoilma 29 µg/m³.

Hydrofobisten yhdisteiden pitoisuudet ja reduktioprosentit ovat vielä erikseen nähtävissä taulukossa 10.

Taulukko 10 Hydrofobisten yhdisteiden pitoisuudet ja reduktioprosentit koeasetelmissa 1–3

	Bentsaldehydi	Teksanol
Koeasetelma 1		
Tuloilman pitoisuus	0 µg/m ³	-
Poistoilman pitoisuus	26 µg/m ³	-
Reduktio	-	-
Koeasetelma 2		
Tuloilman pitoisuus	16 µg/m ³	110 µg/m ³
Poistoilman pitoisuus	10 µg/m ³	<1,0 µg/m ³
Reduktio	37,5 %	99,1
Koeasetelma 3		
Tuloilman pitoisuus	26 µg/m ³	250 µg/m ³
Poistoilman pitoisuus	7,4 µg/m ³	42 µg/m ³
Reduktio	71,5 %	83,2

10 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyössä tehtiin kirjallisuusselvitys sisäilmasta ja sen laatuun vaikuttavista epäpuhtauksista. Lisäksi tarkasteltiin erilaisia ilmanvaihtojärjestelmiä ja huoneilman puhdistimia ja näiden vaikutusta sisäilman laatuun. Huono sisäilman laatu koetaan yleensä ilman ”tunkkaisuutena” tai epämiellyttävänä hajuina. Työssä tarkasteltiin yleisimpiä epäpuhtauksia, joita tavataan kohteissa, joissa ei ole tuotannosta tai muista toiminnoista johtuvia yksittäisiä, selkeitä ja voimakkaita päästölähteitä. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi koulut, virastot ja toimistot. Epäpuhtauksista selvitettiin niiden yleisimpiä päästölähteitä ja terveysvaikutuksia. Päästölähteistä merkittävimpiä ovat rakennus- ja sisustusmateriaalit, ulkoilma, kosteus- ja homevauriot sekä ihmisen toiminta. Yleisimpiä terveysvaikutuksia taas ovat väsymys, pääkipu, silmien ja limakalvojen ärsytysoireet sekä erilaiset hengityselinoireet.

Huonoa sisäilman laatua voidaan parantaa erilaisilla elektrostaattisilla, ionisoivilla, fysikaalisilla, kemiallisilla ja biologisilla sisäilman puhdistimilla, mutta sisäilman laadunhallinnassa tärkein tekijä on ilmanvaihtojärjestelmä, sen toimivuus ja tarkoituksenmukainen käyttö. Ilmanvaihtojärjestelmän tehtävä on poistaa sisätiloista epäpuhtauksia sisältävää ilmaa ja huolehtia riittävästä korvausilman tuonnista tiloihin. Nykyisin uusiin rakennuksiin yleisimmin asennettuja ilmanvaihtojärjestelmiä ovat koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä sekä erilaiset ilmastointijärjestelmät. Vanhemmissa rakennuksissa, joissa käytetään painovoimaista ilmanvaihtojärjestelmää tai koneellista poistoilmanvaihtojärjestelmää, sisäilmaongelmat ovat melko yleisiä, varsinkin rakennuksissa, joita on energiatehokkuuden vaatimusten kiristytessä jälkieristetty. Näiden rakennusten vaippa on tehty niin tiiviiksi lämmönkarkaamisen estämiseksi, ettei tiloihin välttämättä virtaa tarpeeksi korvausilmaa. Lisäksi painovoimaisen ilmanvaihtojärjestelmän rakennuksissa, erityisesti sisä- ja ulkoilman lämpötilaeron ollessa pieni, kuten kesällä, ilmanvaihtojärjestelmän toiminta voi olla hyvin heikko.

Biologisista ilmanpuhdistimista perehdyttiin tarkemmin eniten tutkittuihin menetelmiin, eli biosuodattimeen, biovalutussuodattimeen ja biopesuriin sekä kasvisuodattimiin. Näissä suodattimissa ilman epäpuhtauksien hajottaminen tapahtuu mikro-organismien biotransformaation seurauksena. Mikro-organismit elävät suodattimien rakennemateriaalissa (biosuodatin, biovalutussuodatin) tai kasvien juuristossa (kasvisuodatin). Biosuodattimia, biovalutussuodattimia ja biopesureita käytetään tällä hetkellä enimmäkseen teollisuuden eri alojen ilmavirtojen puhdistukseen, mutta menetelmiä ja laitteistoja kehitetään jatkuvasti. Kasvisuodattimista sisäilman puhdistukseen käytetään lähinnä erilaisia viherseiniä.

Työn kokeellisessa osuudessa ilmanpuhdistuslaitteen prototyyppi saatiin toimintakuntoon ja näytteenoton koejärjestely suunniteltua sekä toteutettua. Laitteen kehityksessä haastavaa oli laitteen läpi kulkevan ilmavirran tehostaminen, eikä työssä päästy sisäilmanpuhdistimilta vaadittuun ilmavirtaan. Ilmavirta kuitenkin katsottiin riittäväksi, jotta suunnitellut tutkimukset voitiin toteuttaa, ja näin saada alustavaa tietoa laitteen puhdistuskapasiteetista.

Mittauksissa käytetyt kemikaalit vapauttivat suurimmaksi osaksi vesiliukoisia VOC-yhdisteitä. Näytteiden hydrofobisten yhdisteiden pitoisuudet olivat vesiliukoisten yhdisteiden pitoisuuksiin verrattuna

hyvin pieniä, luokkaa 0–270 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, kun kokonais-VOC-määrä oli 1700–2400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Laitteen kyky poistaa ilmasta vesiliukoisia yhdisteitä oli odotetusti melko korkea veden kierron takia. Mittaustuloksista kuitenkin voidaan todeta, että ilmanpuhdistuskyky on parempi silloin, kun laitteessa oli mikro-organismeja hajottamassa epäpuhtauksia kuin vertailumittauksen aikana, jolloin laite oli puhdistettu ja desinfioitu mikro-organismien poistamiseksi. Kokonais-VOC-määrän reduktio laitteen sisältäessä mikro-organismeja oli 88,2 % ja vertailumittauksessa 83,8 %. Laitteen puhdistustehokkuutta yritettiin tehostaa parantamalla kasvatusalustaa. Tämä kuitenkin vaikutti laitteen biologisiin prosesseihin ja heikensi laitteen läpi kulkevaa ilmavirtaa. Parannellulla kasvualustalla reduktio nousi 95,3 %:in, mutta laitteen läpi kulkeva ilmavirta oli tilavuudeltaan noin kolme kertaa pienempi, kuin kahdella muulla näytteenottokerralla. Ilmavirran voimakkuuden vaikutusta puhdistustehoon on hankala arvioida, koska ilmavirran viipymää ja nopeutta puhdistuspatruunassa ei tiedetä. Mikäli ilmavirran nopeus on ollut huomattavasti pienempi kuin kahdella muulla näytteenottokerralla, se voi nostaa puhdistustehoa koska epäpuhtauksia sisältävällä ilmalla on pitempi viipymä ja reaktioaika laitteessa.

Hydrofobisten yhdisteiden pitoisuudet ja reduktioprosentit ovat nähtävissä taulukossa 10. Bentsaldehydin reduktioprosentti oli parempi vertailumittauksessa (71,5 %) kuin tehostetussa prosessissa (37,5 %) kun taas teksanolin reduktioprosentti oli parempi tehostetussa prosessissa (99,1 %) kuin vertailumittauksessa 83,2 %). Ensimmäisessä koeasetelmassa, laitteen sisältäessä mikro-organismeja ja alkuperäisen kasvatusalustan bentsaldehydin pitoisuus taas oli suurempi poistoilmassa (26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) kuin tuloilmassa (0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) eikä tulo- tai poistoilman näytteessä ollut lainkaan teksanolia, vaikka teksanolin pitoisuus tehostetulla kasvualustalla (tuloilma: 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ja vertailumittauksessa (tuloilma: 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) oli melko huomattava. Tulosten perusteella laitteessa täytyisi syntyä bentsaldehydiä mikro-organismien toiminnan seurauksena. Koska hydrofobisten yhdisteiden määrä kokonais-VOC-määrästä oli hyvin pieni, eikä yhdisteiden käyttäytymisessä ei ole selvää yhteistä linjaa, yhdisteiden käyttäytymisestä laitteessa ei voida saatujen mittaustulosten perusteella tehdä kovin luotettavia päätelmiä, vaikka reduktioprosentit bentsaldehydille ja teksanolille olivatkin pääosin melko suuria.

Tulevaisuudessa tutkimustarve keskittyy hydrofobisten ja vesiliukoisten yhdisteiden käyttäytymiseen laitteessa. Koejärjestelyssä käytettävien kemikaalien olisi hyvä olla teknisiä, eli pitoisuudeltaan hyvin puhtaita kemikaaleja. Näin voidaan näytteenotto suorittaa erikseen hydrofobiselle ja vesiliukoiselle VOC-yhdisteelle ja saada vertailukelpoisia pitoisuuksia molemmista yhdisteistä, niin laitteen tulo- kuin poistoilmasta sekä näiden erotuksesta.

LÄHTEET

- Allergia- ja astmaliitto 2016. *Allergia- ja astmaliitto: Ulkoilma, sisäilma ja astma*. [Viitattu 2016-01-12]
 Saatavissa: <http://www.allergia.fi/astma/astma/ulko-ja-sisailman-merkitys/>
- BEREZKIN ja GRUGOV (1991). Gas Chromatography in Air Pollution Analysis. Use of adsorption for contaminant concentration). Elsevier. [Viitattu 2015-12-14] Saatavissa:
<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.savonia.fi/science/article/pii/0003267093800702>
- Green Fortune 2016. [Viitattu 2016-05-20] Saatavissa: <http://www.greenfortune.com/plantwall-fin.php>
- GUIEYSSE, HORT, PLATEL, MUNOZ, ONDARTS ja REVAH 2008. Biological treatment of indoor air foc VOC removal: Potential and challenges. Biotechnology Advances. [Viitattu 2016-01-18] Saatavissa: http://ac.els-cdn.com.ezproxy.savonia.fi/S0734975008000426/1-s2.0-S0734975008000426-main.pdf?_tid=4a613cc8-2768-11e6-b17b-00000aacb360&acdnat=1464724136_f5250992fe3032dc34f39e6e541aa6b6
- GUIEYSSE B., HORT C., PLATEL V., MUNOZ R., ONDARTS M. JA REVAH S. 2008. Biological treatment of indoor air foc VOC removal: Potential and challenges. Biotechnology Advances. [Viitattu 2016-01-18]
 Saatavissa: http://ac.els-cdn.com.ezproxy.savonia.fi/S0734975008000426/1-s2.0-S0734975008000426-main.pdf?_tid=4a613cc8-2768-11e6-b17b-00000aacb360&acdnat=1464724136_f5250992fe3032dc34f39e6e541aa6b6
- Hengityслиitto, 2015. [Viitattu 2015-11-15] Saatavissa: <http://www.hengityслиitto.fi/fi/sisailma>
- HOLOPAINEN R., HAUTAMÄKI M., HÄMERI K., KUKKONEN E., KULMALA I., KURNITSKI J. ja VARTIAINEN E. 2006. Mitigating The Adverse Impact of Particulates on Indoor Air. [Viitattu 2016-03-24] Saatavissa:
https://www.tekes.fi/globalassets/julkaisut/fine_sisailma.pdf
- HOLOPAINEN R., PASANEN P., RAILIO J, SÄTERI J. ja VIRRANTA P. 2008. Ilmanvaihtojärjestelmän puhdistus ja tasapainotus: Tavoitteena hyvä ja energiataloudellinen sisäilmasto. Keuruu: Opetushallitus. [Viitattu 2016-04-17]
- Honeywell 2016. Understanding and operating the ppbRAE 3000. [Viitattu 2016-03-17] Saatavissa:
http://www.raesystems.com/sites/default/files/content/resources/Technical-Note-150_Understanding%20And%20Operating%20The%20ppbRAE%203000_08-14.pdf
- Ilmatieteenlaitos 2016. Ilmanlaatuportaali: Tietoa ilmansaasteista. [Viitattu 2016-01-24] Saatavissa:
<http://www.ilmanlaatu.fi/ilmansaasteet/komponentit/komponentit.html>
- International Sensor Technology 2016. Toxic & combustible gas monitors for area air quality and safety applications. International Sensor Technology, Product catalog. [Viitattu 2016-03-11] Saatavissa:
<http://www.intlsensor.com/pdf/products.pdf>

Itä-Suomen Yliopisto 2016. Puun pienpolton päästö- ja toksisuustietokanta. [Viitattu 2016-01-05] Saatavissa: <http://wanda.uef.fi/pupo/info.html>

JÄRVINEN Niko 2015. Kuva ilmanpuhdistuslaitteen 3D-mallista. Naturvention Oy. [Viitattu 2016-05-20]

LAHTINEN M., LAPPALAINEN S. ja REIJULA K. 2006. Sisäilman hyväksi - Toimintamalli vaikeiden sisäilmaongelmien ratkaisuun. Vammala. Työterveyslaitos. [Viitattu 2016-02-12]

LEPPÄÄHO Mika. (2015). Kuvat ilmanpuhdistuslaitteesta ja sen osista. Naturvention Oy. [Viitattu 2016-03-28]

MONTEBELLO M. FERNÁNDEZ M., ALMENGLO F., RAMÍREZ M., CANTERO D., BAEZA M. JA GABRIEL D. 2012. Simultaneous methylmercaptan and hydrogen sulfide removal in the desulfurization of biogas in aerobic and anoxic biotrickling filters. Chemical Engineering Journal. Espanja. [Viitattu 2016-04-03] Saatavissa: http://ac.els-cdn.com.ezproxy.savonia.fi/S1385894712007644/1-s2.0-S1385894712007644-main.pdf?_tid=5acbc236-2781-11e6-b983-00000aacb35e&acdnat=1464734901_203b5601595263e0a265025d5ce9f1b0

MUDLIAR SANDEEP, GIRI BALENDU, PADOLEY KIRAN, SATPUTE DEWANAND, DIXIT RASHMI, BHATT PRAVEENA, PANDEY RAM, JUWARKAR ASHA ja VAIDYA ATUL 2010. Bioreactors for treatment of VOCs and odours – A review. Journal of Environmental Management. Nagbur, Intia. [Viitattu 2016-01-17] Saatavissa: http://ac.els-cdn.com.ezproxy.savonia.fi/S0301479710000071/1-s2.0-S0301479710000071-main.pdf?_tid=3300c094-235d-11e6-8493-00000aabb0f02&acdnat=1464279567_cbc46c8fbc1d84d66f9004b4b40c3888

Naturvention Oy 2016. [Viitattu 2016-02-08] Saatavissa: <https://www.naturvention.com/fi/>

REIJ MARTINE W., KEURENTJES, JOS T. ja HARTMANS S 1998. Membrane bioreactors for waste gas treatment. Journal of Biotechnology. Hollanti. [Viitattu 2016-05-25] Saatavissa: http://ac.els-cdn.com.ezproxy.savonia.fi/S0168165697001697/1-s2.0-S0168165697001697-main.pdf?_tid=bb9f71ca-283f-11e6-a807-00000aabb0f26&acdnat=1464816667_1e45ec2dc657fdc198303d7eab2fa7e4

RONKAINEN Veera. (2016). Ilmanpuhdistuslaitteen osat. Jyväskylä. [Viitattu 2016-05-30]

RS Lab Oy 2015. [Viitattu 2015-11-19] Saatavissa: <http://www.rslab.fi/>

RS Lab Oy 2015. VOC-ilmanäytteenotto-ohje. [Viitattu 2016-04-03] Saatavissa: http://www.rslab.fi/images/ohjeet/5.4_VOC-ilmanaytteenotto-ohje.pdf

SALONEN Heidi, LAHTINEN Marjaana, LAPPALAINEN Sanna, HOLOPAINEN Rauno, PIETARINEN Veli-Matti, PALOMÄKI Eero, KARVALA Kirsi, TUOMI Tapani ja REIJULA Kari 2014. Kosteus- ja homevauriot - Ratkaisuja työpaikalle. (L. Satu, Toim.) Helsinki. Lönnberg Print & Promo. [Viitattu 2016-03-22]

SALONEN Heidi, LAPPALAINEN Sanna, LAHTINEN Marjaana, HOLOPAINEN Rauno, PALOMÄKI Eero, KOSKELA Hannu, BACKLUND Peter, NIEMELÄ Rauno, PASANEN Anna-Liisa ja REIJULA Kari 2011. Toimiston sisäilmaston tutkiminen. (S. Lehtinen, Toim.) Helsinki. Työterveyslaitos. [Viitattu 2016-04-17]

SANDBERG Esa (Toim.) 2014. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Ilmastointitekniikka osa 1. Tampere. Tammerprint. [Viitattu 2016-02-5]

SCHLEGELMILCH M., STREESE J. ja STEGMANN R. 2005. Odour management and treatment technologies: An overview. Saksa. [Viitattu 2016-04-17] Saatavissa: http://ac.els-cdn.com.ezproxy.savonia.fi/S0956053X05001807/1-s2.0-S0956053X05001807-main.pdf?_tid=d09f2aa0-277e-11e6-8238-00000aacb361&acdnat=1464733810_cf95a11640a1fe90b2d47c533781278e

Seedstudio 2016. Seed wiki: How to choose a gas sensor. [Viitattu 2016-03-03] Saatavissa: http://www.seedstudio.com/wiki/How_to_choose_A_Gas_Sensor

SIIKANEN Unto 2014. Rakennusfysiikka Perusteet ja sovellukset. Helsinki. Rakennustieto Oy. [Viitattu 2016-01-17]

Sisäilmayhdistys ry 2016. Sisäilmayhdistys ry: Perustietoa sisäilmasta. [Viitattu 2016-01-18] Saatavissa: <http://www.sisailmayhdistys.fi>

Sosiaali- ja terveysministeriö 2003. Sosiaali- ja terveysministeriön oppaita 2003: Asuntojen ja muiden oleskelutilojen fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset tekijät. [Viitattu 2016-04-17] Saatavissa: http://www.finlex.fi/pdf/normit/14951-asumisterveysohje_pdf.pdf

SYKE, Aalto-yliopisto, YTK, Ilmatieteen laitos 2016. Ilmasto-opas. Ilmastonmuutos ilmiönä: Kasvihuoneilmiö. [Viitattu 2015-11-03] Saatavissa: <http://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/1e92115d-8938-48f2-8687-dc4e3068bdbd/hiilidioksidi-ja-hiilen-kiertokulku.html>

SÄTERI Jorma, ANDERSSON Tarja, HONGISTO Valtteri ja KURNITSI Jarek 2008. Sisäilmastoluokitus 2008 sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Sisäilmayhdistys ry. Espoo [Viitattu 2016-01-09]

Terveyden ja hyvinvoinnin laitos 2016. Puunpoltto. [Viitattu 2015-11-23] Saatavissa: <https://www.thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/ilmansaasteet/puunpoltto>

Tilastokeskus 2015. Tilastokeskus: Asumisen energiankulutus energialähteittäin vuonna 2014. [Viitattu 2015-11-20] Saatavissa: http://www.stat.fi/til/asen/2014/asen_2014_2015-11-20_kuv_001_fi.html

Tilastokeskus 2015. Tilastokeskus: Energian hinnat 2. vuosineljännes 2015. [Viitattu 2015-11-25] Saatavissa: http://www.stat.fi/til/ehi/2015/02/ehi_2015_02_2015-09-17_tie_001_fi.html

Tuomi Tapani, Lappalainen Liisa, Laaja Timo, Hovi Hanna ja Svinhufvud Juha 2012. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuuden (TVOC) tavoitetasot teollisten työympäristöjen yleisilmassa.

Työterveyslaitos: Työturvallisuus ja riskienhallinta. [Viitattu 2015-12-27] Saatavissa:

http://www.ttl.fi/fi/tyoturvallisuus_ja_riskien_hallinta/riskien_hallinta/ohjeavot_tavoitetasot_haittatekij%C3%B6ille/tavoitetasot/Documents/TVOC_tavoitetasot_final_25052012.pdf

Työterveyslaitos 2015. Työterveyslaitos: Työympäristö. [Viitattu 2015-12-28] Saatavissa:

<http://www.ttl.fi/fi/tyoymparisto/Sivut/default.aspx>

Työterveyslaitos 2016. ONNETTOMUUDEN VAARAA AIHEUTTAVAT AINEET -turvallisuusohjeet. [Viitattu 2016-04-14] Saatavissa: <https://www.ttl.fi/ova/index.html>

World Health Organization (WHO) 2010. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. [Viitattu 2016-05-22] Saatavissa: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf

LIITE 1 YLEISIMMÄT VOC-YHISTEIDEN PÄÄSTÖLÄHTEET

YHDISTERYHMÄ	
Yleisimmät yksittäiset yhdisteet	ESIMERKKEJÄ MAHDOLLISISTA PÄÄSTÖLÄHTEISTÄ
Aromaattiset hiilivedyt	
Tolueeni, ksyleenit, trimetyylibentseenit	Maalit, lakat, liimat, pakokaasut, bensiini, liuottimet, seinäpinnoitteet, polyuretaanit, puhdistusaineet, tietokoneet, tulostimet, kopiokoneet
Bentseeni	Maalit, lakat, liimat, pakokaasut, bensiini, liuottimet, seinäpinnoitteet, polyuretaanit, puhdistusaineet, tietokoneet, tulostimet, kopiokoneet, tupakointi, synteettiset kuidut
Etyylibentseeni	Pakokaasut, bensiini, tupakointi, eristeet, tulostimet, laastit, kosmetiikkatuotteet, kuitulevyt
Alkoholit	
1-Butanoli	Liuottimet, puhdistusaineet, maalit, liimat, tasoitteet, laastit, kosmetiikkatuotteet, kuitulevyt
2-Etyyli-1-heksanoli	Muovimatot, liimat, tulostimet, kopiokoneet
2-Metyyli-1-propanoli	Puun uuteaineet, liuottimet, puhdistusaineet, maalit, liimat, tasoitteet, laastit, pehmitinaineet
Fenoli	Liuottimet, puhdistusaineet, maalit, liimat, tasoitteet, laastit, tietokoneet, tupakointi, PVC-pohjaiset pinnoitteet
Alifaattiset hiilivedyt	
Dodekaani, nonaani, pentadekaani, tetradekaani, undekaani	Maalit, liimat, bensiini, palamislähteet, tiivisteet, kopiokoneet, tietokoneet, linoleum, kosmetiikkatuotteet
Heksadekaani, tridekaani	Maalit, liimat, bensiini, palamislähteet, tiivisteet, kopiokoneet, tietokoneet, linoleum, kosmetiikkatuotteet, puun uuteaineet
Dekaani	Maalit, liimat, bensiini, palamislähteet, tiivisteet, kopiokoneet, tietokoneet, linoleum, kosmetiikkatuotteet, puun uuteaineet, tekstiilit
Heptaani	Liimat, bensiini, pakokaasut, liuottimet, polyuretaani, seinä/lattiapäällysteet, kopiokoneet, linoleum
Oktaani	Liimat, bensiini, pakokaasut, liuottimet, polyuretaani, painetut puutuotteet, puhdistusaineet, kopiokoneet, linoleum
Heksaani	Liimat, bensiini, pakokaasut, liuottimet, polyuretaani
Aldehydit	
Nonanaali, oktanaali, pentanaali	Puutuotteet, lastulevy, tapetit, lattiavahat, hajusteet, linoleum, kostea mineraalivilla, tietokoneet
Bentsaldehydi	Pakokaasut, lastu- ja kuitulevyt, värit, hajusteet, tietokoneet, kopiokoneet, linoleum
Dekanaali	Tasoiteaineet, betonit, maalituotteet, lattiapäällysteet (linoleum, PVC-matot), liimat, puupohjaiset rakennusmateriaalit, kuitulevyt, tietokoneet
Heksanaali	Puutuotteet, lastulevy, kuitulevy, tapetit, lattiavahat, hajusteet, linoleum, kostea mineraalivilla, kopiokoneet, hartsit, vesieristeet

2-Furfuraali	Tasoiteaineet, betonit, maalituotteet, lattiapäällysteet (linoleum/PVC-matot), liimat, kuitulevyt, mineraalivilla
Formaldehydi	Puutuotteet, eristemateriaalit, kulutustuotteet, pintakäsittelyaineet, kankaat, tupakointi, toimistolaitteet, otsonin ja terpeenien reaktiot
Glygolit/glykolieetterit	
1,2-Propaanidioli	Vesiohenteiset, maalit, lakat, PVC-päällysteiset lattiamateriaalit, liimat, korkkimatto, tasoitteet, vedeneristemassat, laastit, vahat, vahanpoistoaineet, pesuaineet
2-Fenoksietanoli	Liuotinpesuaineet, hajuvedet, liimat, pehmitinaineet, kittausaineet
2-(2-Butoksietoksi)etanoli	Puhdistusaineet, pesuaineet, maalit, värit, musteet, kittausaineet
1-Metoksi-2-Propanoli	Lattialiimat, vesiohenteiset maalit ja lakat, pehmitinaineet
2-(2-Etoksietoksi)etanoli	Mattoliimat, pehmitinaineet, vesiohenteiset maalit, lattiavahat, vahanpoistoaineet, kittausaineet
Terpeeni eli isoprenoidit	
3-Kareeni	Puu ja puupohjaiset materiaalit, hajusteet, maalit, liuottimet, siivousaineet
Alfa-pineeni, limoneeni	Puu ja puupohjaiset materiaalit, hajusteet, maalit, liuottimet, siivousaineet, kosmetiikkatuotteet, tietokoneet, ilmanraikastimet
Piiyhdisteet	
Dekametyyliisiklopentasiloksaani	Kosmetiikkatuotteet, saumausaineet, kosteuseristeet, tekstiilien lianhyljintäpinnoitteet, laastit
Orgaaniset piiyhdisteet	Rakennusmateriaalit, tiivistemassat, siivousaineet, pintojen käsittelyaineet, hiuslakat
Orgaaniset hapot	
Heksaanihappo	Linoleum, hartsit, liuotinhenteinen maali (alkydimaali), mäntylauta (puun uuteaineet), lastulevy
Etikkahappo	Tiivistemassat, kittausaineet, linoleum, liimat
Pentaanihappo	Linoleum, puun uuteaineet, hartsit
Propaanihappo	Linoleum
Esterit	
n-Butyyliasetaatti, 2-(2-Butoksietoksi)etyylisasetaatti	Muovit, kuidut, maalit, lakat, liimat (liuottimina), kosmetiikkatuotteet, kittausaineet
Etyylisasetaatti	Liimat, korjauskynät, siivousaineet, kosmetiikkatuotteet, homeet, tiivisteaineet, kittausaineet
2,2,4-Trimetyyli-1,3-Pentenedioli-diisobutyraatti, TXIB	Muovimatot, lattialiimat, pehmitinaineet, apuaineet, tapetit, maalit, kenonahkatuotteet
Ketonit	
2-Butanoli	Liuottimet, puun uuteaineet, hartsit, liimat, kuitulevyt
6-Metyyli-5-hepten-2-oni	Liuottimet, puun uuteaineet, hartsit, liimat, kuitulevyt, kittausaineet, mineraalivilla

Lähde: Salonen Heidi, Lappalainen Sanna, Lahtinen Marjaana, Holopainen Rauno, Palomäki Eero, Koskela Hannu, Backlund Peter, Niemelä Rauno, Pasanen Anna-Liisa, Reijula Kari 2011. Toimiston sisäilmaston tutkiminen.

LIITE 2 MITTAUSTULOKSET 11.11.2016 SUORITETUISTA NÄYTTEENOTOISTA



ANALYYSIVASTAUS 1511111324JLa

1 (2)

24.11.2015

**Tilaaaja**

NaturVention Oy
Veera Ronkainen
Laukaantie 4
40320 Jyväskylä

Ilmanäytteen VOC-analyysi

Näytteenottaja	Veera Ronkainen
Näytteenottopaikka	NaturVention
Näytteenottopäivämäärä	11.11.2015
Vastaanottopäivämäärä	11.11.2015
Näyttemäärä	2 kpl + kenttänolla

Analyysimenetelmä

Adsorptioputkeen (Tenax-TA) kerätty näyte analysoitiin TD-GC-MS – laitteistolla (Markes Unity 2, Agilent GC-MS (7890A/5975C) standardin ISO 16000-6:2011 (muunneltu) mukaisesti. Yhdisteet tunnistettiin puhtaiden vertailuaineiden / massaspektrikirjaston (NIST) avulla. Kvantitointiin käytettiin puhtaiden vertailuaineiden vastetta tai tolueenivastetta. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuus (TVOC) on määritetty tolueeniekvivalentteina väliltä n-heksaani-heksadekaani (C6-C16) nämä mukaan lukien. Analyysimenetelmän laajennettu kokonaismittausepävarmuus 95 % luottamusvälillä ilman näytteenottoa on 22-40 % yhdisteestä riippuen ollen keskimäärin 27 %. Määritysraja (LOQ) on yhdistekohtainen ollen keskimäärin 3 ng/näyte eli 0,6 µg/m3 laskettuna 5 litran näytteelle. Tulosten ilmoittamisraja on 1,0 µg/m3. Yhdistekohtaiset mittausepävarmuudet sekä määritysrajat on tarvittaessa saatavissa laboratorion. Näytteistä voidaan määrittää myös TVOC-alueen ulkopuolella olevien yhdisteiden pitoisuuksia, mikäli niiden pitoisuudet ovat tulosten tulkinnan kannalta merkittäviä.

Yhtiön toiminimi
RSLab Oy

Puhelin
+ 358 (0) 50 5765 391

URL
www.rslab.fi

E-mail
etunimi.sukunimi@rslab.fi

Y-tunnus
2360795-6

Posti- ja käyntiosoite
Laukaantie 4 (Grafilia)
40320 JYVÄSKYLÄ



24.11.2015

Tulokset

Näyte/mittauskohde:	Näyte 1, Tuloilma, Biologinen puhdistus	
Keräin:	271801	
Näytteen tilavuus:	0,50 l	
Analysointipvm:	13.11.2015	
Yhdisteryhmä	Yhdiste	Pitoisuus (µg/m³)
Esterit/laktonit	Propyleenikarbonaatti*	70
	Butyrolaktoni*	49
	Pentaanidihapon dimetyyliesteri*	16
Glykolit/glykolieetterit	2-butoksietanoli*	67
	Muut glykolit (yht.)*	1800
TVOC _{MS} *	2200	

*Tolueenivaste

Näyte/mittauskohde:	Näyte 2, poistoilma, Biologinen puhdistus	
Keräin:	185752	
Näytteen tilavuus:	1,00 l	
Analysointipvm:	13.11.2015	
Yhdisteryhmä	Yhdiste	Pitoisuus (µg/m³)
Aldehydit	Bentsaldehydit	26
Glykolit/glykolieetterit	Muut glykolit (yht.)*	230
TVOC _{MS} *	260	

*Tolueenivaste

RSLab Oy

Jenni Lehtinen
tutkija

Kristian Jansson
laboratoriopäällikkö

RSLab Oy on FINAS-akkreditointipalvelun akkreditoima testauslaboratorio T283, akkreditointivaatimus SFS-EN ISO/IEC 17025. Akkreditoinnin pätevyysalue: Asumisterveyskemian ja – mikrobiologian; sisäilmanäyte VOC ja TVOC (ISO 16000-6:2011-muunneltu), sisä- ja ulkoilmanäyte (Andersen), Rakennusmateriaalinäyte, pintanäyte (STM:n asumisterveysohje 2003:1 ja Asumisterveysopas 2009). Akkreditointi ei koske lausuntoa tai tulosten tulkintaa. Näytteenottoa ei ole akkreditoitu. TVOC-alueen ulkopuolisten yhdisteiden analyysi ei kuulu akkreditoinnin piiriin, lukuunottamatta TXIB:a. Raportissa mainitut tulokset koskevat vain testattuja kohteita näytteenottohetkellä. Analyysitodistuksen saa kopioida vain kokonaan. Osittaisesta kopiointista on oltava RSLab Oy:n lupa.

Yhtiön toiminimi
RSLab Oy

Puhelin
+ 358 (0) 50 5765 391

URL
www.rslab.fi

E-mail
etunimi.sukunimi@rslab.fi

Y-tunnus
2360795-6

Posti- ja käyntiosoite
Laukaantie 4 (Grafilä)
40320 JYVÄSKYLÄ

LIITE 3 MITTAUSTULOKSET 26.11.2016 SUORITETUISTA NÄYTTEENOTOISTA (VAIN TILAAJAN
KÄYTTÖÖN)