

Aalto-yliopiston julkaisusarja
TIEDE + TEKNOLOGIA /

Julkisten uudisrakennusten
rakennusmateriaaliemissioiden
vaikutukset koettuun ja mitattuun
sisäilman laatuun sekä emissioiden
huomioiminen ilmanvaihdon
mitoituksessa (EURA)

Työsuojelurahaston hanke 115376

Camilla Vornanen-Winqvist
Tuomas Alapieti
Maria A. Andersson
Raimo Mikkola
Pertti Pasanen
Jarek Kurnitski
Heidi Salonen

Aalto-yliopisto
Insinööritieteiden korkeakoulu
Department of Civil Engineering
Sisäympäristötekniikka

Alkusanat

Uusien energiatehokkuusvaatimusten myötä julkisten uudisrakennusten sisäilmaongelmat ja epäilyt energiatehokkuusvaatimusten negatiivisista vaikutuksista sisäilman laatuun ja tilankäyttäjien hyvinvointiin ovat lisääntyneet. Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin (EPBD) 2010/31/EU mukaan vuodesta 2020 eteenpäin kaikkien uusien rakennusten on oltava lähes nollaenergiarakennuksia ("nearly Zero Energy Building", nZEB). Tämä tarkoittaa entistä tiiviimpiä ja eristettyjä rakenteita sekä ilmanvaihdon tarkkaa optimointia. Terveellisen ja turvallisen sisäympäristön laadun tulee kuitenkin olla aina ensisijainen tavoite uusien rakennuksien rakennettaessa tai vanhoja peruskorjattaessa. Sisäilmaongelmien ennaltaehkäisyssä ja ongelmia ratkottaessa on ensisijaisen tärkeää ottaa huomioon mitattavissa olevien laatutekijöiden lisäksi myös tilankäyttäjien sisäympäristökokemukset (muun muassa olosuhde- ja oirekokemukset) ja kokemuksiin vaikuttavat tekijät.

Tämä tutkimushanke tarjoaa tietoa pääkaupunkiseuden uudehkojen koulurakennusten sisäympäristön laadusta ja ongelmia aiheuttavista tekijöistä. Tutkimus tarjoaa myös keinoja julkisten rakennusten sisäilmaongelmien ennaltaehkäisyyn ja ongelmien selvittämiseen. Tutkimus keskittyi koulu- ja päiväkotirakennuksiin, mutta tutkimustuloksia voidaan hyödyntää myös muiden julkisten rakennusten sisäympäristöjen kehittämisessä ja mahdollisten ongelmien ennaltaehkäisyssä ja hoidossa.

EURA-tutkimushanke (hanke 115376) tehtiin ajalla 4.1.2016–31.3.2018. Tutkimushankkeen päärahoittajana oli Työsuojelurahasto. Muita rahoittajia olivat Aalto-yliopisto, Itä-Suomen yliopisto, Sosiaali- ja terveysministeriö sekä Helsingin kaupunki. Kiitämme lämpimästi rahoittajia tutkimushankkeen mahdollistamisesta.

Tutkimushankkeen johtoryhmässä ovat toimineet Anne-Marie Kurka (Työsuojelurahasto), Vesa Pekkola (Sosiaali- ja terveysministeriö), Marko Lahti (Helsingin kaupunki), Ulla Lignell (Vantaan kaupunki), Pertti Pasanen (Itä-Suomen yliopisto), Heidi Koukonen (Tikkurila Oyj, keväästä 2016 alkaen), Leif Wirtanen (Tikkurila Oyj, kevääseen 2016 asti), Leea Kuusimäki (Tikkurila Oyj, keväästä 2016 alkaen), Tapani Tuomi (Työterveyslaitos), Helena Järnström (VTT Expert Services Oy), Jarek Kurnitski (Aalto-yliopisto), Raimo Mikkola (Aalto-yliopisto), Risto Kosonen (Aalto-yliopisto), Camilla Vornanen-Winqvist (Aalto-yliopisto, projektipäällikkö), Heidi Salonen (Aalto-yliopisto, vastuullinen johtaja). Lämpimät kiitokset johtoryhmän jäsenille oman tärkeän asiantuntijapanoksensa antamisesta ja sujuvasta johtoryhmätyöskentelystä. Kiitos myös muille henkilöille, jotka ovat tarpeen mukaan osallistuneet johtoryhmän kokouksiin.

Eryteisesti kiitämme Vantaan kaupungin yhteyshenkilöä, sisäympäristöasiantuntija Ulla Lignelliä ja Helsingin kaupungin yhteyshenkilöä, sisäilma-asiantuntija Marko Lahtea tutkimuskohteiden tarjoamisesta ja sujuvasta yhteistyöstä, sekä kaikkien tutkimuskohteiden henkilökuntaa ja oppilaita tutkimukseen osallistumisesta. Kiitokset Tikkurila Oyj:lle laboratoriotutkimuksissa käytetyistä pinnoite- ja karbonyyliäytämateriaaleista sekä karbonyylianalyysistä, Leif Wirtaselle arvokkaista neuvoista tutkimuslaitteistoihin ja -menetelmiin liittyen sekä Leea Kuusimäelle ja Heidi Koukoselle avusta ja hyvästä yhteistyöstä.

Kiitokset seuraaville henkilöille, jotka ovat tutkimuksen eri vaiheissa osallistuneet tutkimusyhteistyöhön tai ystävällisesti antaneet apua ja asiantuntemusta: Katja Vahtikari, László Kredics, Marianna Tuomainen, Tapani Tuomi, Arja Valtanen, Hanna Hovi, Valérie Létourneau, Caroline Duchaine, Jukka Piironen, Pertti Alho, Karri Mäkinen, Esko Sistonen, Jari Latvala ja Panu Harmo. Kiitos myös kaikille hankkeen yhteydessä opinnäytteitä tehneille. Opinnäytetyöt ovat olleet arvokas osa tutkimushanketta. Erityisesti kiitokset Milla Mattilalle, Laura Salolle, Sini Nuutiselle, Kalle Laaksolle ja Esa Hyytiäiselle, joiden opinnäytetöiden tulokset ovat osa tätä loppuraporttia.

Aalto-yliopiston tutkimusryhmässä ovat toimineet professorit Heidi Salonen ja Jarek Kurnitski, tutkijatohtorit Maria A. Andersson ja Raimo Mikkola, tohtorikoulutettavat Camilla Vornanen-Winqvist, Tuomas Alapieti, Kati Järvi, Emmanuelle Castagnoli, Sander Toomla ja Kaiser Ahmed sekä diplomi-insinöörit Milla Mattila ja Laura Salo. Itä-Suomen yliopiston tutkimusryhmässä ovat toimineet professori Pertti Pasanen, tutkijatohtori Maija Leppänen ja filosofian maisteri Sini Nuutinen. Kiitämme kaikkia tutkimusryhmän toimintaan osallistuneita erittäin arvokkaasta työpanoksesta ja mukavasta työyhteisöstä!

Tutkimushankkeen yhteistyöhankkeina ovat toimineet Aalto-yliopiston Rakennustekniikan laitoksen hankkeet ”Toxin transport mechanisms from moisture damaged structures to indoor air” (Suomen Akatemia, TOXICPM 289161) sekä ”Sisäilmapoliisi – Sisäilmahaittojen havainnointi ja ennaltaehkäisy” (Business Finland, 4098/31/2015). TOXICPM-hankkeessa tutkitaan erityisesti mikrobiksiinien kulkeutumista kosteusvaurioituneista rakenteista sisäilmaan, ja Sisäilmapoliisi-hankkeessa kehitetään reaaliaikaista online-kyselyä sisäilmanlaadusta yläkouluikäisille oppilaille ja heidän opettajilleen sekä uusia sisäilmanlaadun tutkimusmenetelmiä. Hankeyhteistyön avulla alkupeleistä tutkimussuunnitelmaa voitiin merkittävästi laajentaa ja hankkeiden yhteistuloksena syntyneitä ja valmisteilla olevia tieteellisiä julkaisuja sekä opinnäytetöitä syntyi huomattavasti enemmän kuin alun perin suunniteltiin. Tämän vuoksi hankkeen keskeiset tulokset ja johtopäätökset on esitelty tässä raportissa, mutta hankkeesta syntyneeseen kokonaisaineistoon liittyviä julkaisuja on vielä valmisteilla ja julkaistaan vuoden 2018 aikana.

Helsinki, 30. huhtikuuta 2018

Kirjoittajat

Sisällysluettelo

Alkusanat	1
Lyhenteet	7
1. Tausta	9
2. Tavoitteet	9
3. Aineisto ja menetelmät.....	10
3.1 Kirjallisuuskatsaus	10
3.2 Aineistotutkimus	11
3.3 Kenttätutkimukset.....	11
3.3.1 Kuuden koulun vertailututkimus	11
3.3.2 Ilmanvaihdon ylipaineistustutkimus (tutkimuskohde I1).....	13
3.3.3 Hybridi-ilmanvaihdon tutkimus (tutkimuskohde I2)	18
3.4 Koerakennustutkimukset.....	21
3.5 Kammiotutkimukset.....	24
3.5.1 Maalatun ja lakatun puun emissiot (kammiotutkimukset K1).....	24
3.5.2 Maalatun puun ja muovimattojen emissiot ja ilmavaihdon vaikutus emissioihin (kammiotutkimukset K2)	27
4. Tulokset ja tulosten tarkastelu	30
4.1 Kirjallisuuskatsaus	30
4.1.1 Sisäilmaongelmat kouluissa ja päiväkodeissa	30
4.1.2 Ilmanvaihto sisäympäristön laadun osatekijänä	31
4.1.3 Rakennusmateriaalien emissiot	33
4.1.4 Puumateriaalien vaikutukset mitattuun sisäympäristön laatuun	35
4.1.5 Puumateriaalien yhteiskäyttö pinnoitusmateriaalien kanssa	41
4.1.6 Puumateriaalien vaikutukset koettuun sisäympäristön laatuun	42
4.2 Aineistotutkimus	44
4.3 Kenttätutkimukset.....	46
4.3.1 Kuuden koulun vertailututkimus	46
4.3.2 Ilmanvaihdon ylipaineistustutkimus (tutkimuskohde I1).....	46

4.3.3	Hybridi-ilmanvaihdon tutkimus (tutkimuskohde I2)	55
4.4	Koerakennustutkimukset.....	61
4.5	Kammiotutkimukset.....	64
4.5.1	Maalattun ja lakatun puun emissiot (kammiotutkimukset K1).....	64
4.5.2	Maalattun puun ja muovimattojen emissiot ja ilmavaihdon vaikutus emissioihin (kammiotutkimukset K2)	69
5.	Yhteenvedo.....	71
5.1	Aineistotutkimus	71
5.2	Kenttätutkimukset.....	71
5.2.1	Ilmanvaihdon ylipaineistustutkimus (tutkimuskohde I1).....	71
5.2.2	Hybridi-ilmanvaihdon tutkimus (tutkimuskohde I2)	72
5.3	Koerakennustutkimukset.....	73
5.4	Kammiotutkimukset.....	75
6.	Johtopäätökset.....	76
	Tutkimushankkeen julkaisut	78
	Lähteet	82

Lyhenteet

VOC	Volatile Organic Compounds, haihtuvat orgaaniset yhdisteet
T	Lämpötila
TVOC	Total Volatile Organic Compounds, haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuus
PM _{2,5}	2,5 µm:n kokoiset hengitettävät hiukkaset
TD-GC-MS	Thermal desorption - gas chromatography - mass spectrometry, termiäinen desorptio - kaasukromatografi - massaspektrometri
RH	Suhteellinen kosteus
CO ₂	Hiilidioksidi
ITS	Internal transcribed spacer, DNA-sekvenssi pienten ja suurten ribosomaalisten geenien välillä
TTL	Työterveyslaitos
CO	Hiilimonoksidi
2E1H	2-etyyli-1-heksanoli

1. Tausta

Hyvän sisäilman laadun myötä työntekijöiden viihtyvyys paranee, työympäristöön liittyvä oireilu ja sairaspotilaat vähenevät ja rakennusten korjauskustannuksissa voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä. Sisäilman laadun ongelmat erityisesti julkisissa rakennuksissa, kuten kouluissa ja päiväkodeissa, ovat olleet laajasti esillä erityisesti muutaman viime vuoden ajan. Sisäilmaongelmat yhdistetään usein vanhoihin, kosteusvaurioituneisiin rakennuksiin, mutta ongelmia esiintyy huomattavasti myös uusissa tai peruskorjatuissa rakennuksissa. Rakennusmateriaalien ja ilmanvaihdon vaikutus uusien rakennusten sisäilman laatuun on huomattava. Erityisesti uudisrakentamis- ja peruskorjaushankkeissa tarvitaan tietoa uusien materiaalien emissioista sekä ilmanvaihdon ja riittävien ilmamäärien vaikutuksesta sisäilman laatuun.

Puun käyttö julkisten rakennusten rakennusmateriaalina on viime vuosina lisääntynyt merkittävästi, ja puuta on esimerkiksi hyödynnetty päämateriaalina useissa uusissa koulurakennuksissa, joissa tavoitteena on erityisesti sisäilman hyvän laadun varmistaminen. Tutkimustietoa puumateriaalien pidempiaikaisesta vaikutuksesta koettuun ja mitattuun sisäilman laatuun on kuitenkin olemassa hyvin vähän.

Tutkimushanke koostui useasta osatutkimuksesta. Tutkimushankkeen päätavoitteet ja tarkennetut osatutkimustavoitteet on kuvattu luvussa 2.

Tässä loppuraportissa on hyödynnetty hankkeen yhteydessä syntyneitä tieteellisiä julkaisuja ja opinnäytetöitä.

2. Tavoitteet

Tutkimushankkeen tavoitteina oli tutkia uusissa, alle kymmenen vuotta vanhoissa, tai peruskorjatuissa koulurakennuksissa esiintyneitä sisäilmaongelmia sekä niiden mahdollisia syitä, koettua ja mitattua sisäilman laatua tutkimukseen valituissa koulurakennuksissa, puumateriaalien ominaisuuksia sisäpintojen materiaaleina sekä ilmanvaihdon vaikutusta materiaaliemissioihin ja sisäilman laatuun. Osatutkimuksittain tarkennetut tavoitteet olivat seuraavat:

1. Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsauksen tavoitteena oli kerätä tietoa rakennusmateriaalien, erityisesti puumateriaalien, emissioista, pinnoitteiden vaikutuksista puun emissioihin sekä ilmanvaihdon merkityksestä erilaisissa käytännön tilanteissa. Kirjallisuuskatsauksen avulla kartoitettiin taustaa myös muille osakokonaisuuksille.

2. Aineistotutkimus

Aineistotutkimuksen tavoitteena oli saada yleiskuva Helsingin ja Vantaan kaupunkien vuoden 2005 jälkeen rakennettujen koulujen ja päiväkotien raportoiduista si-

säilmaongelmista ja niiden aiheuttajista. Aineistotutkimus perustui koulurakennuksissa aikaisemmin tehtyihin raportteihin, kuten sisäilmasto- ja ilmanvaihtoteknisiin selvityksiin ja kuntotutkimusraportteihin.

3. Kenttätutkimukset

Kuuden koulun vertailututkimuksen tavoitteena oli kerätä vertailukelpoista aineistoa koetusta ja mitatusta sisäilman laadusta sisäilmaongelmaisista ja verrokkikoulurakennuksista sekä perinteisin että yhteistyöhankkeessa kehitetyin tutkimusmenetelmin.

Vertailututkimuksen yhteydessä tehtiin kaksi erillistä ilmanvaihdon interventiotutkimusta (I1 ja I2):

I1. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voidaanko rakennuksen lievällä ylipaineistuksella vähentää kemiallisille ja mikrobiologisille epäpuhtauksille altistumista ja tilankäyttäjien oireilua peruskorjatussa sisäilmaongelmaisessa koulurakennuksessa.

I2. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää hybridi-ilmanvaihdon toiminnan vaikutusta koettuun ja mitattuun sisäilman laatuun uudessa koulurakennuksessa, jossa ilmanvaihdon toiminta koettiin sisäilmaongelmien yhdeksi merkittäväksi aiheuttajaksi.

4. Koerakennustutkimukset

Tutkimusten tavoitteena oli tuottaa lisätietoa sisäilman epäpuhtauksista passiivitalovaatimusten mukaan rakennetuissa puurakenteisissa koerakennuksissa sekä tutkia ilmanvaihdossa käytetyn ulkoilmavirran vaikutusta mitattuun ja koettuun sisäilman laatuun.

5. Kammiotutkimukset

Tutkimusten tavoitteena oli selvittää kahdella eri tutkimusasetelmalla (K1 ja K2) pinnoitetun puumateriaalin ja muovimattojen emissioita laboratorio-olosuhteissa. Tutkimusasetelmittain tarkennetut tavoitteet olivat seuraavat:

K1: Tutkimusten tavoitteena oli selvittää eri maalien ja lakkojen sekä puun kosteuspitoisuuden vaikutusta mäntylaudasta haihtuviin yhdisteisiin.

K2: Tutkimusten tavoitteena oli selvittää maalaamattoman ja maalatun mäntylaudan emissioita, muovimattojen emissioita sekä ilmanvaihdon vaikutusta emissioihin.

3. Aineisto ja menetelmät

3.1 Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsaus tehtiin tutkimuksen eri osa-alueiden yhteydessä tietokantahakujen (Google Scholar, PubMed, Scopus) avulla. Kirjallisuuskatsauksessa käytiin läpi aihepii-

riin liittyviä tieteellisiä lehtijulkaisuja, tieteellisiä kongressijulkaisuja, raportteja, julkaistuja opinnäytetöitä sekä nettisivustoilla julkaistua materiaalia. Kirjallisuuskatsaus sisältää yhteensä 159 julkaisua, joista noin 70 % tieteellisiä lehtijulkaisuja.

3.2 Aineistotutkimus

Koulu- ja päiväkotirakennusten yleisistä sisäilman laadun ongelmista sekä niiden syistä ja tutkimusmenetelmistä tehtiin aineistotutkimus Helsingin ja Vantaan kaupunkien tutkimuskäyttöön luovuttamista sisäilmaongelmaisten uudisrakennusten tutkimusraporteista. Erilaisia sisäilman laatuun liittyviä raportteja oli saatavilla yhteensä 23:sta vuoden 2015 jälkeen valmistuneesta koulu- ja päiväkotirakennuksesta, ja ne olivat muun muassa ilmanvaihto-, sisäilmasto- tai kosteusteknisiä selvityksiä tai kuntotutkimuksia. Aineistotutkimukseen valittiin kolmetoista vuosina 2005–2011 valmistunutta uudiskohdetta tai vanhan rakennuksen yhteyteen valmistunutta laajennusosaa, joissa oli tehty sisäilmatutkimuksia käyttäjien valitusten vuoksi. Kymmenen kohteista oli Vantaalta ja kolme Helsingistä. Kohteista seitsemän oli koulurakennuksia, neljä päiväkotia, yhdessä toimi sekä koulu että päiväkoti ja yksi oli hallinto-, opetus- ja tutkimusrakennus. Kaikissa uudisrakennuksissa pintamateriaaleina oli käytetty vain M1-luokiteltuja eli vähäpäästöisiä materiaaleja. Loput kohteista rajattiin tarkemmasta tarkastelusta pois, koska niissä ongelmat olivat olleet hyvin pienimuotoisia tai esimerkiksi uudisrakennukseen liittyvien vanhojen rakennusosien tai piharakennusten ongelmia.

Sisäilmatutkimukset oli tehty sellaisissa kohteissa, joissa tilan käyttäjät olivat valittaneet sisäilman laatuun liittyvistä ongelmista. Toisinaan valitukset koskivat laajempaa osaa rakennuksesta, mutta usein vain yksittäistä tilaa, esimerkiksi tiettyä koululuokkaa. Monissa kohteissa valituksia oli tullut useiden toimenpiteiden jälkeenkin, joten niissä oli vuosien varrella eri yritysten toimesta tehty lukuisia erilaisia sisäilman laatuun liittyviä selvityksiä sekä kiinteistöön kohdistuvia korjaustoimenpiteitä. Selvityksissä oli muun muassa tutkittu ilmanvaihtolaitteiston teknistä toimivuutta sekä kerätty erilaisia materiaali-, pöly- ja ilmanäytteitä kemiallisia ja mikrobiologisia analyysejä varten. Suoritettujen korjaustoimenpiteiden tehokkuudesta ei tehty tässä tutkimuksessa johtopäätöksiä.

3.3 Kenttätutkimukset

3.3.1 Kuuden koulun vertailututkimus

Kenttätutkimuskohteiksi valittiin yhteensä kuusi koulurakennusta Helsingin (kaksi rakennusta) ja Vantaan (neljä rakennusta) kaupunkien ehdotusten perusteella. Neljässä tutkimukseen valitussa rakennuksessa oli koettu ja tutkittu sisäilmaongelmia, ja kahdessa tutkimukseen valitussa rakennuksessa ei ollut raportoituja sisäilmaongelmia. Nämä kaksi viimeksi mainittua rakennusta toimivat tutkimuksessa verrokkirakennuksina. Sisäilmaongelmat olivat ilmenneet työntekijöiden valituksina koetuista oireista tai haju- tai muista sisäympäristöön liittyvistä haitoista, ja olivat jatkuneet pitkään. Kaikissa rakennuksissa oli tehty myös lukuisia muita tutkimuksia ja selvityksiä vuosien varrella. Koulurakennusten kenttätutkimukset tehtiin toukokuun 2016 ja toukokuun 2017

välisenä aikana. Kouluissa tutkitut sisäilmaston laatuun vaikuttavat tekijät, niiden tutkimusmenetelmät sekä tutkimuskohde on kuvattu Taulukossa 1.

Taulukko 1. Kuuden koulun sisäilman laadun vertailututkimuksessa tutkitut tekijät sekä tutkimusmenetelmät ja -aika.

Mitattu tekijä	Mittauslaite / menetelmä	Tutkimusluokkien määrä /koulu	Mittausaika
T, RH, CO ₂ , TVOC, pölyisyys, valoisuus, melu	Monisensorilaite*	6	2 vkoa
T, RH, CO ₂	Rotronic CL11	6	2 vkoa
TVOC, T, RH, CO ₂ , CO, otsoni, arsiini, ammoniakki, rikkivety	Sensorit TG 501 ja IQ 610, GrayWolf –kämmentietokone.	1	2 vkoa
Formaldehydi	FM-801	1	2 vkoa
Hiukkaset 2,5 ja 10 µm	MIE pDR1500	1	2 vkoa
T, RH, CO ₂ , hiukkaset 1 µm ja 2,5 µm, VOCit	HomeSpy 10	1	2 vkoa
Sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero	Swema3000	6	Kertamittaus
Tulo- ja poistoilmamäärä	Swema3000 ja/tai Swema Flow 125	6	Kertamittaus
VOCit	Tenax-TA- tai Tenax TA-Carbo-graph 5TD -adsorbenttiputket (8 l näyte), analysointi TD-GC-MS.	6	2 rinnakkaisnäytettä
Ilmanäytteet mikrobien ja bakteerien pesäkelaskentaa varten	RCS High Flow Touch ja agarliuskat (näyte 100 l/min).	6	2 näytettä
Pintojen pyyhintäpölyn mikrobi	Keräys Minigrip-muovipussiin, näyte mallasuuteagar-maljoille, identifiointi ITS-sekvenssien perusteella.	6	Viljely 4 vkoa
Poistoilmasuodattimen mikrobi	Pölynäyte mallasuuteagar-maljoille, identifiointi ITS-sekvenssien perusteella.	Ilmanvaihtokone	Viljely 4 vkoa
Endotoksiinit lattiapölystä	Imurointi suodattimelle, 5 min/10 m ² , analysointi LAL-menetelmällä.	6	1 näyte
Ulkoilman TVOC, T, RH, CO ₂ , CO, otsoni, arsiini, ammoniakki, rikkivety ja hiukkaset 2,5 ja 10 µm	Sensorit TG 501 ja IQ 610, GrayWolf -kämmentietokone. MIE pDR1500.	Ulkoilma	10-30 min mittaus
Koettu sisäilman laatu (tutkimusluokkien opettajat ja oppilaat)	Lyhyt online-kysely, vastaus kännykällä / tabletilla / tietokoneella*	6	2 vkoa, joka oppitunnin jälkeen
Koettu sisäilman laatu (koulun henkilökunta)	Sisäilmastokysely (Työterveyslaitos)	Koko koulu	Kertavastaus, vastausaika 2 vkoa.

*Sisäilmapoliisi-hankkeessa kehitetty laite / kysely

Kenttätutkimukset voitiin toteuttaa alkuperäistä suunnitelmaa laajempina hankeyhteistyön avulla, ja sen vuoksi tulokset valmistuvat julkaistaviksi kevään 2018 aikana. Tutkimuksessa käytetty jatkuvatoiminen mittausmenetelmä on esitetty Kuvassa 1.



Kuva 1. Jatkuvatoinen hiukkasten ja VOCien mittaus kenttätutkimuskohteissa.

Kahdessa kenttätutkimuskohteisiin kuuluvassa sisäilmaongelmaisessa koulurakennuksessa (yksi Helsingistä ja yksi Vantaalta) tehtiin erityinen ilmanvaihdon interventiotutkimus (I1 ja I2), jossa selvitettiin seurantatutkimuksella ilmanvaihdon muutoksen vaikutusta koettuun ja mitattuun sisäilman laatuun. Toinen rakennuksista oli uusi rakennus ja toinen peruskorjattu. Interventiotutkimukset on kuvattu tarkemmin luvuissa 3.3.2 ja 3.3.3.

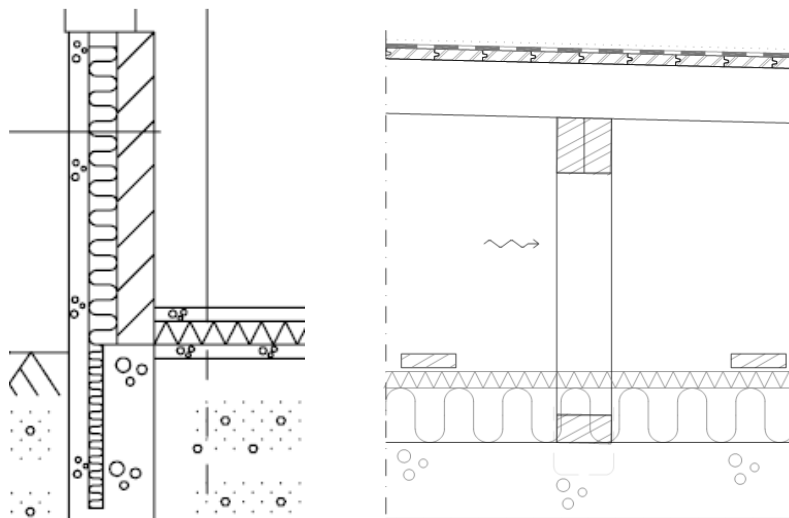
3.3.2 Ilmanvaihdon ylipaineistustutkimus (tutkimuskohde I1)

Tutkimuskohteen kuvaus

Tutkimus tehtiin vuonna 1968 rakennetussa ja 2003–2005 peruskorjatussa peruskoulussa Vantaalla. Rakennuksen mekaaninen tulo- ja poistoilmanvaihto lämmöntalteenotolla oli asennettu käytäviin ja luokkiin vuonna 2002. Ilmamäärät säädettiin pääilmanvaihtokoneen säätimillä sekä huonetilojen pääte-elimien säätölaitteilla. Tutkimukseen valittu rakennusosa oli yksikerroksinen, maanvastainen, suorakaiteen muotoinen siipi. Rakennusosan keskellä oli käytävä, jonka molemmin puolin oli yhteensä 12 luokkahuonetta. Lisäksi rakennusosassa oli kuusi wc-tilaa ja varastotila. Jokaisessa luokassa oli 2-3 tuloilmaventtiiliä sekä 1-2 poistoilmaventtiiliä. Rakennusosaa palveli yksi ilmanvaihtokone. Luokkakohtaisen käyttäjämäärän arveltiin olevan noin 20–25 henkilöä kerrallaan.

Rakennusosan alapohja oli maanvastainen kaksoislaattarakenne, jossa oli lämmöneristeenä styrox. Lämmöneristeen alapuolella oli polyeteenikalvo höyrynsulkuna. Ulkoseinärakenne ikkunan alapuolella koostui betonisesta ulkokuoresta, mineraalivillalevystä sekä sisäpuolisesta tiilimuurauksesta. Muualla ulkoseinärakenne oli pintakäsiteltyä Sipsorex-elementtiä. Yläpohjassa oli kantavana rakenteena betonilaatta, jonka yläpuo-

lella oli tuulettuvaan ullakkotilaan rajoittuvaa mineraalivillaa. Rakenteita on havainnollistettu Kuvassa 2.



Kuva 2. Vasemmalla havainnollistava piirros alapohjan ja ulkoseinän liitoksesta ja oikealla yläpohjan rakenne (Mattila 2017).

Pitkittyneiden sisäilmaongelmien vuoksi koko rakennuksessa tehtiin ulkopuolisen konsulttiyrityksen toimesta sisäilmastotekninen kuntotutkimus keväällä 2016 (Sweco Asiantuntijapalvelut Oy 2016). Tutkimuksissa todettiin ilmavuotokohtia muun muassa lattian ja seinän liitoksien, ikkunan ja seinän liitoksien sekä läpivientien kohdalla. Kohonneita kosteuspitoisuuksia todettiin laajalti tutkitussa rakennusosassa. Samanaikaiset haihtuvien orgaanisten hiukkasten (volatile organic compounds, VOC) mittaukset eivät kuitenkaan antaneet viitteitä kosteuden aiheuttamista materiaalivaurioista. Rakennavauksissa todettiin, että kosteus voi tiivistyä rakenteeseen kylmänä vuodenaikana. Ikkunapuitteiden puisista kiinnikkeistä löytyi mikrobikasvustoa ja mineraalivillakerroksesta kosteusvaurioindikaattoreita (aktinobakteerit ja *Exophiala* sp.).

Ilmanvaihdon interventio toteutettiin neljässä vaiheessa: (1) Rakennusosan kaikkien tilojen ilmavirrat mitattiin, (2) ilmanvaihtojärjestelmä tasapainotettiin ulkopuolisen yrityksen toimesta, (3) ilmanvaihtokoneen tuloilma säädettiin täydelle teholle ja vähennettiin samalla palvelualueen poistoilman määrää niin, että 5-7 Pascalin positiivinen paine-ero ulkoilmaan nähden vallitsisi koko tutkitussa rakennusosassa, (4) kaikkien tilojen ilmavirrat mitattiin uudelleen ja paine-eroa rakennuksen ulkovaipan yli seurattiin koko intervention ajan. Rakennusosan sisäisiä paine-eroja ei tutkittu, sillä ilmavirtaukset luokkien välillä olivat epätodennäköisiä. Interventiota ylläpidettiin elokuusta 2016 toukokuuhun 2017. Intervention tavoitteena oli estää mahdollinen epäpuhtauksien siirtyminen sisäilmaan ilmavirtausten mukana. Rakenteiden kosteusteknistä käyttäytymistä seurattiin ylipaineistuksen ajan.

Sisäilman laadun mittaukset tehtiin samanaikaisesti intervention vaiheiden (1) ja (4) kanssa. Osa tutkimuksista toteutettiin koko rakennusosassa, ja osa kahdessa luokassa (1 ja 2), joissa oli työterveyshenkilöstön tietojen mukaan raportoitu eniten sisäilmaongelmia. Lisäksi käyttäjien kokemaa sisäilman laatua tutkittiin kyselyin ja mikrobinäytteet kerättiin ennen interventiota ja viisi kuukautta intervention toteutuksesta.

Tutkimusmenetelmät

Tutkimuskohteessa käytetyt tutkimusmenetelmät ja -laitteistot on esitetty Taulukossa 2.

Taulukko 2. Mitatut tekijät ja mittauslaitteisto.

Mitattu tekijä	Mittauslaite/menetelmä	Tarkkuus	Mittausaika
Tulo- ja poistoilmamäärä	Swemaflow 125D	Ilmamäärä: $\pm 3.5\%$, ei yli 0.4 L/s. Taustapaine: $\pm 10\%$, alimmillaan 1 L/s. T $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$. Ilmapuntari $\pm 3.5\text{ hPa}$.	Hetkellinen
	SWEMA 3000md	$\pm 0.3\%$ lukemasta, min $\pm 0.3\text{ Pa}$	60 s keskiarvo (ilmamäärän laskeamiseen)
Paine-ero ulkovaipan yli	KIMO CP101, loggeri Grant 1000	1.5 % lukemasta $\pm 3\text{ Pa}$	Jatkuva
Paine-ero ulkovaipan yli	Envic dp-101s-pd2, loggeri Grant 1000	3 % lukemasta	Jatkuva
T	Rotronic CL11	$\pm 0.3\text{ }^\circ\text{C}$	Jatkuva
RH	Rotronic CL11	$\pm 3\%$ (10 ... 95 %)	Jatkuva
CO ₂	Rotronic CL11	$\pm (30\text{ ppm} + 5\% \text{ lukemasta})$	Jatkuva
T ja RH	ThermaData	$\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ (-10 ... 85 $^\circ\text{C}$)	Jatkuva
Formaldehydi	FM-801	$\pm 10\text{ ppb}$ at 40, 80, 160 ppb	Jatkuva
CO	TG-501 probe	$< 4\%$ /vuosi	Jatkuva
PM 2,5 μm	MIE pDR-1500	$\pm 5\%$	Jatkuva
VOC	Tenax TA, TD-GC-MS	$\pm 20\%$ (keskiarvo)	40 min
Sisäilman mikrobit			Viljely 4 vkoa
Koettu sisäilman laatu	Örebro (MM40) -sisäilmastokysely (Työterveyslaitos)		Vastausaika 2 vkoa

Ilmanvaihto

Ilmavirrat mitattiin kaikista tutkitun rakennusosan tulo- ja poistoilmavaihdon pääte-elimistä ennen ja jälkeen intervention. Paine-ero ulkovaipan yli mitattiin luokista 1 ja 2 jatkuvatoimisena mittauksena viikon ajan ennen interventiota ja yhdeksän kuukautta intervention jälkeen. Samanaikaisesti mitattiin ulkoilman lämpötilaa (T, temperature).

Sisäilman laatu

Sisäilman laatua tutkittiin luokissa 1 ja 2 VOC- ja TVOC (total volatile organic compounds, haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaismäärä) -mittauksilla ennen ja jälkeen intervention. Kohteessa A tutkittiin myös formaldehydi- ja 2,5 μm :n kokoisten hiukkasten (PM_{2,5})- pitoisuuksia ennen ja jälkeen intervention. VOC-näytteenotto toteutettiin standardin (ISO 16000-6:2011 2011) mukaisesti Tenax TA - tai Tenax TA-Carbograph 5TD -näytteenottoputkiin tyhjässä luokassa kahdeksan litran näytteinä korkeudelta 150 cm. VOC-näytteenottotilanne luokassa on esitetty Kuvassa 3.



Kuva 3. VOC-näytteenotto luokan keskeltä korkeudelta noin 150 cm.

VOC-yhdisteet analysoitiin kaasukromatografisin menetelmin TD-GC-MS (Thermal desorption - gas chromatography - mass spectrometry) -laitteistolla. Yhdisteet tunnistettiin käyttäen 50 standardiyhdistettä (Sigma Aldrich) ja NIST 2011-massaspektrometri tietopankkia. Tulokset analysoitiin tolueeniekvivalenteina.

Sisäilman lämpötilaa, suhteellista kosteutta (RH, relative humidity) ja hiilidioksidipitoisuutta (CO₂, carbon dioxide) mitattiin jatkuvatoimisena mittauksena luokista 1 ja 2 kohteessa 1 viikon ajan ennen interventiota ja yhdeksän kuukautta intervention jälkeen, ja kohteessa 2 viikon ajan ennen ilmanvaihdon parannusta ja kahden viikon ajan parannuksen jälkeen. Mittauslaite asetettiin opettajan pöydälle mahdollisimman lähelle luokan keskiosaa ja toisaalta mahdollisimman kauas opettajan hengitysvyöhykkeeltä.

Sisäilman homesienet

Sisäilman homesienet määritettiin sekä luokkien 1 ja 2 pinnoilta Minigrip-pusseilla pyyhkimällä kerätystä pölystä että ilmanvaihtokoneen poistoilmasuodattimesta kerätystä pölystä (Kuva 4).



Kuva 4. Ilmanvaihtokoneen poistoilmasuodatin ja siitä mikrobien viljelyä varten leikattu näytepala.

Vertailupöly kerättiin ulkoa mallasuuteagar-laskeumamaljoille. Pölynäytteet ja suodatinnäytteet viljeltiin mallasuuteagarilla 22 °C:ssa neljä viikkoa. Yksittäisten pesäkkeiden myrkyllisyyttä arvioitiin siansiittiöiden liikkuvuustestillä ja somaattisilla soluilla (M. A. Andersson et al. 2004, Bencsik et al. 2014). Toksisiksi osoittautuneet pesäkkeet identifioitiin suku- tai lajitasolle niiden ITS (internal transcribed spacer) -sekvenssien perusteella.

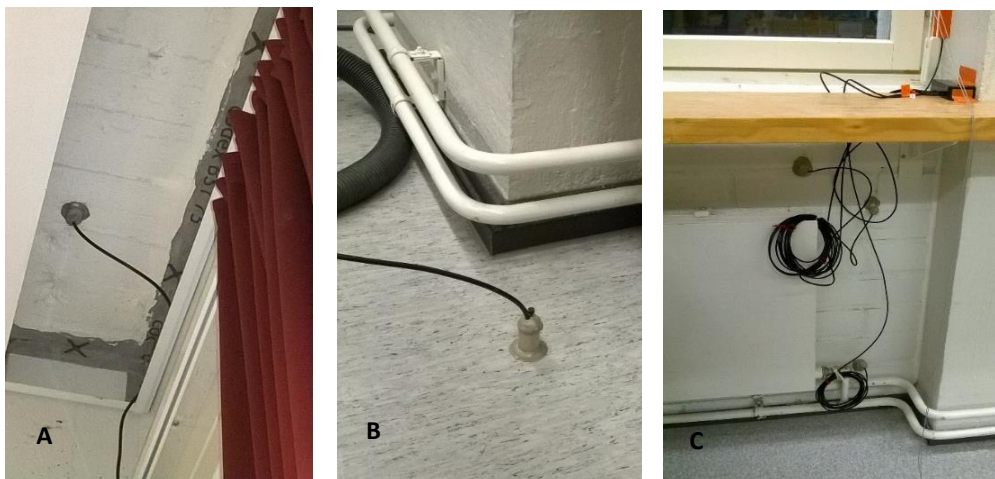
Sisäilmastokysely

Rakennuksen käyttäjien kokemia oire- ja olosuhdehaittoja kartoitettiin Työterveyslaitoksen (TTL) Sisäilmastokyselyllä (Örebro MM40) (K. Andersson 1998, K. Andersson, Stridh 1992). Kysely toteutettiin toukokuussa 2016 ennen ilmanvaihdon interventiota sekä tammikuussa 2017 intervention jälkeen. Koko koulun henkilökuntaa pyydettiin osallistumaan kyselyyn. TTL analysoi kyselyiden tulokset, ja tilastollisia eroja kahden eri kyselyn välillä tarkasteltiin Aalto-yliopistossa SPSS-ohjelmistolla khiin neliö -testillä.

Rakenteiden kosteustekninen toiminta

Rakenteiden olosuhdeseuranta toteutettiin jatkuvatoimisina mittauksina aikavälillä 27.10.2016 – 9.5.2017. Olosuhteita seurattiin kolmessa tilassa: ylipaineistetun rakennusosan luokkahuoneissa 1 ja 2 sekä tutkimusrakennusosan viereisessä verrokkitiilassa, jota palveli eri ilmanvaihtokone ja joka oli normaalissa ilmanvaihdon tilassa. Mittauksissa seurattiin sisä- ja ulkoilman välistä paine-eroa, sisä- ja ulkoilman olosuhteita sekä vaipparakenteiden kosteutta ja lämpötilaa.

Rakenteiden suhteellista kosteutta ja lämpötilaa seurattiin yhteensä kahdeksassa mittapisteessä. Luokassa 1 rakennusosan itäseinustalla oli kaksi mittapistettä ulkoseinässä ikkunan alapuolella ja yksi mittapiste alapohjan ja ulkoseinän liitoksessa (Kuva 5) sekä yksi mittapiste yläpohjan ja ulkoseinän liitoksessa. Luokassa 2 rakennusosan länsiseinustalla oli yksi mittapiste alapohjassa ja toinen yläpohjassa (Kuva 5). Verrokkitiilassa oli kaksi mittapistettä ulkoseinässä ikkunan alapuolella.



Kuva 5. Luokan 2 rakenteiden kosteuden- ja lämpötilan seurannan mittapisteet A) yläpohjassa ja B) alapohjassa. C) Luokan 1 rakenteiden kosteuden- ja lämpötilan seurannan mittapisteet eristerroksen sisä- ja ulkopinnassa ikkunan alapuolella sekä ulkoseinän ja alapohjan liitoksessa.

Lisäksi seurattiin sisä- ja ulkoilman välistä paine-eroa tiloissa 1 ja 2 sekä ulkoilman olosuhteita. Mittapisteet ja mitatut suureet on esitetty Taulukossa 3. Vaipparakenteiden

kosteusteknistä toimintaa ja konvektion vaikutusta tarkasteltiin mittaustulosten avulla sekä laskennallisesti Comsol Multiphysics -ohjelmiston avulla. Ylipaineen aikaansaamien konvektiovirtausten vaikutusta rakenteiden kosteuteen arvioitiin. Vaipparakenteista mallinnettiin alapohjan ja ulkoseinän sekä yläpohjan ja ulkoseinän liitos, joita tarkasteltiin talviolosuhteissa. Kyseisissä rakenneliittymissä on havaittu laajoja viivamaisia epätiiviyiskohtia, jotka mahdollistavat sisäilman kosteuden pääsyn rakenteisiin. Rakenneliittymien lämmön- ja kosteudensiirtymistä tarkasteltiin aluksi diffuusiona ja lopuksi tarkasteluun liitettiin epätiiviiin rakenneliitoksen kautta kulkeva konvektiovirtaus.

Taulukko 3. Mittapisteiden nimet, sijainnit ja mittayksiköt.

Tila	Mittapiste	Sijainti	Mittayksikkö
1	PE1	Ulko-sisäilma tuuletusikkunan kautta	Pa
1	T&RH1	Ulkoseinä ikkunan alla, eristekerroksen sisäpinta	°C, %, g/m ³
1	T&RH2	Ulkoseinä ikkunan alla, eristekerroksen ulkopinta	°C, %, g/m ³
1	T&RH3	Ulkoseinän ja alapohjan liitos, eristekerroksen ulkopinta	°C, %, g/m ³
1	T&RH4	Ulkoseinän ja yläpohjan liitos, eristekerroksen sisäpinta	°C, %, g/m ³
1	Sisäilma1	Sisäilma	°C, %
2	PE2	Tuuletusikkunan kautta	Pa
2	T&RH5	Alapohja, eristekerroksen sisäpinta	°C, %
2	T&RH6	Yläpohja, eristekerroksen sisäpinta	°C, %
2	Sisäilma2	Sisäilma	°C, %
V	T&RH7	Ulkoseinä ikkunan alla, ylöspäin, eristekerroksen ulkopinta	°C, %
V	T&RH8	Ulkoseinä ikkunan alla, alaspäin, eristekerroksen ulkopinta	°C, %
V	Sisäilma3	Sisäilma	°C, %
	Ulkoilma	Ulkoilma	°C, %

V = verrokkitiila

3.3.3 Hybridi-ilmanvaihdon tutkimus (tutkimuskohde I2)

Tutkimuskohteen kuvaus

Tutkimus suoritettiin helsinkiläisessä peruskoulussa, jossa työskenteli päivittäin noin 700 oppilasta ja 70 henkilökunnan edustajaa. Koulu oli rakennettu vuonna 2009 ja jo seuraavasta vuodesta alkaen siellä on ilmennyt sisäilman laatuun vaikuttavia ongelmia, kuten liian kosteana pinnoitettuja betonilaattoja, paikallisia vesivahinkoja, ilmanvaihdon ongelmia ja ilmavuotokohtia. Lukuisia tutkimuksia, selvityksiä ja korjauksia on tehty tähän päivään saakka. Silti rakennuksen omistajan Helsingin kaupungin Rakennetun omaisuuden hallinta -yksikön mukaan rakennuksessa oli edelleen ollut pitkittyneitä ongelmia sisäilman laadun ja ilmanvaihdon riittävyden kanssa.

Rakennuksen käyttäjät olivat raportoineet merkittävää sisäilman laatuun liittyvää epämukavuutta, tunkkaista ilmaa epämiellyttäviä hajuja erityisesti tutkitussa rakennusosassa. Hajut ja tunkkaisuus olivat helposti aistittavissa ensimmäisellä tutkimuskäynnillä. Useista tutkimuksista huolimatta oireiden ja huonon sisäilman syyt eivät olleet selvinneet, mutta niiden oletettiin mahdollisesti liittyvän rakennuksen ulkokuoren sisältä ilmavuotojen mukana kulkeutuviin epäpuhtauksiin.

Rakennuksessa oli kaksi eri ilmanvaihtojärjestelmää: koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä sekä puhallinavusteinen luonnollinen ilmanvaihto (hybridi-ilmanvaihto). Tutkimushanke keskittyi hybridi-ilmanvaihdolla varustettuihin tiloihin. Niihin kuului neljä rakennusosaa, joissa kussakin oli aulatila ja sen ympärillä kahdeksan luokahuonetta. Tutkimus tehtiin yhdessä ensimmäisen kerroksen rakennusosassa, jossa käyttäjät olivat raportoineet eniten sisäilman laatuun liittyviä oireita ja epämukavuutta viime vuosien aikana. Noin 30 % työntekijöistä työskenteli tässä rakennusosassa.

Tuloilma otettiin rakennuksen kellarikerroksessa sijaitsevalle tuloilmakoneelle raitisilmatornin kautta, jossa ilma myös suodattui (suodatin Kuvassa 6). Koneelliset tuloilmapuhaltimet (Kuva 6) oli suunniteltu tarpeenmukaista tilapäistä käyttöä varten, mutta sisäilman laadun ja ilmanvaihdon ongelmista johtuen ne olivat jatkuvassa käytössä 100 % teholla.



Kuva 6. Tuloilmakoneen suodatin (vasen kuva), tuloilman avustinpuhallin (oikea kuva).

Tuloilmakoneen jälkeen ilma lämmitettiin ja johdettiin raitisilmakammioon, jonka pystyleikkauksen poikkipinta-ala oli 2 m². Raitisilmakammio sijaitsi suoraan tutkitun rakennusosan alapuolella, ja jakautui kahteen käytävään, joista toinen oli suora ja toisessa oli kulma. Käytävillä sijaitsivat luokkakohtaisten tuloilmakanavien päät, joissa oli säädettävät sulkupellit. Suunnitelman mukaan sulkupellit olivat perustilassa 20 % auki, jolloin luokkiin virtasi perusilmanvaihtotarpeen mukainen määrä tuloilmaa. Suunniteltu tuloilmamäärä oli 8 L/s/hlö, ja yhteensä 2000 L/s koko rakennusosalle (kaksi kerrosta). Luokissa sijaitsevat hiilidioksidianturit ohjasivat säätöpeltejä avautumaan tarpeen mukaan lisää, kun luokan hiilidioksidipitoisuus ylitti noin 500 ppm.

Tuloilmakanavat päättyivät luokkiin suljettuun tilaan ikkunapenkin alle, jossa sijaitsi myös lämpöpatteri. Lämmennyt ilma kulkeutui luokkaan ikkunapenkin ritilöiden kautta, ja edelleen väliseinissä olevien äänenvaimentimilla varustettujen ritilöiden kautta aulatilaan. Aulasta ilma poistui painovoimaisesti poistoilmatornia pitkin ulos. Ilman kulkuväylät on esitetty Kuvassa 7.



Kuva 7. Tuloilmakanavan pää luokassa ikkunan alla sijaitsevassa tilassa (kuva ylhäällä vasemmalla), käytävään johtava siirtoilmasäleikkö luokan seinän yläosassa (kuva ylhäällä oikealla) ja poistoilmatornin ritilä aulassa (kuva alhaalla).

Koettua ja mitattua sisäilman laatua tutkittiin ennen ilmanvaihdon parannusta toukuussa 2016 sekä parannuksen jälkeen maaliskuussa 2017. Tutkimukset tehtiin pääosin kahdessa luokassa (luokat 1 ja 2), joissa käyttäjät olivat Helsingin kaupungin Rakennetun omaisuuden hallinta -yksikön mukaan raportoineet eniten oireita ja epämu-kavuutta. Luokat sijaitsivat vierekkäin, ja niitä voitiin käyttää myös yhdistettynä tilana välioven ansiosta. Aulassa ja muissa luokissa tehtiin lisäksi joitain yksittäisiä mittauksia.

Tutkimusmenetelmät

Tutkimuskohteessa käytetyt tutkimusmenetelmät ja -laitteistot on esitetty Taulukossa 2 kohdassa 3.3.2.

Ilmanvaihto

Ilmanvaihdon toimintaa tutkittiin hetkellisillä ja viikon kestäneillä paine-eromittauksilla, ilmamäärien mittauksilla sekä havainnoimalla tuloilmakanavien säätöpeltien toimintaa, kun luokkien hiilidioksidipitoisuutta nostettiin. Lisäksi mittauksia tehtiin erilaisissa tilanteissa, kun luokan/luokkien ovet olivat auki tai kiinni. Paine-ero rakennuksen ulkokuoren yli mitattiin luokissa 1 ja 2 viikon jatkuvatoimisena mittauksena ennen ilmanvaihdon parannusta ja kahden viikon mittauksena parannuksen jälkeen. Lisäksi paineenvaihtelua mallinnettiin yksinkertaisella mallinnuksella tutkitun rakennusosan

päällekkäin olevissa luokissa (luokka 1 ensimmäisestä kerroksesta ja sen yläpuolella toisessa kerroksessa sijaitseva pinta-alaltaan vastaava luokka).

Sisäilman laatu

Sisäilman laatua tutkittiin luokassa 2 VOC- ja TVOC- mittauksilla ennen ja jälkeen intervention vastaavasti kuin kohdassa 3.3.1. Sisäilman lämpötilaa, suhteellista kosteutta ja hiilidioksidipitoisuutta mitattiin jatkuvatoimisena mittauksena luokista 1 ja 2 viikon ajan ennen ilmanvaihdon parannusta ja kahden viikon ajan parannuksen jälkeen.

Sisäilman homesienet

Sisäilman homesienet määritettiin luokkien 1 ja 2 sekä aulan pinnoille laskeutuneesta pölystä Minigrip-pusseilla pyyhkimällä. Näytteet käsiteltiin ja analysoitiin kohdassa 3.3.2. kuvatulla tavalla.

Sisäilmastokysely

Rakennuksen käyttäjien kokemia oire- ja olosuhdehaittoja kartoitettiin Työterveyslaitoksen (TTL) Sisäilmastokyselyllä (Örebro MM40) vastaavasti kuin kohdassa 3.3.2.

3.4 Koerakennustutkimukset

Koerakennusten kuvaus

Tutkimukset suoritettiin Aalto-yliopiston Puunjalostustekniikan laitoksen vuonna 2011 rakennuttamissa puurakenteisissa koerakennuksissa, jotka sijaitsevat Espoon Otaniemessä. Koerakennukset ovat pinta-alaltaan yhtä suuria (10,1 m²), ulkoisesti identtisiä ja niissä on samanlaiset talotekniset varusteet. Rakennukset on esitetty Kuvassa 8.



Kuva 8. Koerakennukset sijaitsevat vierekkäin samansuuntaisesti aseteltuina Aalto-yliopiston Materiaalitekniikan laitoksen edessä (Alapieti 2016).

Rakennuksista kaksi on rakennettu käyttäen pystypuita ja kattotuoleja. Sisätilan pintamateriaalina toisessa on käytetty kipsilevyjä ja toisessa kuusivaneria. Kolmannen rakennuksen kantavana rakenteena ja sisätilan pintamateriaalina ovat rakennuksen sisäpintaan asennetut lamellihirret (Kuva 9). Kaikissa rakennuksissa käytetyt lattiaelementit ovat samanlaisia ja lattioiden sisätilaan rajoittuvana materiaalina on käytetty kuusilankkuja. Koerakennuksien sisätilojen pinnat ovat päällystämättömiä lukuun ottamatta kuusilattioita, jotka ovat osittain päällystetyt ja samanlaiset kaikissa rakennuksissa. Rakenteiden tiivyydet (ilmanvuotoluku n50 noin $0,6 \text{ h}^{-1}$) ja lämmöneristävyydet on mitoitettu kaikissa rakennuksissa samanlaisiksi passiivitalojen vaatimuksien (Passive House Standard) mukaisesti (Winter, Schulte-Wrede & Jebens 2012).



Kuva 9. Hirsistä rakennettu koerakennus pystytysvaiheessa (Winter et al. 2012).

Tutkimusmenetelmät

Koerakennuksien sisäilman laatua mittaavat tutkimukset toteutettiin jatkuvatoimisilla online-mittauksilla sekä VOC-näytteillä. Sisäilman laadun mittausdatan ja ihmisen kokeman sisäilman laadun korrelaation selvittämiseksi koerakennuksissa järjestettiin aistinvarainen arviointi vapaaehtoisista osallistujista kootulla hajupaneelilla.

Online-mittauksilla kerättiin reaaliaikaisesti tietoa sisäilman laadusta pidemmällä aikavälillä. Sisäilman orgaanisten ja epäorgaanisten kaasujen sekä lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaamisessa käytettiin TG 501- ja IQ 610 -antureita. Formaldehydipitoisuutta mitattiin FM-801 -anturilla.

VOCien hetkelliset pitoisuudet mitattiin ilmanäytteillä Tenax TA-näyteputkiin (40 minuutin näyte, näytteen ilmamäärä 8 l). Näytteet analysoitiin TD-GC-MS -laitteistolla ja VOC-pitoisuudet laskettiin tolueeniekvivalenttina standardin ISO 16000-6 mukaisesti.

Ennen kokeiden alkamista sisäilman laadun lähtötaso mitattiin ilmanäytteillä, sillä koerakennukset olivat olleet käyttämättöminä ilman lämmitystä ja ilmanvaihtoa joulukuusta 2013 lähtien. Lähtötason mittausaikana koerakennukset olivat lämmitettyjä, mutta ilmanvaihto oli edelleen poissa käytöstä.

Aistinvarainen arviointi toteutettiin standardin (ISO 16000-30:2012) pohjalta kouluttamattomalla paneelilla. Osallistujat arvioivat koerakennuksien sisäilman laatua liukuvalla asteikolla -1:stä 1:een, arvon -1 tarkoittaessa sisäilman laadun olevan mahdoton hyväksyä ja arvon 1 tarkoittaessa täysin hyväksyttävää sisäilmaa. Koerakennuksien aistinvarainen arviointi järjestettiin ennen eri ilmanvaihtotasolla tehtyjen sisäilmamittauksien aloittamista 9.2–10.3.2016. Standardin mukainen vastauslomake on esitetty Kuvassa 10.

MATERIAALIEN AISTINVARAINEN TESTAUS

Näyte: _____
 Päivämäärä: _____
 Testaaja: _____

Testihuoneen ilmanlaatu

hyväksyttävä
 ei hyväksyttävä

Kuvittele, että viettäisit päivittäin useita tunteja hengittäen huoneen ilmaa. Onko huoneen ilma hyväksyttävää vai ei? Vedä viiva asteikolle kohtaan, joka vastaa arviointiasi. Täytä lisäksi tarvittaessa tuoksun kuvaustaulukko ja vapaamuotoinen kommentti.

TULOKSET

Hajun kuvaus:

hyvä	<input type="checkbox"/>
miellyttävä	<input type="checkbox"/>
tydyttävä	<input type="checkbox"/>
epämiellyttävä	<input type="checkbox"/>
sietämätön	<input type="checkbox"/>
puinen	<input type="checkbox"/>
metallinen	<input type="checkbox"/>
makea	<input type="checkbox"/>
hajuton	<input type="checkbox"/>
muovinen	<input type="checkbox"/>
liimamainen	<input type="checkbox"/>
raikas	<input type="checkbox"/>
kosteaa	<input type="checkbox"/>
kuiva	<input type="checkbox"/>
palnostava	<input type="checkbox"/>
tunkkainen	<input type="checkbox"/>
pistävä	<input type="checkbox"/>
muu, mikä:	_____

Kommentti: _____

Kuva 10. Koerakennuksien aistinvaraisessa arvioinnissa käytetty vastauslomake.

Ilmanvaihdon vaikutusta sisäilman laatuun tutkittiin mitoittamalla koerakennuksien ilmanvaihtokoneisiin asetukset kolmelle ilmanvaihtotasolle. Ilmanvaihdon ulkoilmavirran alkutasona käytettiin arvoa 0,5 L/s/m² ja seuraavilla tasoilla ulkoilmavirran määrä kaksinkertaistui edelliseen tasoon verrattuna, jolloin ulkoilmavirtojen arvoiksi tulivat 1,0 L/s/m² ja 2,0 L/s/m². Ilmavirtojen tarkistusmittauksissa havaittiin, että toteutuneet ilmavirrat olivat tavoitearvoja pienempiä (Taulukko 4).

Taulukko 4. Ilmanvaihdon toteutuneet ilmavirrat koerakennuksissa eri tavoitetasoilla (Alapieti 2016).

Tavoitetaso [l/s/m ²]	Koerakennus 1 (kuusivaneri)			Koerakennus 2 (kipsilevy)			Koerakennus 3 (hirsi)		
	0,5	1,0	2,0	0,5	1,0	2,0	0,5	1,0	2,0
Toteutunut tuloilmavirta [l/s/m ²]	0,53	0,86	1,61	0,42	0,92	1,83	0,37	0,74	1,54
Toteutunut poistoilmavirta [l/s/m ²]	0,52	1,02	1,92	0,49	1,03	1,99	0,48	0,95	1,97

Sisäilmanlaadun mittaukset eri ilmanvaihtotasolla suoritettiin aikavälillä 10.3–2.5.2016. Online-mittaukset olivat käynnissä yhdessä koerakennuksessa kerrallaan kaikilla ilmanvaihtotasolla siten, että mittaustuloksia saatiin kerättyä vähintään neljältä vuorokaudelta ennen ilmanvaihtotason muuttamista. Ilmanäytteet otettiin yhtäaikaaisesti kaikista koerakennuksista kyseisen ilmanvaihtotason viimeisenä käyttöpäivänä.

3.5 Kammiotutkimukset

Laboratoriotutkimukset pinnoitteiden vaikutuksista puumateriaalien emissioihin, muovimattojen emissioista ja ilmanvaihdon vaikutuksesta emissioihin toteutettiin materiaalipäästöjen mittaamiseen kehitetyissä testikammioissa soveltaen standardeja (ISO 16000-9:2006), (ISO 16000-6:2011 2011) ja (ISO 16000-3:2011) sekä Rakennusmateriaalien päästöluokituksen M1-protokollaa rakennusmateriaalien testaamiseen (Sisäilmastoluokitus 2008).

Tutkimukset koostuivat kahdesta eri tutkimuskokonaisuudesta, joista kammiotutkimukset K1 tehtiin Aalto-yliopiston Rakennustekniikan laitoksella ja kammiotutkimukset K2 Itä-Suomen yliopiston Ympäristötieteiden laitoksella. Eri tutkimuskokonaisuuksissa käytetyt koekammiot ja -materiaalit erosivat osittain toisistaan. Kammioiden ilmanvaihdot ja koekappaleiden koot olivat kuitenkin samankaltaiset suhteutettuna kammioiden kokoon, joten tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään.

Tutkimussarjat suoritettiin seuraavan järjestyksen mukaisesti:

- Kammioiden puhdistus
- Näytteet puhtauden todentamiseksi
- 0-näytteet: Karbonyylit ja VOC
- Koekappaleiden asettaminen kammioiden
- 0 vrk: VOC
- 1 vrk: Karbonyylit ja VOC
- 3 vrk: VOC (kammiotutkimuksissa K1 myös karbonyylit)
- 7 vrk: VOC
- 14 vrk: VOC
- 28 vrk: Karbonyylit ja VOC

3.5.1 Maalattun ja lakatun puun emissiot (kammiotutkimukset K1)

Pinnoitettavana materiaalina käytettiin mäntypuulautaa kahdella eri lähtötilanteen kosteuspuhtausasteella, ja pinnoitteina käytettiin viittä eri maalia ja yhtä lakkaa. Referenssikappaleina olivat pinnoitteilla käsitellyt lasilevyt ja maalaamattomat puukappaleet. Puukappaleet leikattiin kahdesta erillisestä puulaudasta, jotka oli hankittu rautakaupasta (Puu A ja Puu B). Koekappaleet stabiloitiin sääkammiossa, jonka lämpötila oli 20 ± 1 °C. Ensimmäiset koekappaleet stabiloitiin 50 ± 5 %:n suhteellisessa kosteudessa ja seuraavat koekappaleet 80 ± 5 %:n suhteellisessa kosteudessa. Näin saatiin puukoekap-

paleille kosteuspitoisuudet, jotka olivat noin 10 % ja noin 16 %. Materiaalit pääominaisuuksineen on listattu Taulukkoon 5.

Taulukko 5. Tutkimusmateriaalit ominaisuuksineen.

Materiaali	Ominaisuudet	Luokittelu ¹⁾
Mäntypuu	Hiottu puulauta, 145 x 194 mm ²	M1
Maali 1	Vesipohjainen alusmaali	M1
Maali 2	Vesipohjainen akrylaattimaali	M1
Maali 3	Vesipohjainen akrylaattimaali	N/A
Maali 4	Vesipohjainen akrylaattimaali	M1
Maali 5	Vesipohjainen akrylaatti lateksimaali	M1
Lakka 1	Vesipohjainen akrylaattilakka	M1
Lasilevy	Inerti alusta	N/A

¹⁾ Tuotteet kuuluvat M1-luokkaan. TVOC-emissioiden raja-arvo M1-luokkaan kuuluville materiaaleille on 200 µg/m³h 28. testipäivänä. N/A: tietoa ei saatavilla.

Puukappaleiden taustapuoli ja reunat peitettiin vähäpäästöisellä itsekiinnittyvällä alumiiniteipillä. Puukappaleille ja lasialustoille levitettiin kaksi maalikerrosta vaahtomuovitelalla. Tavoitemäärät maaleille laskettiin valmistajan riittoisuusarvioiden (m²/l) mukaan. Alusta punnittiin ilman maalia ja useasti maalauksen aikana, jotta saavutettiin maalin tavoitemäärä 15 %:n marginaalilla. Koekappaleiden annettiin kuivua ennen toisen maalikerroksen lisäämistä tuotevalmistajan ohjeiden mukaan.

Koekappaleet (maalaamaton puu, maalattu puu ja maalattu lasialusta) sijoitettiin välittömästi toisen maalikerroksen lisäämisen jälkeen erillisiin koekammioihin 28 vuorokaudeksi. Koekammiot (6 kpl) on suunniteltu ja rakennettu standardin ENV 13419-1 1999 mukaan (Wirtanen 2006). Kammio on esitetty Kuvassa 11.



Kuva 11. Koekammiot kammiotutkimuksissa K1.

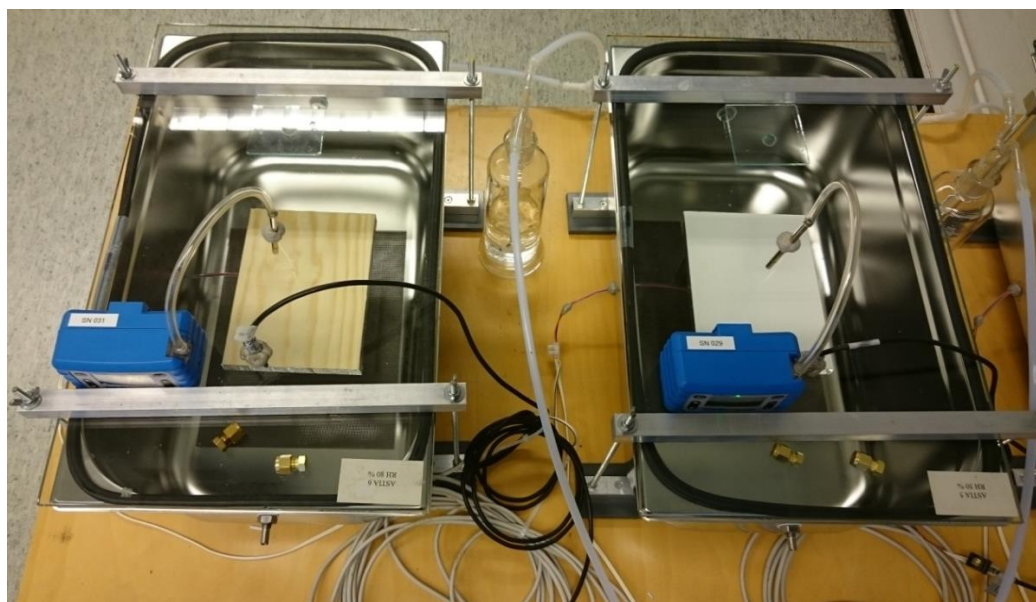
Kammioihin tuleva ilma suodatettiin aktiivihieillä, partikkelisuodattimella sekä öljy- ja kosteuserottimilla. Kammioiden olosuhteet olivat kontrolloidut ja keskenään samantyyppiset (Taulukko 6). Suhteellista kosteutta ja lämpötilaa seurattiin antureilla kokeiden aikana.

Taulukko 6. Kammion olosuhteet emissiokokeiden aikana.

Koekammion olosuhteet	
Näytteen pinta-ala (m ²)	0,03
Tilavuus (m ³)	0,03
Kuormituskerroin (m ² /m ³)	1,0
Lämpötila (°C)	21 ± 2
Kosteus (%)	50 ± 5 %
Ilmamäärä (ml/min)	225 ± 5 %
Ilmanvaihtokerroin (h ⁻¹)	0,5

Ilmanäytteet kerättiin keskeltä koekammiota suoraan koemateriaalin yläpuolelta (Kuva 12). VOC-yhdisteet kerättiin Gilian GilAir Plus -ilmapumpulla Tenax TA -adsorbenttiputkiin keräysnopeudella 150 ml/min. VOC-näytteet kerättiin viisi kertaa 28 vuorokautta kestävän kokeen aikana päivinä 1, 3, 7, 14 ja 28. Kerättävä ilmamäärä määritettiin erikseen jokaiselle näytteenotokerralle, jolloin ilmamäärää suurennettiin kokeiden loppua kohti 0,45 litrasta 6 litraan. Koekammioiden tausta-arvot määritettiin 6 litran ilmanäytteillä. VOC-yhdisteet analysoitiin kaasukromatografisin menetelmin TD-GC-MS (Thermal desorption - gas chromatography - mass spectrometry) -laitteistolla. Yhdisteet tunnistettiin käyttäen 50 standardiyhdistettä (Sigma Aldrich) ja NIST 2011-massaspektrometri tietopankkia. Tulokset analysoitiin tolueeniekvivalenteina. Yksittäisen yhdisteen havaintojen raja-arvo oli noin 1 µg/m³. TVOC-arvo laskettiin niin, että se sisälsi kaikki havaitut yksittäiset VOC-yhdisteet.

Karboonylinäytteet kerättiin Gilian GilAir Plus -ilmapumpulla Sep-Pak XPosure DNPH (2,4-dinitrophenylhydrazine) -patruunaan. Näytteet kerättiin keräysnopeudella 150 ml/min testipäivinä 1, 3 ja 28. Karboonyleistä analysoitiin formaldehydi, asetaldehydi ja asetoninestekromatografisesti HPLC (High Performance Liquid Chromatography) -laitteistolla pinnoitevalmistajan omassa laboratoriossa.



Kuva 12. Koekammiot ja koejärjestelmä. VOC-yhdisteiden keräys ilmapumpulla Tenax TA -adsorbenttiputkiin maalaamattomasta ja maalatusta puukoekappaleesta.

3.5.2 Maalattun puun ja muovimattojen emissiot ja ilmavaihdon vaikutus emissioihin (kammiotutkimukset K2)

Tutkimuskokonaisuudessa suoritettiin kolme erillistä 28 päivän mittausarjaa, joiden aikana kammioista otettiin karbonyyli- ja VOC-näytteitä. Ensimmäisessä ja kolmannessa kammiokokeessa materiaaleina käytettiin höylättyä mäntylautaa, pohja- ja pintamaalilla maalattua mäntylautaa sekä referenssinä pohja- ja pintamaalia maalattuna lasilevyille. Toisessa kammiokokeessa materiaaleina käytettiin kolmea erilaista muovimattoa. Kokeissa käytetty mäntylauta oli rautakaupasta hankittua, elokuun 2016 alussa sahattua, PFCE-sertifioitua oksamäntyä. Pohjamaalina käytettiin puun uuteaineiden läpäisyä estävää valkoista maalia ja pintamaalina sille soveltuvaa vesiohenteista maalia. Tutkittavat muovimatot olivat asuinrakennuksiin tarkoitettu matto A, julkisiin rakennuksiin soveltuva matto B ja erikoistiloihin, kuten sairaalaympäristöön, soveltuva matto C.

Tutkimusten ajankohdat, tutkitut materiaalit ja kammioiden olosuhteet esitetään Taulukossa 7. Koska ensimmäisessä kokeessa oli käytetty virheellisesti liian vähäistä ilmanvaihtoa, tehtiin kolmas koe samoilla materiaaleilla mutta tehokkaammalla ilmanvaihdolla.

Taulukko 7. Kammiokokeiden aikataulu, koekappaleet, ympäristöolosuhteiden vaihteluvälit ja tehdyt mittaukset.

	1. Kammiokoe	2. Kammiokoe	3. Kammiokoe
Ajankohta	15.11.–14.12.2016	24.2.–30.3.2017	19.4.–23.5.2017
Koekappaleet	Maali ja mäntylauta	Muovimatot	Maali ja mäntylauta
Lämpötila (C°)	22,1–23,3	20,5–22,9	21,4–24,0
RH (%)	26,6–75,8	38,0–56,5	38,8–52,3
Ilmavirtaus (ml/min)	144–460	1001–1050	1000–1006
Ilmanvaihtokerroin (h ⁻¹)	0,07–0,23	0,5	0,5

Kammiot oli valmistettu ruostumattomasta teräksestä ja ne olivat tilavuudeltaan 120 litraa. Kammioihin johdettiin aktiivihilisuodattimen läpi puhdistettua paineilmaa. Ilmavirtaus säädettiin massailmavirtasäätimillä 1 l/min, jolloin ilmavirtauksella saatiin aikaan ilmanvaihtokerroin 0,5 h⁻¹. Paineilman suhteelliseksi kosteudeksi säädettiin 50±5 % johtamalla osa paineilmaasta puhdistetun veden läpi. Kammioiden lämpötila pidettiin 23±1 °C:ssa säätämällä huoneilman lämpötilaa. Kammiot on esitetty Kuvassa 13.

Ensimmäisessä koesarjassa suhteellisen kosteuden ja lämpötilan pitäminen tasaisena ei onnistunut toivotusti. Vasta kokeen lopussa havaittiin, että massailmavirtasäätimet eivät toimineet odotetulla tavalla ja kammioihin menevä ilmavirta oli vain puolet tai vähemmän halutusta. Lisäksi huomattiin, etteivät kammiot olleet täysin tiiviitä. Korjausten jälkeen toisessa ja kolmannessa koesarjassa ilmavirtaukset ja olosuhteet saatiin pysymään tasaisina.



Kuva 13. Koekammiot suljettuina ensimmäisen koesarjan alussa. Kammioiden päällä on vesiasiat, joiden läpi osa paineilmasta johdettiin sopivan suhteellisen kosteuden saavuttamiseksi. (Nuutinen 2017)

Kammiot puhdistettiin ennen kokeiden alkamista pyyhkimällä sisäpinnat asetonilla. Ennen toisen koesarjan aloittamista kammiot pyyhittiin sisäpuolelta asetonilla ja heksaanilla, ja kammioiden annettiin huuhtoutua paineilmalla useita päiviä. Kammiota ei saatu täysin puhtaiksi ensimmäisen kokeen jäljiltä (TVOC-pitoisuus $12,5 - 83,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Tämän vuoksi ennen toisen koesarjan aloittamista tehtiin ns. pullokoe, jolla varmistuttiin, ettei seuraavassa kokeessa käytettävistä materiaaleista emittoitunut samoja yhdisteitä kuin kammioiden sisällä oli kontaminaationa ensimmäisen kokeen jäljiltä. Pullokokeessa tilavuudeltaan yhden litran lasipulloihin laitettiin tutkittavista muovimatoista $5 \times 5 \text{ cm}^2$ palat, ja pulloihin johdettiin hiilivetyvapaata paineilmaa. Poistoilmasta määritettiin mitkä VOC-yhdisteitä muovimatoista emittoitui. Matoista ei emittoitunut samoja yhdisteitä, joita oli jäänyt kammioiden sisällä ensimmäisen koesarjan jäljiltä. Ennen kolmatta kammiokoetta kammiot pyyhittiin sisäpuolelta asetonilla, mikä riitti puhdistamaan kammiot hyvin.

Koekappaleet olivat kooltaan $14 \times 43 \text{ cm}^2$ ja niitä oli aina yhdessä kammiossa kaksi kappaletta. Koekappaleet asetettiin kammioiden sisälle metallisiin ritilikköihin niin, että koekappaleet olivat päällekkäin ja ilmavirta pääsi kulkemaan kappaleiden pinnalla vapaasti (Kuva 14). Koekappaleiden sivut ja alapuoli teipattiin alumiiniteipillä, jotta ympäröivän ilman kanssa kosketuksissa oli vain yksi pinta.



Kuva 14. Näytekappaleet on asetettu keskelle kammiota, niin että ilmavirta pääsee kulkemaan vapaasti kappaleiden pinnalla. (Nuutinen 2017)

Mittausmenetelmät ja näytteiden analysointi

Karboonyyli- ja VOC-näytteet otettiin kammiosta poistuvasta ilmasta, minkä lisäksi VOC-näytteitä otettiin myös kammioiden menevästä ilmasta sekä laboratorion ilmasta.

Karboonyylinäytteet otettiin DNPH-keräimiin (Waters). Karboonyylinäytteiden keräämiseen käytettiin ASEA-pumppua ja Metal work pneumatic -virtauksen säädintä. Näytteenkeräyksen tilavuusvirtana käytettiin 500 ml/min ja yhden näytteen keräysaika oli 2 h. Pumppu kalibroitiin Buck-saippuakuplakalibraattorilla (A. P Buck).

VOC-näytteet kerättiin Tenax Ta -keräimiin (Buchem BV). Näytteiden ottoon käytettiin Airchek 3000 -pumppuja (SKC). Tilavuusvirtana käytettiin 125-150 ml/min ja näytteiden keräysajat olivat 10, 15, 20 tai 30 min. Pumput kalibroitiin Buck-saippuakuplakalibraattorilla.

Karboonyylinäytteet uutettiin DNPH-keräimistä 3 ml asetonitriliä (VWR chemicals, 0,79 kg/l). Standardeina käytettiin 24.2.2015 valmistettuja ketoni- ja aldehydyhdisteiden muodostamia dinitrofenyylihydratsonijohdosten -kantaliuoksia. Kantaliuoksista tehtiin 1:10 laimennokset asetronitriliin. Karboonyylinäytteet analysoitiin nestekromatografilla (HPLC hp Hewlet Packard series 1090 Liquid chromatograph). Nestekromatografissa käytettiin ZORBAX XDB-C8 -kolonnia (4,6 mm * 150 mm * 5 µm).

VOC-yhdisteiden standardina käytettiin 15.12.2014 valmistettua VOC-standardia, jossa yhdisteiden pitoisuus on 50 µg/ml. VOC-näytteet ja standardit analysoitiin käyttäen termalisella desorptiolaitteistolla (Markes TD-100) varustettua kaasukromatografia (Agilent technologies 7890A), joka oli kytketty massaselektiiviseen detektoriin (Agilent Technologies 5975C). Kaasukromatografian kolonnina käytettiin HP5-MS kapillaarikolonnia (50 m * 200 µm * 0,33 µm).

Karboonyylinäytteistä analysoitiin formaldehydi, asetraldehydi, akroleiini, asetoni, propaani, butanoni ja butanaali. Näytteistä saadut vasteet käsiteltiin Chemstation for LC systems -ohjelmalla (B.03.02 [341], Agilent technologies) ja pitoisuus ilmassa (µg/m³)

laskettiin taulukkolaskentaohjelmalla (Microsoft excel).

VOC-näytteistä saadut vasteet käsiteltiin Data Analysis -ohjelmalla (Enhanced ChemStation, MSD ChemStation E.02.01.1177, Agilent Technologies). Yhdisteet tunnistettiin vertaamalla massaspektrejä analyysiohjelman kirjaston (NST11.L) massaspektreihin. VOC-yhdisteiden emissionopeus pinta-alaa kohti ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) ja TVOC-emissio ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) laskettiin taulukkolaskentaohjelmalla (Microsoft excel).

4. Tulokset ja tulosten tarkastelu

Eri osa-alueiden tuloksia on käsitelty tarkemmin hankkeen aikana tuotetuissa tieteellisissä julkaisuissa ja opinnäytetöissä, jotka on listattu luvussa Tutkimushankkeen julkaisut.

4.1 Kirjallisuuskatsaus

4.1.1 Sisäilmaongelmat kouluissa ja päiväkodeissa

Sisäilman huono laatu on yksi suurimmista ympäristöterveysongelmista, ja kosteusvaurioita tai ilmanvaihdon ongelmia on raportoitu yli 50 %:ssa koulurakennuksista (Reijula et al. 2012). Yleisimpiä sisäympäristöongelmien aiheuttajia ovat riittämätön ilmanvaihtuvuus tai veto, liian korkea tai matala lämpötila tai kuiva sisäilma. Sisäilman laatua heikentävät myös fysikaaliset, kaasumaiset ja hiukkasmaiset epäpuhtaudet (Salonen 2009).

Sisäilmaongelmat aiheuttavat paitsi henkilökohtaisia vaikeuksia myös taloudellisia seurauksia kunnille ja valtiolle. Huonoimmassa tapauksessa suuria rakennuksia päädyttään sisäilmaongelmien vuoksi useiden korjausten jälkeen purkamaan ja rakentamaan uudelleen, mikä on taloudellisesti ja materiaalikulutuksen kannalta turhauttavaa ja kulluttaa huomattavasti julkisia varoja (Reijula et al. 2012). Erityisesti mikrobivaurioituneiden rakenteiden purkutyöt ovat kunnille vaativia ja pitkiä prosesseja (Levänen 2016).

Sisäilman laatu vaikuttaa niin oppilaiden kuin opettajien hyvinvointiin koulussa (Ervasti et al. 2012, Wargocki, Wyon 2017). Lapset ovat aikuisia alttiimpia huonon sisäilman aiheuttamille terveysvaikutuksille, minkä vuoksi koulujen ja päiväkotien sisäilma ansaitsee erityisen huomion. Näissä paikoissa lapset viettävät kodin jälkeen eniten aikaa vuorokaudessa. Astma ja allergia ovat lisääntyneet lapsilla hälyttävästi viimeisten vuosikymmenien aikana. Altistuminen riskitekijöille kouluympäristössä on todennäköisesti yhteydessä lasten astmaattiseen oireiluun (Smedje, Norbäck 2003, Kim et al. 2007).

Sisäilmaongelmat aiheuttavat oireita laajalti silmien kutinasta aina vaikeaan astmaan ja keuhkokuumeeseen asti. Yleisimpiä oireita ovat esimerkiksi käheys, yskä, nuha, päänsärky, väsymys ja limakalvojen kuivuus. Lievimpiä, esimerkiksi flunssan kaltaisia, oireita voi olla vaikea yhdistää sisäilmaongelmiin, jolloin ongelmien syyt jäävät korjaamatta. Toisaalta vakavienkaan sairauksien, kuten syövän ja neurologisten sairauksien, suoraa yhteyttä sisäilmaongelmiin ei ole kyetty osoittamaan. Koetut oireet ja haitat

ovatkin hyvin yksilöllisiä, mikä osaltaan vaikeuttaa ongelmien selvittämistä, ja vastustuskyvystä riippuvien yksilöllisten erojen takia sairauksien selvää yhdistämistä sisäilmaongelmiin on vaikeaa tehdä. Kuitenkin varsinkin astmaa ja muita hengitysteiden sairauksia on huomattu esiintyvän enemmän sisäilmaongelmaisissa rakennuksissa, mikä antaa selvää tilastollisesti pätevää näyttöä sisäilmaongelmien vaikutuksista terveydelle (Pekkanen, Lampi 2015).

Koulujen sisäympäristöt ovat usein monimutkaisia kokonaisuuksia ja sisältävät useita toisiinsa liittyviä, sisäympäristön laatuun ja käyttäjien hyvinvointiin vaikuttavia tekijöitä (Salthammer et al. 2016a, Smedje, Norbäck 2003, de Gennaro et al. 2014). Luokkien olosuhteet on yhdistetty muun muassa opettajien hengitysteiden oireisiin (Claudio, Rivera & Ramirez 2016), ja oireet esimerkiksi pölyisyyteen, homeeseen ja homeen hajuun, maalien hajuun ja tunkkaiseen kuivaan ilmaan (Magnavita 2015, Kielb et al. 2015). Likainen tai pölyinen ilmanvaihtojärjestelmä on sisäilman epäpuhtauksien lähde, ja koulu- ja päiväkotirakennukset kärsivät usein puutteellisesta tai epätasapainoisesta ilmanvaihdosta, mikä aiheuttaa oireilua ja valituksia.

Koska sisäilmaongelmien mahdollisia lähteitä on useita, niiden jäljittäminen rakennuksessa voi olla hankalaa. Korjausten onnistuminen riippuu useasta tekijästä (Haverinen-Shaughnessy et al. 2008). Jos esimerkiksi rakenteissa tai alapohjassa olevia epäpuhtauksia ei onnistuta poistamaan, voivat sisäilmaongelmat jatkua korjausten jälkeen. On huomattava, että myös sisäympäristön muut viihtyisyshaitat, kuten materiaaleihin liittyvät tai muut hajut, melu, valaistus tai ilmanvaihdosta johtuvat veto, kuumuus, kylmyys tai kuiva ilma voivat heikentää viihtyvyyttä ja pahentaa huonoa kokemusta sisäilman laadusta. Psykososiaaliset tekijät liittyvät myös sisäilmaongelmien kokemiseen. Tämä voi vaikeuttaa ongelmien alkuperäisten syiden löytämistä ja menestyksekkästä korjaamista, ja toisaalta myös heikentää oireilusta kärsivien asemaa.

Koulu- ja päiväkotirakennusten terveydellisiä olosuhteita valvoo terveydensuojeluviranomainen ja korjaamisesta vastaavat kotikunnat. Tyypillisesti ongelmahavainnosta kerrotaan ensimmäiseksi työterveyshuollolle, joka arvioi oireilun liittymisen mahdollisiin työympäristössä oleviin riskitekijöihin (Latvala et al. 2017). Kun ongelmista raportoida esimiehelle, hän raportoi havainnoista edelleen isännöitsijälle, joka tilaa tarvittavat korjaukset tai selvitykset ja ohjaa asian tarvittaessa eteenpäin kunnan tai kaupungin sisäilma-asiantuntijalle. Korjausten suunnittelijana voi toimia esimerkiksi kaupungin oma suunnitteluyksikkö tai yksityinen konsultti. Lisäksi kunnalla voi olla sisäilmatyöryhmä, johon kuuluvat muun muassa työsuojelun ja työterveydenhuollon edustajia sekä sisäilma-asiantuntijoita. Työryhmän tehtävänä on sisäilman laadun ja ratkaisuprosessien kehittäminen. Sisäilmatyöryhmä voidaan perustaa myös yksittäiselle kohteelle vaikeassa sisäilmaongelmatapauksessa. (Salonen et al. 2011, Lappalainen et al. 2017)

4.1.2 Ilmanvaihto sisäympäristön laadun osatekijänä

Energiatohokkuusvaatimusten vuoksi uudisrakentamisessa siirrytään vähitellen kohti nollaenergiarakennuksia, mikä tarkoittaa entistä tiiviimpiä rakenteita ja ilmanvaihdon tarkkaa optimointia. Uusissa rakennuksissa vallitseva ilmanvaihtosysteemi on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto. Vähäpäästöiset materiaalivalinnat ja rakennuksen ke-

mikaalikuorman minimointi ovat tiiviissä rakennuksissa entistäkin tärkeämpi tekijä sisäilman laadun kannalta, sillä mahdolliset kohonneet pitoisuudet eivät pääse poistumaan sisätilasta tiiviiden rakenteiden tai ikkunatuuletuksen kautta.

Ilmanvaihdolla ja sisäilman lämpö- ja kosteusolosuhteilla on merkittävä vaikutus sisäilman laatuun, ihmisten kokemuksiin ja hyvinvointiin sekä tuottavuuteen (Fang et al. 2004, Wargocki et al. 2000). Viimeaikaisen tutkimuksen mukaan 58 % suomalaisista kouluista kärsi huonosta ilmanvaihdosta (Toyinbo et al. 2016). Kohonneen hiilidioksidipitoisuuden yhteydestä käyttäjien hyvinvoinnin ja toimintakykyyn heikkenemiseen opiskelutilanteessa on tehty paljon tutkimuksia (Muscatiello et al. 2015), samoin kuin riittävien tuloilmamäärien merkityksestä oireiden vähentämiseksi (Carrer et al. 2015, Sundell et al. 2011) ja ilmapurkauksen vaikutuksista oppimissuorituksiin (esim. Shaughnessy et al. 2006, Koskela et al. 2014). Myös sisäilman lämpötila vaikuttaa merkittävästi koettuun sisäilman laadun hyväksyttävyyteen, mielialaan ja työskentelyhalukkuuteen (Lan et al. 2011, Fang 1998). Perusteelliset ilmanvaihtotutkimukset tuleekin sisällyttää jokaiseen sisäilman laadun tutkimukseen (Carrer et al. 2015).

Ilmatiiiviissä rakennuksissa, joissa on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto, järjestelmän tasapainotus ja paine-erojen hallinta ovat välttämättömiä (Kalamees 2010, Leivo et al. 2015). Ilmanvaihdolla on suuri merkitys epäpuhtauksien siirtymisessä tilasta toiseen. Negatiivinen paine-ero voi aiheuttaa ilmavirtauksia, joiden mukana sisäilmaan voi päästä epäpuhtauksia, kuten sieni-itiöitä, jotka aiheuttavat käyttäjien oireilua (Sepänen, Fisk 2004, Airaksinen, Pasanen et al. 2004, Airaksinen, Kurnitski et al. 2004). Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen korjauksessa tällaisten ilmavirtausten estäminen, kuten perusteellinen ilmanvaihtojärjestelmän hallinta kokonaisuudessaan, on erittäin tärkeää (Meklin et al. 2005).

Ilmanvaihto mitoitetaan ulkoilmaan nähden hieman alipaineiseksi, jotta sisäilman kosteuden mahdollinen tiivistyminen rakenteisiin estetään. Sisätilojen voimakas alipaine voi kuitenkin vetää epäpuhtauksia sisältävää ilmaa rakenteiden ilmapuotokohdista sisätilaan. Käytännössä rakenteista löytyy lähes aina ilmapuotokohtia, jotka heikentävät ilmanvaihtojärjestelmän hallittavuutta (Asikainen, Asikainen & Peltola 2008). Tyypillisiä epätiiviyksikohtia ovat nurkat, liitokset ja ikkunoiden ja ovien liittymät. Esimerkiksi lattian liitoskohdista sisäilmaan pääsevät alapohjan eristemateriaalin kuidut ja pölyt voivat aiheuttaa ärsytysoireita iholla, silmissä sekä hengitysteissä, ja ikkunaliitosten epätiiviyys voi aiheuttaa vedon tunnetta. Varsinkin kaupunkialueilla rakennuksen lähistön työmaista ja liikenteestä leviävät terveydelle haitalliset pölyt voivat levitä sisätiloihin epätiiviyksien rakenteiden tai toimimattoman tuloilmansuodatuksen kautta (Levänen 2016). Lisäksi ilmanvaihtojärjestelmän tasapaino häiriintyy, mikäli ilma virtaa epätiiviyksikohtista hallitsemattomasti.

Kylmän ilmaston maissa ilmanvaihdon suunnittelulla tähdätään paitsi riittävään ilmanvaihtoon ja hyvään sisäilmastoon, myös rakenteiden kuivana pysymiseen (Ympäristöministeriö 2012). Tavallisesti rakennus pyritään pitämään lievästi alipaineisena ulkoilmaan nähden kosteusvaurioiden ehkäisemiseksi. Ylipaineistus ei ole yleinen käytäntö pyrkiä estämään epäpuhtauksien pääsyä rakenteista huoneilmaan, vaan usein tähän pyritään esimerkiksi tiivistämällä rakenneliittymiä. Rakennuksen ylipaineisuus työntää lämmintä sisäilmaa rakenteiden epätiiviyksien kautta rakenteisiin, jolloin lämpi-

mään ilmaan sitoutunut kosteus voi tiivistyä kylmiin rakenneosiin aiheuttaen kosteusvaurion (Rakennustietosäätiö 1999). Kuitenkin hyvinilmastoiduissa rakennuksissa, jossa käytön aiheuttama kosteustuotto on pientä, sisäilma on usein kuivaa. Koulurakennukset ovat tyypillisesti tällaisia rakennuksia, ja lisäksi niiden käyttöaste on vain noin kolmasosa vuorokaudesta. Tällaisissa rakennuksissa kosteuden tiivistymisen riski on hyvin pieni paineolosuhteista huolimatta.

Rakennukseen valittu ilmanvaihtojärjestelmä vaikuttaa myös merkittävästi sisäympäristön mikrobisytytykseen (Bayer, Grimes 2015). Potentiaalisesti patogeenisten ja toksigeenisten lajien viljelykepoisten itiöiden määrän mittaaminen koulujen laskeutuneesta sisätilapölystä on yksinkertainen tapa määrittää sisäilman mikrobistoa ja sen mahdollista muuttumista suhteessa ilmanvaihtoon ja paine-eroihin sisä- ja ulkotilan välillä. Laskeutuneessa sisätilapölyssä sisätilojen homeet ovat kerääntyneet pitkältä aikaväliltä, ja niitä tutkitaan usein pitkäaikaisen ja kumulatiivisen altistumisen arvioimiseksi (Leppänen 2017, Vesper et al. 2006, Yang et al. 2016). Sisätilojen mikrobit voivat olla hyödyllisiä sisäilman laadun indikaattoreita, ja siksi niiden parempi tuntemus olisi tärkeää (Cabral 2010).

Energiatehokas ja toimiva ilmanvaihtojärjestelmä auttaa turvaamaan hyvän sisäilmaston ja lämpöviihtyvyyden. Hybridi-ilmanvaihdon on useissa tutkimuksissa todettu vastaavan hyvin näihin tarpeisiin (Ji, Lomas & Cook 2009, Roth, Dieckmann & Brodrick 2006, Brohus et al. 2003, Niachou et al. 2005), ja se onkin kehitetty yhdistämään parhaat puolet luonnollisesta ja koneellisesta ilmanvaihdosta (P. Heiselberg, Bjørn & Nielsen 2002, P. K. Heiselberg 2002). Tavoitteena on energiankulutuksen vähentäminen ja ekologisesti kestävä teknologia sekä terveellinen ja miellyttävä sisäilmasto (P. Heiselberg 2000, Chenari, Carrilho & da Silva 2016). Luonnollinen ilmanvaihto on yleensä käyttäjien hyvin omaksuma ja hyväksymä, mutta voi olla joissain rakennuksissa riittämätön. Hybridi-ilmanvaihtojärjestelmässä luonnollista ilmanvaihtoa tehostetaan koneellisen ilmanvaihdon komponenteilla.

Hybridi-ilmanvaihdon energiankulutus ja lämmitys- tai jäähdytysvaatimukset riippuvat ilmasto-olosuhteista (Niachou et al. 2005). Rajoituksia hybridi-ilmanvaihdolle ovat järjestelmän suunnittelun haasteet ja epävarmuustekijät sekä monimutkainen ilmanjaon hallinta. Toimiakseen hyvin hybridi-ilmanvaihtojärjestelmän on integroiduttava hyvin koko rakennuksen suunnitteluun, kuten ilmanvaihtojärjestelmän yleensäkin. Luonnollista, koneellista ja hybridi-ilmanvaihtoa on vertailtu useissa tutkimuksissa energiatehokkuuden, lämpöolosuhteiden, CO₂-pitoisuuden ja mallinnuksen näkökulmista (Becker, Goldberger & Paciuk 2007, Emmerich 2006, Lomas, Cook & Fiala 2007). Laajemman koetun ja mitatun sisäilman laadun kannalta tehtyä vertailututkimustietoa on saatavilla hyvin rajoitetusti.

4.1.3 Rakennusmateriaalien emissiot

Rakennusmateriaalien emissioilla tarkoitetaan kemiallisten yhdisteiden haihtumisilmiötä materiaalin pinnalta kiinteästä olomuodosta kaasumaiseksi. Rakennusmateriaalien emissioiden voidaan siis katsoa aiheutuvan useasta prosessista, joihin vaikuttavat emittoituvan yhdisteen ja materiaalien ominaispiirteet, niiden keskinäiset vuorovaikutukset sekä ympäröivät olosuhteet. Prosessin vuorovaikutusmekanismit ovat usein monimutkaisia ja niitä ei voi luotettavasti ennustaa. Materiaaliemissioiden voidaan

kuitenkin katsoa johtuvan kahdesta pääasiallisesta prosessista: kemiallisten yhdisteiden diffuusiosta materiaalin sisällä ja niiden haihtumisilmiöstä materiaalin pinnalla. (Haghighat & De Bellis 1998, Wirtanen 2005)

Rakennus- ja sisustusmateriaalit ovat merkittävä VOC-emissioiden lähde. Erityisesti uusista rakennus- ja sisustusmateriaaleista haihtuu kemiallisia yhdisteitä huoneilmaan. Toistaiseksi vain muutamille yhdisteille on annettu terveysperusteisia raja-arvoja. Materiaalivalinnoilla on merkittävä vaikutus käyttäjien kokemaan ilmanlaatuun hajun tai erilaisten ärsytys- ja muiden oireiden kautta. Sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin vaikuttavat myös haihtuvien yhdisteiden adsorptio ja desorptio, kun sisäilman yhdisteet sitoutuvat uudelleen ympäröivien materiaalien pintaan ja haihtuvat takaisin huoneilmaan.

Yleisimpiä VOC-yhdisteitä ovat alkaanit, aldehydit, alkoholit, esterit, ketonit, terpeenit, aromaattiset hiilivedyt sekä halogenoidut yhdisteet (Rundt, Backlund & Paakkola 2005). SVOC-yhdisteisiin kuuluvat muun muassa lisä- ja apuaineina käytetyt pehmittimet, palonestoaineet, hidastimet sekä biosidit, joita käytetään esimerkiksi muovimattoissa ja tapeteissa (Liu, Ye & Little 2013). Sisäilman laatua määritettäessä joitakin VOC-yhdisteisiin kemiallisesti kuuluvia tärkeitä epäpuhtauksia, kuten formaldehydiä ja muita aldehydejä, joudutaan määrittämään erillään muista VOC-yhdisteistä käyttämällä niihin soveltuvia mittaustekniikoita. (Rundt et al. 2005, Salonen et al. 2011)

Sisäilmaongelmien yhteydessä on yleisesti käytetty sisäilman TVOC-pitoisuuden mittaamista. Sen käyttökelpoisuutta sisäilman laadun indikaattorina on alettu entistä enemmän kyseenalaistaa käsitteiden ja määritysten erilaisista tulkinnoista sekä puutteellisesta standardoinnista johtuen. Sisäilmasta on tunnistettu yli 1000 haihtuvaa orgaanista yhdistettä ja yksittäisten VOC-yhdisteiden fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet ja terveysvaikutukset vaihtelevat suuresti. Siten TVOC-pitoisuuden määrittämisessä jonkin vähän haitallisen yhdisteen korkea pitoisuus voi korostua liiaksi ja samalla erittäin haitallisen yhdisteen pieni pitoisuus voi jäädä vähemmälle huomiolle. Sisäilman haihtuvien orgaanisten yhdisteiden hallinnassa suositellaan käytettävän ALARA-periaatetta, jonka mukaan TVOC-pitoisuuden tulisi olla niin alhainen kuin se kohtuullisilla toimenpiteillä on mahdollista. Kohonnut TVOC-pitoisuus kuitenkin ilmaisee kemiallisten aineiden epätavallisen suurta määrää sisäilmassa ja antaa aiheutta jatkotutkimuksille.

Rakennusmateriaalien emissiot ovat usean prosessin tulos ja niiden määrään sekä nopeuteen vaikuttavia tekijöitä on useita, kuten materiaalin altistuminen erilaisille lämpö- ja kosteusolosuhteille, orgaanisten yhdisteiden konsentraatiot sisäilmassa, materiaalin kulumisen käytössä ja materiaalin ikä (Wirtanen 2006). Sisäilman VOC-yhdisteet voivat myös reagoida keskenään tai epäorgaanisten kaasujen, kuten otsonin ja typpidioksidin kanssa muodostaen uusia yhdisteitä ja partikkeleita. Lisäksi epäpuhtaudet voivat olla riippumattomia käytetyistä materiaaleista, sillä ne voivat olla myös peräisin kodinkoneista, kulutustuotteista, ihmisen toiminnasta tai ne ovat kulkeutuneet sisäilmaan ulkoilmasta.

Rakennusmateriaaliemissioiden aiheuttajina voivat olla esimerkiksi materiaalin raaka-aineet, vanheneminen, väärinkäyttö tai valmistuksessa tapahtuneet tuotantovirheet (Levänen 2016). Erilaisista rakennusmateriaaleista yleisimmän huomion kohteena ovat

viime vuosina olleet lattiapäällysteinä käytetyt materiaalit. Esimerkiksi polyvinyylikloridista (PVC) valmistetut muovimatot aiheuttavat epämiellyttävää hajua. Rakennusmateriaaleista vapautuneet epäpuhtaudet aiheuttavatkin usein tunnistettavaa ja epämiellyttävää hajua. Lievältä kuulostavat viihtyisyshaitat voivat kuitenkin olla vain pieni havaittu osa todellisesta epäpuhtauksien määrästä. Esimerkiksi karsinogeenisen formaldehydin haistaa jo pieninä pitoisuuksina, mutta hajun intensiivisyys ei juurikaan kasva pitoisuuden kasvaessa, vaan lisäksi alkaa esiintyä muun muassa silmien ja hengitysteiden ärsytysoireita (Rundt et al. 2005).

4.1.4 Puumateriaalien vaikutukset mitattuun sisäympäristön laatuun

Hiilipäästöjen vähentämiseksi puun käyttämistä rakentamisessa on pyritty lisäämään sen ekologisuuden vuoksi. Suomessa havupuutuotteet luokitellaan vähäpäästöisiksi, vaikka erityisesti tuoreen puun VOC-päästöt voivat ylittää Rakennusmateriaalien päästöluokituksen parhaalle M1-luokalle asetetut raja-arvot.

Suuren höyrynpaineensa vuoksi VOC-yhdisteet haihtuvat herkästi materiaaleista ympäröivään ilmaan. Sisäilman VOC-pitoisuuteen vaikuttavat muun muassa rakennuksen sekä käytettyjen materiaalien ikä, ulkoilmasta tulevat päästöt, ilmanvaihto sekä huoneilman lämpötila ja kosteus. Materiaalien VOC-emissiot ovat suuria uusista materiaaleista ja emissiot pienenevät materiaalin vanhetessa. Tehokas ilmanvaihto kiihdyttää VOC-emissiota materiaaleista, mutta samalla pienentää sisäilman VOC-pitoisuutta varsin tehokkaasti.

Euroopan direktiivien vaatimat ilmatiiviimmät rakennukset voivat johtaa sisäilman kemiallisten yhdisteiden pitoisuuksien nousemiseen. Rakennus- ja sisustusmateriaalit ovat yksi merkittävimmistä sisäilman kemiallisten yhdisteiden lähteistä. Pitoisuuksien pienentämiseksi onkin tärkeää suosia vähäpäästöisiä rakennusmateriaaleja. Suomessa vapaaehtoisuuteen perustuva M1-luokittelusysteemi on ohjannut rakennusmateriaalien kehitystä vähäpäästöisemmiksi. Tällä hetkellä EU kehittää uusia harmonisoituja CE-merkintöjä ja LCI-arvoja (Lowest Concentration of Interest) rakennusmateriaalien VOC-päästöille.

Puiset rakennusmateriaalit vaikuttavat sisäympäristöön kemiallisesti ja fysikaalisesti. Puumateriaaleista haihtuu sisäilmaan orgaanisia yhdisteitä, joiden koostumus vaihtelee puulajien kesken sekä materiaalissa mahdollisesti käytettyjen muiden ainesosien ja erilaisten käsittelyiden johdosta (Kirkeskov et al. 2009). Puusta ja puupohjaisista rakennusmateriaaleista haihtuvat orgaaniset yhdisteet voivat aiheuttaa tilojen käyttäjille terveyshaittoja sekä alentaa sisätilojen viihtyvyyttä (Jensen et al. 2001) (Jensen et al. 2001). Toisaalta joillakin haihtuvista yhdisteistä on myös havaittu olevan positiivisia terveysvaikutuksia. Hygrooskooppisena materiaalina puulla on kyky sitoa ja luovuttaa kosteutta sisäilman suhteellisen kosteuden muuttuessa ja näin tasata huoneilman kosteuden vaihteluita. Lisäksi puulla on havaittu olevan antibakteerisia ominaisuuksia, jotka voivat ehkäistä bakteerikasvustojen syntymistä.

Haihtuvat kemialliset yhdisteet

Puumateriaaleista sisäilmaan haihtuvien yhdisteiden on havaittu vaikuttavan tilaa käyttävien ihmisten viihtyvyyteen ja terveyteen, joten haihtuvien yhdisteiden koostu-

muksien ja vaikutusten selvittäminen on tärkeää paremman sisäilman laadun saavuttamisessa. Puumateriaali koostuu pääosin selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä. Näiden ainesosien lisäksi puu sisältää lukuisia orgaanisia ja epäorgaanisia yhdisteitä, joiden koostumus sekä pitoisuus vaihtelevat puulajien kesken. Vaihtelu voi olla huomattavaa myös saman lajin yksittäisten yksilöiden välillä sekä puuyksilön eri osissa. Tavanomaista on myös puiden sisältämien yhdisteiden pitoisuuksien vaihtelu eri alueilla kasvaneilla puilla. (Kirkeskov et al. 2009) VOC-emissiot ovat suuret puun kuivamisen aikana, jolloin puun sisältämään veteen liunneet yhdisteet haihtuvat puusta haihtuvan veden mukana (K. Granström 2005). Emissiot pienenevät ajan myötä, mutta rakennusmateriaalina käytettävän vastakuivatun sahatavaran päästöt voivat etenkin käytön alussa olla vielä huomattavan suuria (Risholm-Sundman et al. 1998).

Havupuiden pääasiallisia VOC-emissiotuotteita ovat erilaiset aldehydit ja terpeenit. Terpeeneistä yleisimpiä kuusen ja männyn emissioissa ovat monoterpeeneihin kuuluvat α -pineeni, β -pineeni, limoneeni ja 3-kareeni. Yleisimpiä aldehydeihin kuuluvia emissiotuotteita ovat tyydyttymättömien rasvahappojen hapettumisen yhteydessä muodostuva heksanaali sekä bentsaldehydi. Useiden tekijöiden vaikuttaessa emissiotuotteiden määriin ja suhteellisiin osuuksiin puussa niille ei voida antaa yleistä arvoa, mutta esimerkiksi Punkaharjulta ja Padasjoelta kaadettujen mäntyjen VOC-emissioista noin 71 % oli terpeenejä ja 25 % aldehydejä. Kahden pääryhmän lisäksi emissiotestauksissa on havaittu pieniä määriä muita VOC-yhdisteitä, kuten alkoholeja, ketoneita ja aromaattisia hiilivetyjä. (Manninen, Pasanen & Holopainen 2002, Lübeck et al. 2000, Jensen et al. 2001)

Havupuihin verrattuna lehtipuiden emissiotuotteissa esiintyy monipuolisemmin alkoholeja ja karbonyyliyhdisteitä, mutta ei terpeenien emissioita. Aldehydit, kuten heksanaali ja pentanaali, ovat myös tavanomaisia ja niitä esiintyy useimpien lehtipuiden emissioissa. Hemiselluloosan asetyyliryhmien hydrolyysissä muodostuvan etikkahapon emissioita esiintyy lähes kaikilla lehtipuilla ja tutkituista puulajeista korkeimmat etikkahapon emissionopeudet mitattiin kirsikkapuulla ja tammella. (Risholm-Sundman et al. 1998)

Puumateriaalien ominaisuuksien parantamiseksi voidaan puulle suorittaa erilaisia modifiointeja, kuten lämpökäsittelyä. Puussa tapahtuvien kemiallisten muutoksien, kuten termisen hajoamisen ja pääainesosien hapettumisen, seurauksena myös siitä vapautuvat kemialliset yhdisteet muuttuvat.

Ilmakuivatun ja lämpökäsitellyn männyn emissioita vertailevassa tutkimuksessa huomattiin, että ilmakuivatun männyn VOC-emissiot olivat seitsemän tai yhdeksän kertaa suuremmat kuin lämpökäsitellyllä männyllä näytekappaleen alkuperästä riippuen. Tutkimuksessa tunnistetuista 41 yksittäisestä VOC-yhdisteestä vain 14 esiintyi sekä ilmakuivatun että lämpökäsitellyn puun emissioissa. Lämpökäsitellyn männyn pääasiallisia emissiotuotteita olivat furfuraali, etikkahappo ja asetonit. Ilmakuivatun männyn emissioista yleisesti löytyneiden haihtuvien monoterpeenien ja muiden pienen molekyyli-massan omaavien yhdisteiden katsottiin haihtuneen lämpökäsittelyn yhteydessä. Tutkimuksen mukaan lämpökäsittely vähentää männyn kokonaisemissioita huomattavasti, mutta samalla muuttaa männyn emissio profiilia siten, että korkealla ärsytyspotentiaalilla varustetut yhdisteet tulevat dominoiviksi. (Manninen et al. 2002, Hyttinen et al. 2010)

Puupohjaiset rakennusmateriaalit, kuten lastu-, vaneri- ja kuitulevyt, valmistetaan sitomalla pieniä puun palasia, esimerkiksi puukuituja tai -lastuja, toisiinsa erilaisilla sideaineilla. Puuaineksen liimaamiseen käytettävät sideaineet, esimerkiksi urea-, fenoli- ja melamiiniformaldehydihartsit, ovat merkittäviä sisäilman formaldehydin lähteitä, sillä puupohjaiset materiaalit muodostavat yleensä suuria pintoja rakennuksien sisätiloissa. Materiaalien valmistuksessa tuotteisiin jäänyt ”vapaa” tai heikosti sitoutunut formaldehydi voi vapautua sisäilmaan materiaalien käytön aikana. Lämpimät ja kosteat olosuhteet kiihdyttävät formaldehydin vapautumisessa tapahtuvia polymeeriketjujen hydrolyysireaktioita nopeuttaen emissioita. Puupohjaisten rakennusmateriaalien suuret formaldehydiemissiot ovat johtaneet valmistajia kehittämään vähäpäästöisiä tuotteita ja niitä on nykyään yleisesti tarjolla. (Yu, Kim 2012, He, Zhang & Wei 2012)

Kemiallisten yhdisteiden vaikutukset terveyteen

Puuta pidetään yleisesti ottaen hyvänä sisäympäristömateriaalina (Jensen et al. 2001). Puun merkittävimmät emissiot ovat terpeenejä, jotka toimivat sekä ensisijaisina päästöinä että lähteinä toissijaisille päästöille, foto-oksidanteille. Terpeenit ovat havupuista vapautuvien kemiallisten yhdisteiden suurin ryhmä. Terpeenit jaetaan perusrungon hiiliatomien määrän mukaan ja suurin osa havupuiden terpeeniryhmistä muodostuu monoterpeeneistä, seskviterpeeneistä ja diterpeeneistä. Monoterpeenit ovat puista helpoiten haihtuvimpien yhdisteiden joukossa ja niiden kiehumispiste vaihtelee 150 °C:n ja 180 °C:n välillä. Seskviterpeeneillä on huoneenlämpötilassa alhainen höyrynpaine, mutta ne ovat riittävän haihtuvia emittoitumaan ilmaan havupuista. Seskviterpeeneiden kiehumispiste on 240 °C:n ja 270 °C:n välillä. (K. M. Granström 2010) Terpeenit kuuluvat NVOC-yhdisteisiin (Natural VOC eli luonnolliset VOC-yhdisteet). NVOC yhdisteiden ominaisuuksia on tutkittu kuitenkin vasta vähän ja suurin osa tutkimuksista on keskittynyt haitallisten VOC-yhdisteiden kuten bentseenin, toluenin, etyylibentseenin ja ksyleenin tutkimiseen. (Son et al. 2013)

Tutkimustulokset sisäilman terpeenien vaikutuksesta ihmisten terveyteen ovat jokseenkin ristiriitaisia, ja niillä on havaittu olevan sekä negatiivisia että positiivisia vaikutuksia. Terpeeneistä aiheutuvat terveysvaikutukset johtuvat pääasiallisesti eri terpeenien yhteisvaikutuksesta. (K. M. Granström 2010) Korkeina pitoisuuksina esiintyessään terpeenit voivat aiheuttaa ihmisille iho-oireita, hengitysvaikeuksia sekä limakalvojen ärsytystä. Niitä ilmenee erityisesti puuteollisuuden valmistusprosesseissa työskentelevillä ihmisillä, jotka ovat paljon tekemisissä vastakaadettujen puumateriaalien parissa (K. M. Granström 2010, Eriksson et al. 1997) Työterveydellisin perustein annetut haitalliseksi tunnetut pitoisuudet (HTP-arvot) (Sosiaali- ja terveysministeriö 2016) perustuvat vain monoterpeenien mittauksiin. On kuitenkin saatu tutkimustuloksia, että työntekijät altistuvat myös merkittävälle määrälle seskviterpeenejä, ja puuteollisuuden työntekijöiden terpeenialtistus voi olla aliarvioitua. (K. M. Granström 2010) Ei-teollisissa sisäympäristöissä tehdyn tutkimuksen (Kasanen et al. 1999) mukaan monoterpeenit eivät yksistään todennäköisesti aiheuta ärsytysoireita, ja sisäilmasta mitatut pitoisuudet ovat matalia verrattuna suositeltuihin tasoihin (RILs eli Recommended Indoor Levels).

Terpeeneillä on havaittu olevan myös positiivisia terveysvaikutuksia (Gminski et al. 2011, Son et al. 2013). Männystä emittoituvien monoterpeeneihin kuuluvien α -pinee-

nin ja β -pineenin on havaittu pienentävän stressihormonitasoja ja lisäävän immuunipuolustuksen niin sanottujen tappajasolujen (natural killer (NK)) aktiivisuutta soluviljelmässä (Li et al. 2006). NK-imusolujen määrän lisääntyminen viittaa muun muassa limakalvon immuunijärjestelmän aktivoitumiseen. Kenttätutkimukset tukivat havaintoja osoittamalla, että ihmisten oleskeleminen metsissä pienensi stressihormonitasoja ja aktivoi NK-imusoluja.

Hiirikokeessa hiiren hengittämän α -pineenin on huomattu hidastavan syövän kasvua. α -pineenillä ei kuitenkaan ollut suoraa vaikutusta syöpäsolujen lisääntymiseen, joten sen vaikutusmekanismi jäi toistaiseksi epäselväksi (Kusuhara et al. 2012). Tutkimuksessa α -pineeni (0,035 ppm) in vivo (elävässä organismissa tehty tutkimus) hidasti syövän etenemistä 40 % kontrolliryhmään verrattuna, mutta in vitro (solukoe elävän eliön ulkopuolella) vastaavaa vaikutusta ei ilmennyt.

Puun ja puupohjaisten materiaalien VOC-päästöjen ärsytysoireiden on havaittu olevan dominoivia matalilla pitoisuuksilla (Jensen et al. 2001). Vaikutusten perusteella yksittäisille VOC-yhdisteille määritettiin kyseisessä tutkimuksessa ärsytysoireiden sekä karsinogeenisten, allergeenisten, reprotoksisten ja neurotoksisten vaikutusten perusteella LCI-arvot (Lowest Concentration of Interest) ja TVOC-pitoisuuksille S-arvot, jotka perustuivat yksittäisten yhdisteiden LCI-arvoihin ja toksikologisiin vaikutuksiin. $\Delta 3$ -kareenin, α -pineenin ja limoneenin S-arvot olivat matalimmat (siis hyväksyttävimmät) kiinteälle tammelle ja koivulle sekä pienemmät kiinteälle männyn kuoripuulle kuin kiinteälle männyn sydänpuulle.

Puumateriaalien emissioissa yleisesti tavattavat aldehydit ovat reaktiivisia orgaanisia yhdisteitä, joista useimmilla on silmiä ja limakalvoja ärsyttäviä vaikutuksia. Monet aldehydit ovat myös pistävän hajuisia jo pienillä pitoisuuksilla. Puupohjaisten materiaalien valmistuksessa käytettävä formaldehydi on aldehydeistä yksinkertaisin, ja huoneenlämmössä se esiintyy värittömänä, voimakkaan hajuisena kaasuna. Formaldehydin aiheuttamia oireita ovat silmien kirvely, hengityselimien ärsytys, huimaus ja väsymys. Formaldehydi on myrkyllistä hermostolle. Altistuminen formaldehydille yhdistetään myös allergia- ja astmaoireisiin. Kansainvälinen syöväntutkimuslaitos IARC (International Agency for Research on Cancer) on luokitellut formaldehydin luokan I karsinogeeniseksi aineeksi, jolla on todettu olevan yhteyksiä nenän ja nielun alueen syöpiin. Alle $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ formaldehydipitoisuuksien ei katsota aiheuttavan syöpäriskiä, mutta terveyshaittoja aiheutuu alemmillakin pitoisuuksilla. Ylempiä hengitysteitä ja silmiä ärsyttäviä oireita voi ilmaantua $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pitoisuudella, ja pitkäaikainen altistuminen $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pitoisuudella on yhdistetty erilaisiin allergia- ja astmaoireisiin. (Salonen 2009)

Männyn ja OSB-lastulevyn (Oriented Strand Board, suunnattu suurlastulevy) emissioiden vaikutuksia ihmisten keuhkosoluille käsitelleessä tutkimuksessa huomattiin, että monoterpeeneihin kuuluvat α -pineeni ja 3-kareeni eivät aiheuttaneet sytotoksisia tai DNA:ta vaurioittavia vaikutuksia edes erittäin korkeilla pitoisuuksilla (Gminski, Tang & Mersch-Sundermann 2010). Mutageeniin ja mahdollisesti karsinogeenisiin α, β -saturöimattomiin aldehydeihin pitäisi kuitenkin kiinnittää huomiota. Kyseisten aldehydien pitoisuudet sisäilmassa ovat kuitenkin normaalisti vain muutamia mikrogrammoja. Lisäksi EU:n määrittämät LCI-arvot ja Saksassa määritetyt LCI-AgBB-arvot ovat merkittävästi alhaisempia verrattuna tutkimuksen LOEC-arvoihin (Kephalopoulos, Geiss & Anny 2014). Vastaavasti mäntypuun ja OSB-paneelin VOC-yhdisteiden (pääasiallisesti α -

pineenin, Δ^3 -kareenin ja heksanaalin) terveysvaikutuksia lyhytkestoisen (2 h) altistuksen jälkeen selvittäneessä tutkimuksessa (Gminski et al. 2010, Gminski et al. 2011) emissiot eivät aiheuttaneet silmien, kurkun tai keuhkojen ärsytystä. Kuitenkin väsymysoireita ja hajua raportoitiin, vaikkakin mäntypuun haju kuvailtiin enemmän ”miellyttäväksi” kuin ”epämiellyttäväksi”.

Hygroskooppisuus ja kosteuspuskurivaikutus

Sisäilman kosteusolosuhteet ovat riippuvaisia rakennuksen lämmönhallinnasta, huoneilojen välillä tapahtuvasta ilman siirtymisestä, ilmanvaihdon mukana ulkoa tulevan ilman lämpötilasta ja kosteudesta, rakennuksen käyttäjien toiminnasta johtuvasta kosteudentuotosta sekä käytettyjen rakennus- ja sisustusmateriaalien kosteuden puskurointiominaisuuksista. Tavanomaisesti rakennuksien sisäilman kosteus- ja lämpöolosuhteita on pyritty hallitsemaan aktiivisten lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmien avulla. Usein nämä järjestelmät huomioivat vain lämpötilaa ja sisäilman kosteuden hallintaa tapahtuu epäsuorasti ilmanvaihtojärjestelmän termisen suorituskyvyn funktiona. Ilman suhteellinen kosteus vaikuttaa esimerkiksi sisätilojen lämpöviihtyvyyteen, rakennusmateriaalien kestävyys ja emissioihin, ihmisten kokemaan sisäilman laatuun sekä rakennuksen energiankulutukseen. Sisäilman suhteellisen kosteuden pitämiseksi optimialueella aktiivisten järjestelmien toiminnan tehostamisessa voidaan käyttää apuna passiivisia järjestelmiä, kuten hygroskooppisten materiaalien kosteuspuskurivaikutusta, jotka edesauttavat samalla rakennusten energiatehokkuutta, lämpöviihtyvyyttä ja sisäilman laatua. (Salonvaara et al. 2004)

Puu on hygroskooppinen materiaali eli sillä on kyky sitoa itseensä ilman vesihöyryä ja vapauttaa sitä takaisin silloin, kun materiaalia ympäröivän ilman suhteellinen kosteus muuttuu. Puu asettuu siis tasapainokosteuteen ympäristönsä kanssa, ja puun kosteuspitoisuuden vaikuttavat ympäröivän ilman suhteellinen kosteus sekä ilman lämpötila. Hygroskooppisuutensa johdosta huoneilmaa rajaavia puumateriaaleja voidaan käyttää kosteuspuskurina tasaamaan huoneilman kosteuspitoisuuden ja suhteellisen kosteuden vaihteluita. Merkittävä kosteuden puskurivaikutus perustuu rakenteen ja sen materiaalien suureen teholliseen kosteuskapasiteettiin eli vesihöyryn määrään, jonka rakenteessa olevat hygroskooppiset materiaalit kykenevät luovuttamaan tai vastaanottamaan ympäristön kosteuden muuttuessa tietyllä aikavälillä. Aikavälin pituuteen vaikuttavat huoneilman kostumis- ja kuivumisjaksot, jotka määräytyvät huoneen käytön ja sitä seuraavan kosteuskuormituksen mukaan, esimerkiksi makuuhuoneissa kosteuskuormitus toistuu yleensä jaksoittain vuorokausirytmillä. Materiaalin ja rakenteen tehollisen kosteuskapasiteetin suuruuteen vaikuttavat eniten neljä päätekijää: materiaalin hygroskooppisuus ja sitä kuvaavan tasapainokosteuskäyrän eli sorptiokäyrän (adsorptiokäyrä kostumissuuntaan ja desorptiokäyrä kuivumissuuntaan) muoto, materiaalin vesihöyrynläpäisevyys, hygroskooppisen materiaalin ja huoneilman kosketuspinta-ala sekä hygroskooppisen materiaalin pintakäsittelyn höyrynvastus. (Kokko 2004)

Idea hygroskooppisten materiaalien ja etenkin puun käytöstä kosteuspuskurina on verrattain uusi, ja puun soveltuvuus on huomattu vasta 2000-luvun alkupuolella (Salonvaara et al. 2004). Tutkimusten mukaan hygroskooppisten materiaalien, kuten puun, käytöllä sisäpinnan materiaaleina voidaan merkittävästi tasata sisäilman kosteuden

suuria vaihteluita ja sitä kautta parantaa lämpöviihtyvyyttä sekä ihmisten kokemaa sisäilman laatua (Salonvaara et al. 2004, Simonson, Salonvaara & Ojanen 2002, Kokko 2004).

Antibakteeriset ominaisuudet

Puun antibakteeriset eli bakteereja tappavat tai niiden lisääntymistä estävät ominaisuudet ovat aiemmin jakaneet tutkijoiden mielipiteitä. Uusimmissa tutkimuksissa on huomioitu puulajien väliset erot ja useilla puulajeilla on havaittu olevan antibakteerisia ominaisuuksia. Männyn sydänpuu on havaittu selvästi antibakteeriseksi materiaaliksi verrattuna lasiin ja hieman antibakteerisemmaksi kuin kuusen. Antibakteeriset ominaisuudet on yhdistetty korkeisiin VOC-pitoisuuksiin, mikä kyseenalaistaa pyrkimykset mahdollisimman mataliin VOC-pitoisuuksiin sisäympäristöissä, joissa on käytetty puuta. (Vainio-Kaila et al. 2011, Vainio-Kaila et al. 2017)

Bakteerien selviytymistä eri puulajien sahanpuruilla ja muovilastuilla selvittämiseen tutkimuksen tärkeimpänä tuloksena pidettiin havaintoa siitä, että antibakteerisia ominaisuuksia ei voida yleistää koskemaan kaikkia puulajeja, sillä bakteerien selviäminen vaihteli huomattavasti puulajien välillä (Milling et al. 2005). Puulajien lisäksi bakteerien selviämiseen vaikuttivat ympäröivät olosuhteet, kuten lämpötila ja kosteus. Männyllä ja tammella kuitenkin havaittiin olevan erinomaisia antibakteerisia ominaisuuksia ja hygieenistä etulyöntiasemaa verrattuna muihin tutkittuihin puulajeihin ja muoviin. Männyn antibakteerisuutta puoltaa myös tutkimus, jossa huomattiin bakteereiden kuolevan nopeimmin männystä leikatulla laudalla verrattuna muoviin, kuuseen, lehtikuuseen, pyökkiin ja haapaan (Schönwälder et al. 2002). Tutkimuksessa männyn antibakteerisuus yhdistettiin sen hygroskooppisiin ominaisuuksiin ja männyn sisältämiin uuteainesiin.

Puun antibakteeriset ominaisuudet voidaan jakaa aktiivisiin ja passiivisiin vaikutuksiin (Laireiter et al. 2013). Passiivisiksi vaikutuksiksi luokitellaan puun hygroskooppisuus ja siitä johtuva materiaalin kuivuminen, sillä bakteereille vesi on elintärkeää ja ne kuolevat kuivuessaan. Aktiivisiksi vaikutuksiksi katsotaan puiden sisältämät ainesosat, jotka suoraan vaikuttavat bakteerien kasvuun. Tutkimuksessa keskityttiin tarkastelemaan männyn ja lehtikuusen aktiivisia vaikutuksia neljällä eri bakteerikannalla. Lehtikuusen oksakohdilla ja sydän- sekä pintapuulla ei havaittu olevan antibakteerisia ominaisuuksia, jotka olisivat hidastaneet kasvua tutkituilla bakteereilla. Sama tulos huomattiin myös männyn pintapuun kohdalla. Sen sijaan männyn sydänpuulla havaittiin olevan selviä antibakteerisia ominaisuuksia kolmella neljästä tutkituista bakteerikannoista. Aktiivisten vaikutusten osuutta männyn antibakteerisuuteen tutkittiin erottamalla uuteaineita puisista koekappaleista ja selvittämällä niiden vaikutusta bakteereihin. Männyn sydänpuusta erotetuilla uuteaineilla oli samanlaisia vaikutuksia bakteereihin kuin vastaavilla puisilla koekappaleilla, joten tutkijat tulivat johtopäätökseen, että männyn antibakteerisilla ominaisuuksilla on yhteys sen sisältämien yhdisteiden aktiiviseen vaikutukseen.

Tutkimustulosten perusteella voidaan todeta joillakin puulajeilla, kuten männyllä, olevan selkeitä antibakteerisia ominaisuuksia. Aihealueen tutkimukset kuitenkin keskittyvät lähinnä leikkuulautoihin ja puisiin koekappaleisiin, joten myös tutkimuksia antibakteeristen ominaisuuksien hyödyistä puisissa rakennusmateriaaleissa ja rakennetussa ympäristössä tarvittaisiin.

4.1.5 Puumateriaalien yhteiskäyttö pinnoitusmateriaalien kanssa

Puisten rakennusmateriaalien ulkonäön ja kestävyysominaisuuksien parantamiseksi ne usein pinnoitetaan käyttötärpeeseen soveltuvilla pinnoitusmateriaaleilla. Tässä kappaleessa käsitellään erityisesti puun pinnoittamiseen käytettäviä yleensä neste-mäisessä muodossa olevia materiaaleja, kuten maaleja ja lakkoja, jotka levittämisen jälkeen kuivuvat lopulliseen muotoonsa. Pinnoituksen tarkoituksena on lisätä puumateriaalin käyttöikää parantamalla puun mekaanisia tai kemiallisia ominaisuuksia, muokata puupinnan ulkonäköä tai suojata materiaalia lahoa, paloa tai hyönteistuhoja vastaan. Pinnoitukseen käytettävän materiaalin koostumuksesta, pinnoituskerroksen paksuudesta ja materiaalin hengittävyyydestä riippuen pinnoittaminen vaikuttaa myös puun muihin ominaisuuksiin, kuten puun hygroskooppisuuteen ja puusta peräisin olevien kemiallisten epäpuhtauksien vapautumiseen, sillä pinnoitusmateriaalit muodostavat suojattavan pinnan päälle kalvon, jonka läpäisyominaisuudet vaihtelevat huomattavasti pinnoitusmateriaalien välillä.

Huonetilaa rajaavien puumateriaalien hygroskooppisen toiminnan kannalta sisäpinnan pinnoitusmateriaalin vesihöyrynläpäisevyys on tärkeä tekijä. Matalalla vesihöyrynläpäisevyydellä vastustetut pinnoitusmateriaalit vähentävät tai estävät kokonaan kosteusteknisen vuorovaikutuksen huoneilman ja rakenteen välillä, jolloin puumateriaalin kosteudenpuskurointivaikutus poistuu kokonaan tai pienenee huomattavasti. Monet käytössä olevista pinnoitusmateriaaleista läpäisevät vesihöyryä kohtalaisesti, mutta niiden käyttö kuitenkin vähentää puskurivaikutusta merkittävästi verrattuna pinnoittamattoman puumateriaalin kosteudensitomisominaisuuksiin.

Monet maalit voivat kasvattaa rakennusten sisäpintojen vesihöyrynvastusta 30–2000-kertaiseksi, ja vesihöyrynvastus vaikuttaa sisäilman suhteelliseen kosteuteen. Vastuksen kasvaminen pohja-arvoa suuremmaksi vaikuttaa merkittävämmiin kuin vastuksen pieneneminen. Kosteuden kulkeutumisesta maaleissa ei kuitenkaan ole runsaasti tarkkaa tietoa. (Simonson, Salonvaara & Ojalen 2001)

Suunniteltaessa puurakenteen käyttämistä kosteuspuskurina, tulisi pinnoitusratkaisuiksi valita vesihöyryä hyvin läpäiseviä tuotteita, jolloin puumateriaalin puskurivaikutus voidaan suurimmaksi osaksi säilyttää. (Kokko 2004) Nykyään käytössä on pinnoitusmateriaaleja, jotka suojaavat puumateriaalia vedeltä, mutta samalla lisäävät puun kosteuspuskurointikykyä. Esimerkiksi luonnollisen hydrofobisen karnaubvahan on havaittu tekevän puun hydrofobiseksi ja lisäävän puun luonnollista kosteuspuskurointia, kun taas vertailupinnoitteet vähensivät kosteuspuskurointia merkittävästi (vahafilmi ja lakka) tai eivät olleet riittävän hydrofobisia (pellavaöljy) (Lozhechnikova et al. 2017, Lozhechnikova et al. 2015). Kun pinnoitteen vaikutusta männyn hygroskooppisuuteen tutkittiin kuudella vesipohjaisella maalilla käyttäen erilaisia yhdistelmiä pohjamaalin kanssa, huomattiin pinnoitusmateriaalilla olevan huomattava merkitys männyn kosteuspuskurointikapasiteetille (Hameury 2007).

Tutkimustietoa pinnoitusmateriaalien vaikutuksesta pinnoitettavan puumateriaalin emissioihin ei juurikaan ole löydettävissä, vaan aihealueen tutkimukset käsittelevät etupäässä pinnoitusmateriaaleista peräisin olevia emissioita sekä alusmateriaalin vaikutusta pinnoitusmateriaalin emissioihin. Muutamassa aihealueen tutkimuksessa kui-

tenkin todetaan, että puumateriaalien pinnoitukseen käytettävät materiaalit usein vähentävät puumateriaalista lähtöisin olevia emissioita muodostamalla enemmän tai vähemmän läpäisevän pinnoitteen, jolloin pääasiallisiksi emissiotuotteiksi muodostuvat pinnoitusmateriaalista itsestään vapautuvat kemialliset yhdisteet (Larsen et al. 1999, Kirkeskov et al. 2009, Bartekova et al. 2006, Corneau 2006).

Maalattu puu voidaan käsittää yksinkertaisena komposiittimateriaalina. Puu- ja pinnoitemateriaalilla on tyypillisesti eri valmistajat, mikä on huomionarvoista emissioiden kannalta. Materiaalien emissiotestit tehdään tyypillisesti erikseen, eikä maalatun puun emissioita tai vaikutuksia sisäilmaan voida päätellä erillisten kokeiden perusteella. Maalien emissiotesteissä käytetään tyypillisesti inerttiä alustaa, kuten lasia, koska alusmateriaali vaikuttaa maalin päästöihin. Komposiittimateriaalien alkuvaiheen emissiot ovat tyypillisesti pääosin lähtöisin pinnoitemateriaalista, kun taas pitkän aikavälin emissiot voivat olla peräisin alusmateriaalista (Spengler, Samet & McCarthy 2001, Risholm-Sundman et al. 1998). Pinnoitukset tyypillisesti vähentävät puun emissioita.

4.1.6 Puumateriaalien vaikutukset koettuun sisäympäristön laatuun

Sisäympäristön kokonaisvaltaisten vaikutusten selvittämiseksi on kemiallisten ja fyysikaalisten tekijöiden lisäksi otettava huomioon, miten sisätiloissa käytetyt rakennusmateriaalit vaikuttavat käyttäjien kokemaan sisäympäristöön ja sen viihtyvyyteen. Useissa tutkimuksissa on osoitettu, että rakennetulla ympäristöllä on olennaisia vaikutuksia ihmisiin ja etenkin sisätilojen suunnittelulla voidaan vaikuttaa esimerkiksi ihmisten mielialoihin, joten rakennuksia suunnitellessa tulisi kiinnittää huomiota käyttäjien hyvinvointia tukeviin ratkaisuihin. Yhteys rakennetun ympäristön ja ihmisten terveyden välillä on kuitenkin monimutkainen aihealue, johon vaikuttavat useat fyysiset ja psykologiset tekijät. (Nyruud, Bringslimark & Bysheim 2014)

Luonnollisilla ympäristöillä on havaittu olevan positiivisia vaikutuksia ihmisten psykologiseen terveyteen. Viheralueiden ja luonnollisten ympäristöjen on esimerkiksi todettu lievittävän stressiä, nostavan ihmisten mielentilaa sekä edistävän keskittymiskykyä ja suoritusta (Tyrväinen et al. 2014). Positiivisia vaikutuksia on havaittu jopa vertailemalla ihmisten reaktiota valokuviiin, videoihin tai ikkunanäkymään urbaanin- ja luonnollisen ympäristön välillä, jolloin luonnon katselu on vaikuttanut positiivisesti ihmisten tunnetiloihin ja kognitiiviseen suorituskyykyyn sekä edistänyt stressistä elpymistä (Nyruud, Bringslimark 2010, Tyrväinen et al. 2014).

Puumateriaalien psykologista vaikutusta ihmisiin on tutkittu useissa tutkimuksissa ja sisätilan puumateriaaleilla on huomattu olevan myönteisiä vaikutuksia käyttäjiin. Tutkimuksissa on yleisesti keskitytty kolmeen näkökulmaan: puumateriaalien havainnointiin visuaalisesti sekä koskettamalla, mieltymyksiin ja mielipiteisiin erilaisia puumateriaaleja kohtaan sekä puumateriaalien ihmisille aiheuttamiin psykofysiologisiin reaktioihin (Nyruud, Bringslimark 2010). Puumateriaaleja voidaan helposti hyödyntää yhteyden luomisessa rakennetun ympäristön ja luonnon välille, sillä puuta käytetään yleisesti rakentamisessa ja soveltuvia tuotteita on tarjolla runsaasti. Puu mielletään lämpimäksi materiaaliksi, joka on olemukseltaan ja väriltään luonnollinen, minkä lisäksi sillä on hyvät akustiset ominaisuudet. Yleisesti ihmiset kokevat puun positiivisena materiaalina, joka aiheuttaa tunteita lämmöstä, mukavuudesta, rentoutumisesta ja muistuttaa luonnosta (Burnard, Kutnar 2015).

Vanhainkodissa tehdyn tutkimuksen mukaan erilaisten puutuotteiden, kuten huonekalujen ja tarjottimien, käyttö lisäsi vanhusten sosiaalista vuorovaikutusta sekä aktiivisuutta (Anme et al. 2012). Sykevaihtelulla mitattuna kokopuisessa luokkahuoneessa huomattiin aamuisen stressipiikin laantuvan nopeasti koululle saavuttaessa ilman, että se sen jälkeen uusiutui koulupäivän aikana. Verrokkikohteena olleessa tavanomaisessa luokkahuoneessa elimistön lievä stressitila sen sijaan jatkui koko koulupäivän ajan. Lisäksi puisessa luokkahuoneessa oppilaiden stressin kokemukset, kuten tunteet väsymyksestä ja aikaansaamattomuudesta, olivat matalampia kuin tavanomaisessa luokkahuoneessa. (Laukkanen 2014).

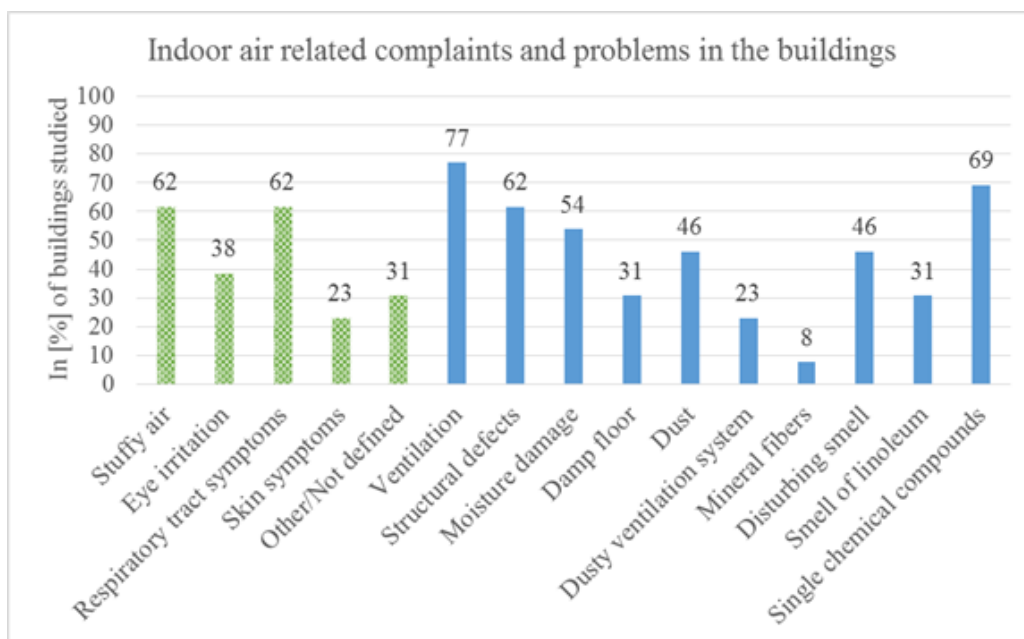
Puumateriaalien fysiologista vaikutusta ihmisiin on tutkittu arvioimalla koehenkilöiden rentoutuneisuutta heidän verenpainettaan mittaamalla, kun henkilöt altistuvat eri materiaaleille visuaalisesti tai koskettamalla (Sakuragawa, Kaneko & Miyazaki 2008, Sakuragawa et al. 2005). Visuaalista altistumista tutkittiin laittamalla koehenkilö huoneisiin, joiden yksi seinä oli valmistettu puupaneeleista tai valkoisista teräspaneeleista. Verenpaineen mittauksen lisäksi osallistujilta kysyttiin heidän suhtautumistaan käytettyihin materiaaleihin. Visuaalinen altistuminen puupaneeleille sai aikaan verenpaineen laskua henkilöille, jotka ilmoittivat pitävänsä kyseisestä materiaalista, minkä lisäksi puupaneelit eivät aiheuttaneet stressiä niihin negatiivisesti suhtautuville osallistujille. Sen sijaan visuaalinen altistuminen valkoisille teräspaneeleille aiheutti materiaaliin negatiivisesti suhtautuville koehenkilöille merkittävää verenpaineen nousua. Materiaalien koskettamisen vaikutusta tutkittaessa huomattiin, että huoneenlämpöisen tai kylmän puupinnan koskettaminen ei verenpaineen perusteella aiheuttanut koehenkilöissä fysiologista stressiä ja materiaali koettiin luonnollisena ja karheana. Koehenkilöt kuitenkin kokivat kylmän puupinnan oman arvionsa mukaan epämiellyttävänä tai vaarallisenä, joten tässä tilanteessa koehenkilöiden omakohtainen arviointi ei vastannut fysiologista reaktiota. Huoneenlämpöisen alumiinin ja kylmän muovin koskettaminen koettiin keinotekoiseksi ja epämiellyttäväksi/vaaralliseksi ja verenpainemittaukset tukivat näitä kokemuksia, sillä kyseisten pintojen koskeminen aiheutti verenpaineen nousua koehenkilöillä.

Sisätiloissa käytetyn puumateriaalin määrällä vaikuttaisi myös olevan merkitystä siihen, kuinka miellyttävänä käyttäjät kokevat sisäympäristön, ja aihetta on tutkittu kyselytutkimuksilla sekä fysiologisilla mittauksilla. Norjalaisten sairaaloiden työntekijöille suunnatussa kyselytutkimuksessa selvitettiin puumateriaalin sopivaa määrää kymmenellä sairaalahuoneella esittävällä kuvalla, joiden sisäpinnoissa ja huonekaluissa käytetyn puumateriaalin määrä vaihteli. Tulosten perusteella sairaaloiden työntekijät suosivat huoneita, joissa puuta oli käytetty kohtuullisesti. Puumateriaalin käytöllä vaikuttaisi olevan myös rajoituksia, sillä kyselyn huonoimmat arviot sai huone, jonka kaikissa pinnoissa ja huonekaluissa oli käytetty puumateriaaleja. Toiseksi huonoimmat arviot tulivat perinteiselle sairaalahuoneelle, jossa puumateriaalit puuttuivat kokonaan. (Nyrud et al. 2014)

Kirjallisuuskatsauksen tuloksia puumateriaalien vaikutuksista koettuun ja mitattuun sisäilman laatuun on käsitelty tarkemmin julkaisussa (Alapieti, Vornanen-Winqvist, Mikola et al. 2017).

4.2 Aineistotutkimus

Helsingiltä ja Vantaalta saatu sisäilmaongelmaisten uudisrakennusten aineisto oli hyvin vaihteleva kohteesta riippuen. Rakennusten käyttäjien valitusten aiheet on tässä ryhmitelty neljään ryhmään. Eniten valitettiin tunkkaisen ilman tunnetta (69 %:ssa kohteista) ja hengitystieoireita (62 %:ssa kohteista). Selvityksissä havaitut yleisimmät ongelmat liittyivät erityisesti ilmanvaihdon säätöihin, kosteusvaurioihin tai lattian kohonneeseen kosteuspitoisuuteen sekä kemiallisiin epäpuhtauksiin. Käyttäjien raportoimat oireet ja tutkimuksissa havaitut ongelmat on esitetty Kuvassa 15.



Kuva 15. Sisäilmaongelmaisten tilojen käyttäjien raportoimat oireet ja tutkimuksissa havaitut ongelmat (Vornanen-Winqvist et al. 2016).

Yleisin tutkimuksissa havaittu ongelma liittyi IV-järjestelmän säätöihin. Ongelmakohteista 85 %:ssa löydettiin puutteita ilmanvaihtojärjestelmän toiminnassa. Lisäksi IV-järjestelmän ongelmia käsiteltiin useassa kohteessa moneen kertaan. Rakennusten omistajien Helsingin ja Vantaan kaupungin edustajien mukaan nykyiset hyvin herkästi itseään säätelevät ja tarkat IV-järjestelmät ovat usein rakennusten käyttäjien kannalta ongelmallisia, erityisesti sisäilmaongelmia selvitetäessä. Esimerkiksi ikkunan avaaminen luokassa, jossa on tunkkainen ilma, voi sekoittaa järjestelmän toiminnan ja tilanne huonontua entisestään sekä kyseisessä tilassa että muissakin samaan järjestelmään kytketyissä tiloissa. Uusien rakennusten ongelmana ovat ilmanvaihdon ohjauksen ja automaation ongelmat, esimerkiksi hiilidioksidiantureiden väärä sijoitus ja tekniset ongelmat sekä tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän erilaisten säätöpeltien ongelmat. Lisäksi järjestelmiä ei aina osata säätää ja käyttää. Määräysten mukainen ilmanvaihto saattaa erityisesti talviaikana olla myös liian tehokas ja tuloilman lämpötila liian korkea, jolloin sisäilma kuivuu liikaa.

Rakennusteknisiä ongelmakohtia löytyi 46 %:ssa kohteista. Ne aiheuttivat esimerkiksi ilmavuotokohtiin, ikkunoiden tiivistykseen tai sadevesien valumiseen liittyviä korjaus-

tarpeita. Vesivahingoista tai rakennusvirheistä johtuvia kosteusvaurioita tai kohonnutta lattian kosteuspitoisuutta löytyi 69 %:ssa kohteista. Kosteusvaurion seurauksena esimerkiksi lattioiden pintamateriaaleja oli jouduttu vaihtamaan.

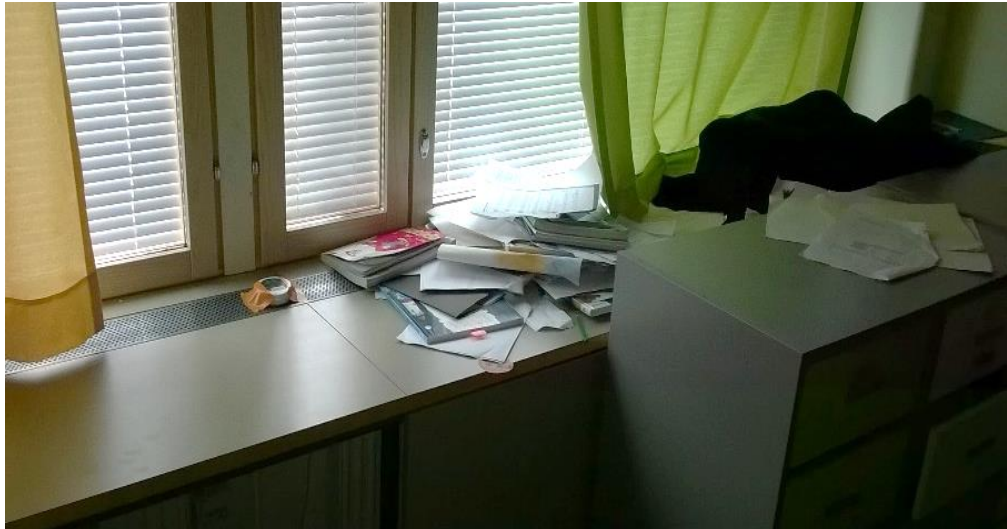
Kemiallisia yhdisteitä, kuten puolihaihtuvat ja haihtuvat orgaaniset yhdisteet, ei käsitelty tässä tutkimuksessa yksittäin. Kohteiden sisäilmaselvityksissä yksittäisten yhdisteiden pitoisuuksia oli verrattu Työterveyslaitoksen käyttämiin viitearvoihin sisäympäristön ongelmien tunnistamiseksi (Työterveyslaitos 2017). Yhdisteen kohonnut pitoisuus sisäilmassa viittaa sisäympäristön epätavanomaisiin emissiolähteisiin. Kohonneita yksittäisten kemiallisten yhdisteiden pitoisuuksia havaittiin 54 %:ssa ongelma-kohteista. Useimmiten ne todettiin kuitenkin uusista materiaaleista johtuviksi vähitellen poistuviksi haitoiksi. Uusien materiaalien hajut ja mahdollisesti aiheuttamat oireet (esimerkiksi päänsärky, tunkkaisuuden tunne) tekevät päivittäisille käyttäjille kuitenkin herkästi epämukavan olon.

Merkittävä (kolmanneksessa sisäilmaselvityskohteista) esille noussut ongelma oli ilmoitustauluissa käytetty linoleum, joka aiheutti hajuongelmia ja mahdollisesti tilankäyttäjien ärsytysoireita. Linoleum on pellavaöljypohjainen komposiittimateriaali, joka kestää huonosti kosteutta tai alkaleja ja jonka pienetkin pitoisuudet voivat aiheuttaa hajua ja ärsytysoireita (Johansson 1994). Kouluissa ja päiväkodeissa sitä käytetään lattiamateriaalina sekä ilmoitustauluissa. Tutkimuksissa on saatu alustavia viitteitä linoleumlattian yhteydestä ärsytys- ja hengitystieoireisiin, jotka mahdollisesti liittyvät vähasta irtoilleen jauheen sisältämiin hiukkasiin sekä kosteusvaurioituneen linoleumin emissioihin (Malmberg et al. 2000, Wolkoff 2013, L Undin, M Usabašić 2000). Nykyisiä linoleumlattioita ei kuitenkaan ensisijaisesti vahata, vaan hoidetaan yhdistelmäkooneella. Linoleum oli tämän aineiston kohteissa harvinainen lattiamateriaali. Vain yhdessä kohteessa linoleumlattia oli jouduttu poistamaan kastumisen ja voimakkaan hajun vuoksi. Kolmessa kohteessa epämiellyttävän hajun lähde oli linoleumpintainen ilmoitustaulu.

Linoleumin hajua, muuta häiritsevää hajua tai molempia todettiin 62 %:ssa ongelma-kohteista. Tutkimusraporttien ja haastatteluiden perusteella materiaaliipäästöihin liittyvät sisäilmaongelmat olivat yleisiä käytetyistä M1-luokan pintamateriaaleista huolimatta. Eri materiaalierissä voi olla eroja, vaikka kyseinen tuote olisikin saanut M1-merkinnän. Lisäksi tämän tutkimuksen kohteiden valmistuessa M1-luokitus koski vain rakennusmateriaaleja. Vastikään M1-luokitukseen on otettu mukaan kiintokalusteet sekä pehmustamattomat ja päällystämättömät huonekalut.

Pölyisyydestä varsinkin yläpinnoilla tai ilmanvaihtokanavan pölyisyydestä tai likaisuudesta oli mainittu 64 %:ssa kohteista. Pölyn hallinta sisäilmaongelmaisissa kohteissa on tärkeää, sillä mahdolliset epäpuhtaudet sitoutuvat huonepölyyn ja kertyvät näin hengitettävään sisäilmaan tehokkaammin kuin hyvin siivotussa tilassa. Mineraalikuituja löytyi vähäisiä määriä 31 %:ssa kohteista, mutta ne eivät aiheuttaneet toimenpiteitä.

Kaiken kaikkiaan siivouksella on oleellinen vaikutus hyvään sisäympäristöön. Tämä koskee niin käyttäjien omaa tilasta huolehtimista (Kuva 16) kuin siivoojien työtä. Yksilölliset erot vaikuttavat siivouksen käytäntöihin ja onnistumiseen ohjeistuksesta huolimatta.



Kuva 16. Käyttäjien omilla toimilla on merkittävä vaikutus sisäympäristön laatuun. Kuvan luokassa tuloilmaritelikön päälle on kasattu papereita ja kirjoja.

Tutkimustuloksia on käsitelty julkaisuissa: (Vornanen-Winqvist et al. 2016, Vornanen-Winqvist et al. 2015).

4.3 Kenttätutkimukset

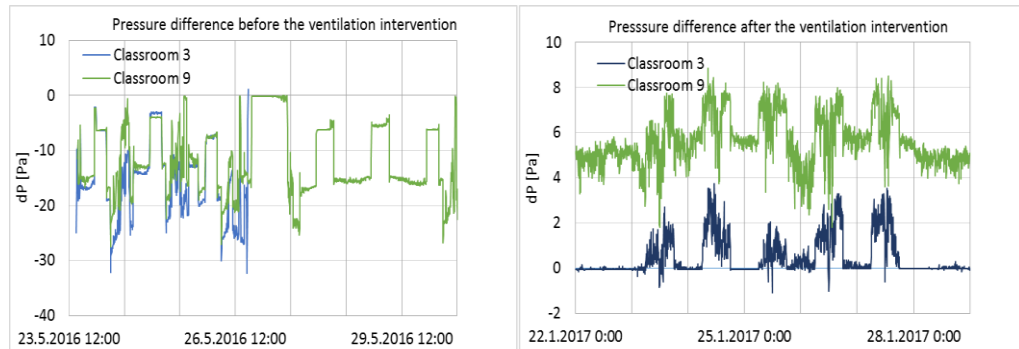
4.3.1 Kuuden koulun vertailututkimus

Kuuden koulurakennuksen tutkimustulokset käsitellään ja julkaistaan osana laajempaa hankeyhteistyötä. Kohteiden määrän lisääntyä alkuperäistä suunnitelmaa suuremaksi tulosten raportointi valmistuu vasta kevään 2018 aikana. Ensimmäinen käsikirjoitus (Järvi K. et al. Online questionnaire as a tool to assess symptoms and perceived indoor air quality in a school environment) on valmistunut huhtikuussa 2018.

4.3.2 Ilmanvaihdon ylipaineistustutkimus (tutkimuskohde I1)

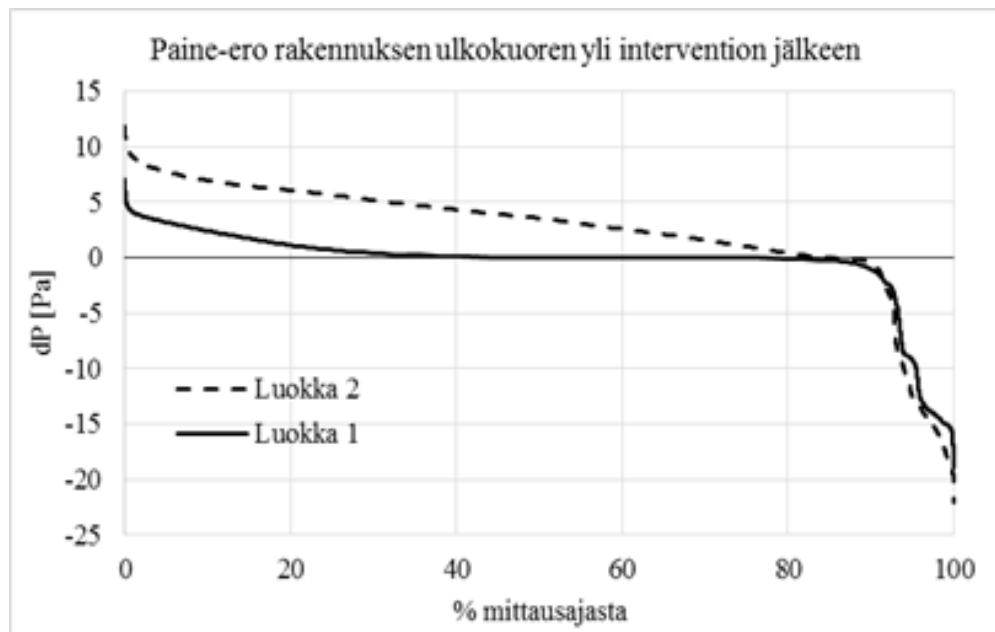
Ilmamäärät ja paine-ero

Ennen ilmanvaihdon interventiota tulo- ja poistoilmamäärät olivat epätasapainossa (keskimäärin ± 20 % suunnitteluarvoista) niin luokkahuoneissa kuin käytävällä ja wc-tiloissakin. Intervention jälkeen luokkien tuloilmamäärä oli poistoilmamäärää suurempi. Paine-erot ennen ja jälkeen intervention on esitetty Kuvassa 17.

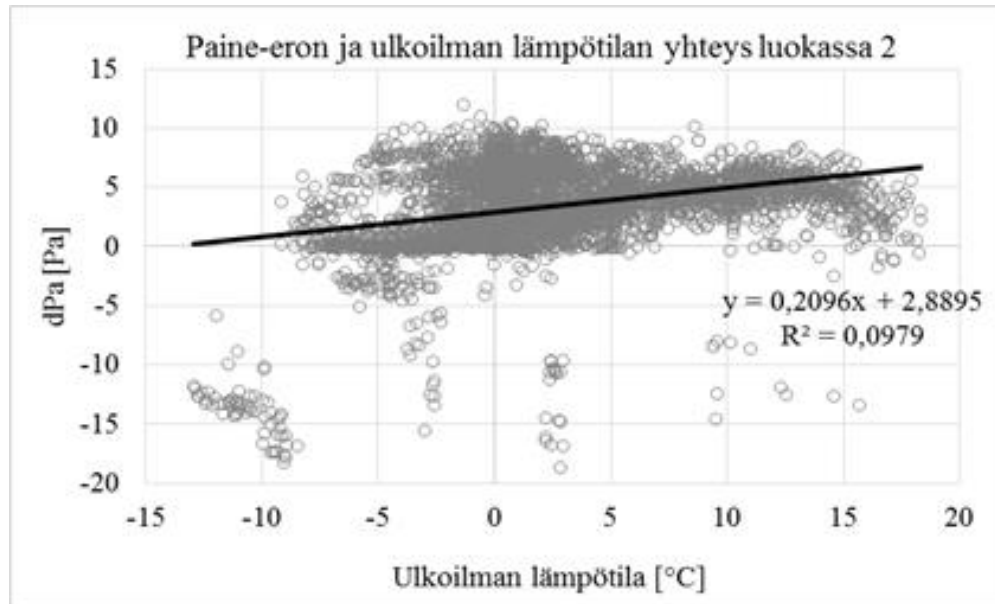


Kuva 17. Paine-ero sisä- ja ulkoilman välillä yhden viikon mittausjakson ajan ennen ja jälkeen intervention luokissa 1 (Classroom 3) ja 2 (Classroom 9). Luokassa 1 tulokset tallentuivat vain puolen viikon ajalta ennen interventiota laitteen toimintahäiriön vuoksi (Vornanen-Winqvist et al. 2018b).

Paine-erot ulkovaipan yli vaihtelivat ennen interventiota suuresti tutkituissa luokahuoneissa 1 ja 2. Vaihteluväli oli noin (-30)-0 Pa. Intervention jälkeen saavutettiin kohtuullinen ylipaine ja vaihtelu oli pientä. Luokassa 2 paine-ero oli tavoitetasolla 5-7 Pa 23 % mittausajasta, ja yli 0 Pa 84 % ajasta. Luokassa 1 tavoitetaso saavutettiin huomnommin, ja paine-ero oli yli 0 Pa 45 % mittausajasta; suurimman osan ajasta paine-ero oli hyvin lähellä 0 Pa. Ilmanvaihtojärjestelmä toimi vakioilmavirtaperiaatteella, mikä näkyy paine-eron muuttumisena ulkoilman lämpötilan mukaan, koska poistopuhallin siirtää suuremman tilavuusvirran lämpötilan laskiessa. Jatkuvan positiivisen paineen ylläpitämiseksi tiheyskorjattu ilmavirtojen ohjaus olisi suositeltavin ratkaisu. Paine-ero intervention jälkeen on esitetty pysyvyykäyrinä Kuvassa 18, ja ulkoilman lämpötilan vaikutus paine-eroon Kuvassa 19.



Kuva 18. Paine-eron pysyvyys intervention toteutuksen jälkeen (elokuu 2016 – toukokuu 2017) (Vornanen-Winqvist et al. 2018a).



Kuva 19. Ulkoilman lämpötilan vaikutus paine-eroon (elokuu 2016 – toukokuu 2017) (Vornanen-Winqvist et al. 2018a).

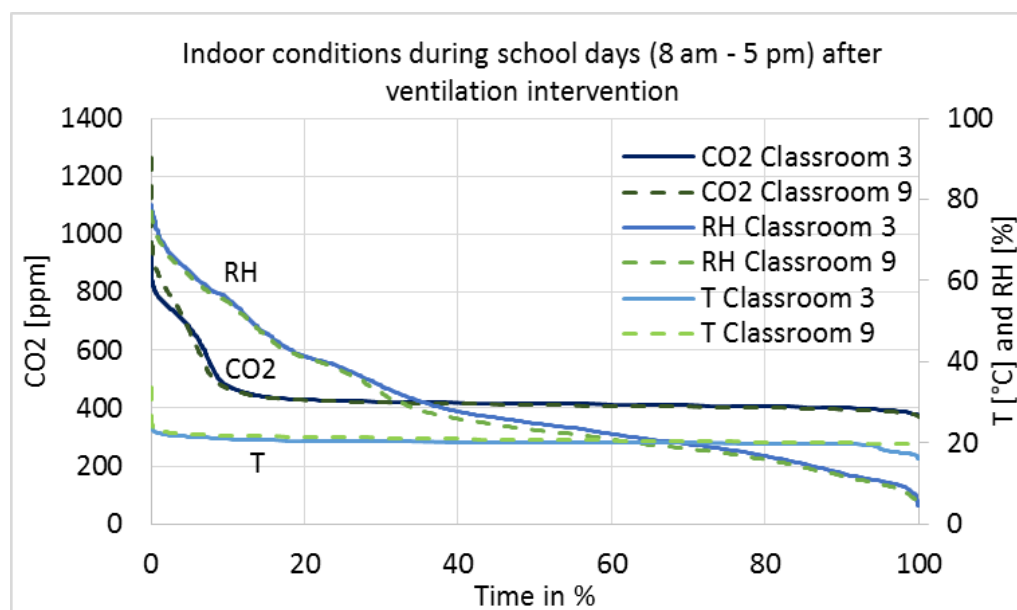
Koulun loma-aikojen ja muutamien muiden jaksojen aikana ilmanvaihtojärjestelmä oli vastoin tutkimussuunnitelmaa kytkettyyn pois päältä yön ajaksi, jolloin paine-ero on ollut negatiivinen. Pitkällä aikavälillä näillä jaksoilla ei ole suurta vaikutusta paine-erojen pysyvyyteen, mutta hetkellisesti ne ovat voineet aiheuttaa epäpuhtauksien kulkeutumista ilmavirtausten mukana, ja näin vaikuttaa käyttäjien kokemuksiin sisäilman laadusta.

Sisäilman laatu

Sisäilman hiilidioksidipitoisuus pysytteli koko mittausjakson ajan sekä ennen että jälkeen intervention Sisäilmastoluokituksen 2008 mukaisessa luokassa S1 (Sisäilmastoluokitus 2008). Hiilidioksidipitoisuuden keskiarvo oli koulupäivien aikana 518 ppm luokassa 1 ja 520 ppm luokassa 2. Lämpötilan keskiarvo oli 21 °C. Suhteellinen kosteus vaihteli ulkoilman suhteellisen kosteuden mukaan välillä 5–75 % ja 4–77 % (koulupäivien aikana) ja oli alle 20 % jopa 31 ja 26 % mittausajasta (luokat 1 ja 2). Kuiva ilma voi osaltaan selittää hengitysteiden, silmien ja ihon ärsytysoireilua ko. tiloissa (Azuma 2017). Välillisesti sisäilman RH voi vaikuttaa kokemuksiin sisäilman laadusta sekä materiaaliemissioihin (Haghighat, De Bellis 1998, Wolkoff 1998, Fang 1998). CO₂-pitoisuus, lämpötila ja suhteellinen kosteus pysyvyykäyrinä koulupäivien ajalta on esitetty Kuvasessa 20, ja pienimmät, suurimmat ja keskiarvot Taulukossa 8. VOC-, TVOC-, formaldehydi- ja CO-pitoisuudet sisäilmassa ennen ja jälkeen intervention on esitetty Taulukossa 9.

Taulukko 8. RH, T ja CO₂ luokissa 1 ja 2 koulupäivän aikana klo 8-17 elokuun 2016 ja toukokuun 2017 välillä.

	Luokka 1			Luokka 2		
	RH (%)	T (°C)	CO ₂ (ppm)	RH (%)	T (°C)	CO ₂ (ppm)
Keskiarvo	31	21	518	30	21	520
Min	5	17	391	4	19	382
Maks	75	24	972	77	34	1264



Kuva 20. CO₂-pitoisuuden, lämpötilan ja suhteellisen kosteuspitoisuuden pysyvyys luokissa 1 (classroom 3) ja 2 (classroom 9) koulupäivien aikana klo 8-17 elokuusta 2016 toukokuuhun 2017 (Vornanen-Winqvist et al. 2018b).

Taulukko 9. TVOC- ja VOC-pitoisuudet (>1 µg/m³), formaldehydi ja CO ennen (a) ja jälkeen (b) ilmanvaihdon intervention.

Sisäilman kemialliset yhdisteet (µg/m ³)	Luokka 1		Luokka 2		Käytävä		Toimenpidearvot (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015)
	a	b	a	b	a	b	
TVOC	31	19	42	19	34	27	400
Etikkahappo		2	1		1	2	50
Etikkahapon butyyliesteri						2	50
Oktametyylisyklotetrasiloksaani			4		2	4	50
Dekametyylisyklopentasiloksaani			4	1	2	3	50
2-etyyli-1-heksanoli (2E1H)	2		1		3	3	10
Fenoksietanoli		2				2	50
1-Butanoli						1	50
Nonanaali	3	1	3	1	3	2	50
Dekanaali	2	1	2	1	2	2	50
Asetoni			1				50
Formaldehydi	*	*	-	-	-	-	50/100
Hiilimonoksidi (CO)	-	300–1300	-	-	-	-	7000

(a) Näyte otettu toukokuussa 2016

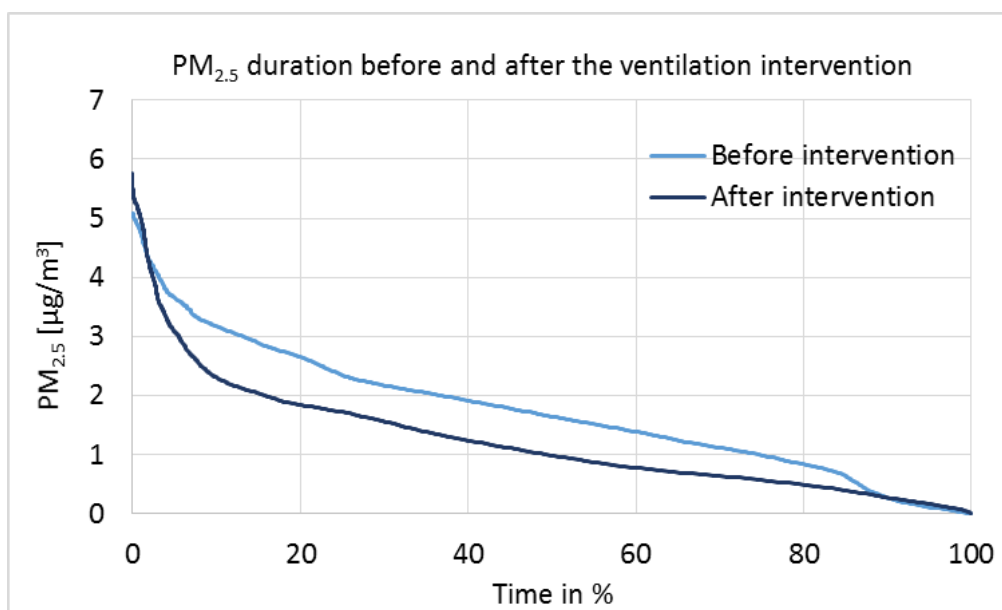
(b) Näyte otettu syyskuussa 2016

* Alle havainnointirajan 10 ppb (~12 µg/m³).

Yksittäisten VOCien pitoisuudet vaihtelivat välillä 1–4 µg/m³ (pitoisuudet > 1 µg/m³ analysoitiin). TVOC-pitoisuus oli ennen interventiota 31, 42 ja 34 µg/m³ (luokka 1, luokka 2 ja käytävä), ja intervention jälkeen vastaavasti 19, 19 ja 27 µg/m³. TVOC-pitoisuus pieneni 21–55 %. Tilastollisessa tarkastelussa ero ennen - jälkeen tuloksissa oli

tilastollisesti merkitsevä 95 % merkitsevyystasolla ($p=0,045$). Intervention lisäksi mitaustiloissa ei ollut tapahtunut muita tiedossa olleita muutoksia. Yleisesti ottaen pitoisuudet olivat hyvin pieniä Asumisterveysasetuksen (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015) raja-arvoihin verrattuna, mikä viittaa vähäpäästöisiin materiaaleihin ja tehokkaaseen ilmanvaihtoon. Formaldehydipitoisuus oli alle havainnointirajan ennen ja jälkeen intervention.

PM_{2,5}-pitoisuus vaihteli välillä 0,1 ja 5,9 µg/m³ sekä ennen että jälkeen intervention (raja-arvo on 25 µg/m³) (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015). Kuitenkin koko mittausajanjaksojen tilastollisessa tarkastelussa mediaanien ero on tilastollisesti erittäin merkitsevä ($p=0,000$), mikä viittaa hiukkaspitoisuuden pienentymiseen intervention seurauksena. Pitoisuus pysyvyyskäyrinä ennen ja jälkeen intervention on esitetty Kuvassa 21.



Kuva 21. PM_{2,5}-pitoisuuden pysyvyyskäyrät luokassa 1 ennen ja jälkeen intervention yhden viikon mittausjakson ajalta (Vornanen-Winqvist et al. 2018b).

Sisäilman mikrobit

Homepesäkkeet, jotka edustivat kasvatustaljojen vallitsevaa tyyppiä neljän viikon kasvatuksen jälkeen, tunnistettiin suku tai lajitasolle. Tulokset on esitetty Taulukossa 10. Tulokset osoittavat, että *Rhizopus* sp. kannat, jotka olivat kykenemättömiä kasvaamaan 37 °C:ssa, edustivat vallitsevaa homesukua sekä ennen ilmanvaihdon säätöä että sen jälkeen kerätyissä filtteripölyissä ja laskeutuneissa pölyissä. Toksigeeniset ja mahdollisesti mykoparasiittiset *Trichoderma atroviride* -kannat edustivat vallitsevaa tyyppiä ennen ilmanvaihdon interventiota kerätyissä pölyissä. Muita vallitsevia kantoja ennen ilmanvaihdon interventiota kerätyissä pölyissä olivat toksigeeniset, 37 °C:ssa kasvavat *Aspergillus*-kannat, ja toksigeeniset *Penicillium*-kannat.

Taulukko 10. Luokkien 1 ja 2 pinoille kertyneestä pölystä, ilmanvaihtokoneen poistoilmasuodattimesta sekä ulkoilmanäytteistä tunnistetut mikrobisuvut, pesäkkeitä sisältävien maljojen määrät kaikista maljoista ja toksisten pesäkkeiden osuus (suluissa %) (Vornanen-Winqvist et al. 2018a).

Pesäkkeitä sisältävät maljat	Laskeutunut pöly	Poistoilmasuodatin	Ulkoilma (90 %)
Ennen interventiota (80 %)			
3/10	<i>Rhizopus</i> sp.	<i>Rhizopus</i> sp.	
3/10	<i>T. atroviride</i> *	<i>T. atroviride</i> *	
7/10		<i>Penicillium</i> sp.*	
7/10		<i>Aspergillus niger</i>*¹	
2/10		<i>Aspergillus flavus</i> ¹	
1/10		(<i>Paecilomyces</i> sp.)* ¹	
2/10	<i>Asp. versicolor</i> *		
4/6			<i>Curvularia</i> sp.*
Intervention jälkeen (40 %)			
6/12	<i>Rhizopus</i> sp.	<i>Rhizopus</i> sp.	
10/12	<i>Penicillium</i> sp.	<i>Penicillium</i> sp.	
3/12		<i>Asp. westerdijkiae</i>*	
1/12		(<i>Penicillium expansum</i>)*	
1/12	(<i>Trichoderma</i> sp.)* ¹		
2/12	<i>Asp. versicolor</i> *		

¹ Potentiaalinen patogeeni

* Käytettyjen menetelmien perusteella toksinen

Sellulolyttiset paljon kosteutta tarvitsevat sienet, kuten *Trichoderma*-suvun edustajat, ovat hyvin sopeutuneita elämään kosteissa rakennuksissa. Tämän suvun edustajia eristetään usein kosteasta prosessoidusta puumateriaalista ja kipsilevyistä kouluissa ja julkisissa rakennuksissa (Lübeck et al. 2000, McMullin et al. 2017). *Trichoderma*-lajien kolonisoimista kosteista rakennusmateriaaleista vapautuu suuria määriä itiöitä sisäilmaan (McMullin et al. 2017). Itiöt ja hyfien palaset sisältävät toksisia peptaiboleja, ja niiden on osoitettu solultistuskokeissa vapauttavan histamiinia ja vahingoittavan solukalvoa (Mikkola et al. 2012, McMullin et al. 2017). Mahdollisesti haitallisia vaikutuksia lisäävät vielä altistuminen potentiaalisesti patogeenisten lajien, kuten *T. longibrachiatum* ja *T. citrinoviride*, eläville itiöille (Lübeck et al. 2000, Kuhls et al. 1999).

Ilmanvaihdon intervention jälkeen kerätyissä pölyissä vallitseva mikrobisto (*Rhizopus* sp:tä lukuun ottamatta) koostui pääasiassa myrkyttömistä *Penicillium*-kannoista ja toksigeenisistä *Aspergillus*-lajeista, jotka olivat kykenemättömiä kasvamaan 37 °C:ssa (Taulukko 9). Yksi toksigeeninen 37 °C:ssa kasvava *Trichoderma longibrachiatum* -pesäke, yksi toksigeeninen *T. trixiae* -pesäke ja yksi toksigeeninen *Penicillium expansum* -pesäke löytyivät viljelymaljalta. Koulurakennuksen ulkopuolelta kerätyistä vertailunäytteistä eristettiin vallitsevana homeena toksigeenisia *Curvularia* sp:ltä näyttäviä pesäkkeitä. Ulkoilmanäytteet sisälsivät näin ollen kaikista kerätyistä näytteistä suurimman osuuden toksigeenisia pesäkkeitä. Heinälatopölystä ei löytynyt toksigeenisia pesäkkeitä tai potentiaalisesti patogeenisiä *Aspergillus*-kantoja. Rakennuksen sisätiloista kerättyjen näytteiden mikrobisto erosi lajikoostumukseltaan rakennuksen ulkopuolelta kerättyjen näytteiden mikrobistosta. Sisätilanäytteissä havaittu mikrobiston laji-

koostumuksen muutos osui samaan aikaan ilmanvaihdon intervention kanssa. Mielenkiintoista oli, että mykoparasiittisiä *Trichoderma atroviride* -kantoja ei löytenyt ulkoilmanäytteistä tai heinälatopölystä. Tämä viittaa siihen, että tätä lajia edustavilla kannoilla, jotka eristettiin poistoilmasuodattimesta ja laskeutuneesta pölystä ennen ilmanvaihdon säätöä, saattaisi olla päästölähde rakennuksen sisällä.

Ilmanvaihtokoneen poistoilmasuodattimesta kerätty pöly on poikkeuksellisen kattava näyte, sillä se edustaa usean kuukauden kertymää sisätiloista tulevasta ilmasta. On kuitenkin huomattava, että suodattimelle on voinut kulkeutua myös esimerkiksi ulkoilmaa, jos käyttäjät ovat pitäneet ikkunoita auki, mikä on otettava huomioon tuloksia tulkittaessa. Näyte on peräisin rajatulta alueelta, mutta tarkasti ei voida osoittaa, mistä tilasta havaitut mikrobit ovat peräisin.

Sisäilmastokysely

Kyselyn tulokset ylipaineistetusta tutkimusrakennusosasta sekä rakennuksen muista osista ennen ja jälkeen intervention on esitetty Taulukossa 11.

Sisäilmastokyselyn tavoitteena oli tarkastella, vähenivätkö oire- ja olosuhdehaitat ylipaineistetussa rakennusosassa intervention seurauksena tai verrattuna muuhun kouluun. Vastaajien pienestä määrästä johtuen tuloksista ei kuitenkaan saatu merkittäviä tilastollisia eroja ennen ja jälkeen intervention. Lisäksi seurantakysely toteutettiin eri vuodenaikana kuin ensimmäinen kysely, mikä ei ole optimaalinen tilanne tulosten vertailtavuuden kannalta. Ensimmäisen kyselyn aikana esimerkiksi ulkoilman siitepölyn aiheuttama oireilu olisi voinut vaikuttaa kyselyn vastauksiin, vaikkakin ilmanvaihtokoneessa oli tehokkaat F7-luokan suodattimet. Toisen kyselyn aikana talvi-ilman kuivuus olisi voinut vaikuttaa vastauksiin. Kuiva ilma nostaa yskän, nenä- ja silmäoireiden sekä iho-oireiden esiintyvyyttä (Azuma 2017). Tyypillisesti koneellinen ilmanvaihto lisää oireilua, liittyen erityisesti juuri ilman kuivuuteen (Seppänen, Fisk 2004, Wargocki et al. 2002, J. J. Jaakkola, Heinonen & Seppänen 1991).

Näistä tekijöistä huolimatta kyselyt antoivat viitteitä siitä, että käyttäjien kokemusten muuttuminen poikkesi tutkitussa rakennusosassa verrattuna muuhun kouluun, jossa ylipaineistuksen kaltaisia muutoksia ei kyselyjen välillä tapahtunut. Yleisesti käyttäjien kokemus sisäilman laadusta heikkeni koko koulussa kyselyiden välillä, mikä voi olla osittain vuodenajan vaikutusta. Kuitenkin tutkitussa rakennusosassa kokemusten huononemista raportoitiin selkeästi vähemmän kuin muissa rakennusosissa. Tutkitussa osassa ainoat tiedossa olleet muutokset kyselyiden välillä olivat vuodenaika ja ilmanvaihdon interventio, kun taas muissa rakennusosissa vuodenaika oli ainoa muutos. Vuodenajan vaikutus näkyy muiden rakennusosien vastauksista enemmän kuin tutkimusosan vastauksista. Lisäksi psykososiaaliset tekijät olisivat voineet vaikuttaa eroihin kyselyiden välillä (Azuma 2017), mutta vastausten perusteella rakennusosissa ei ollut näissä tekijöissä eroja.

Taulukko 11. Sisäilmastokyselyn (Työterveyslaitos[©] 2006–2008, versio 2.0) tulokset ennen yli-
paineistusta (2016) ja viisi kuukautta ylipaineistuksen jälkeen (2017). Tilastollisesti merkitsevät
tulokset 10 % merkitsevyystasolla ($p < 0.1$) on tummennettu.

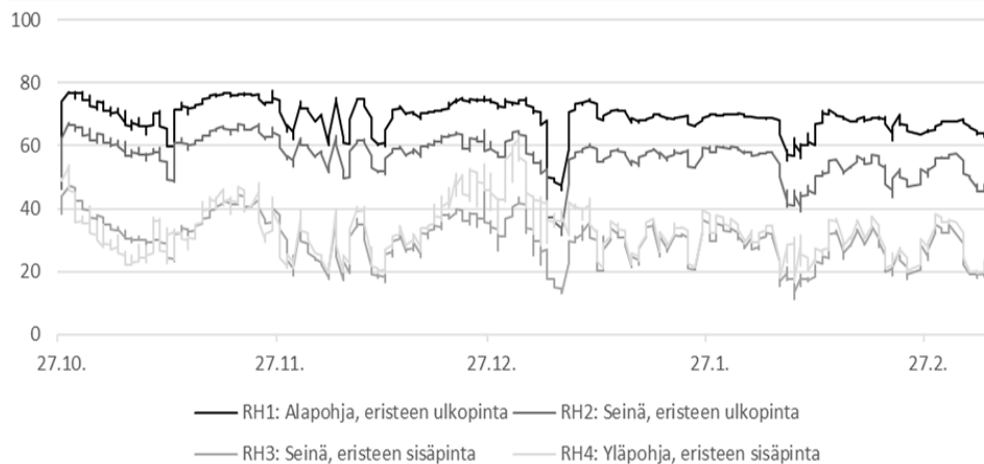
	1)	Tutkimusosa		Muut rakennusosat			
		2016	2017	p-arvo	2016	2017	p-arvo
Taustamuuttujia							
Vastanneiden lkm		10	8		28	29	
Vastaus%	71	58	62		65	72	
Naisten osuus (%)	21	60	75		75	86	
Päivittäin tupakoivia (%)		10	0		0	0	
Keskimääräinen ikä (v)		46	45		44	46	
Keskimääräinen työpaikassaoloaika (v)		8	6		10	10	
Olosuhdehaitat (%)							
Veto	22	10	38	0.275*	7	21	0.253*
Liian korkea huonelämpötila	17	20	0	0.477*	7	7	1.000*
Vaihteleva huonelämpötila	16	20	57	0.162*	11	22	0.295*
Liian matala huonelämpötila	13	30	25	1.000*	15	25	0.345
Tunkkainen (huono) ilma	34	30	38	1.000*	46	69	0.085
Kuiva ilma	35	40	50	1.000*	22	43	0.103
Riittämätön ilmanvaihto**	32	30	63	0.342*	43	55	0.352
Homeen tai maakellarin haju**	9	20	25	1.000*	14	21	0.730*
Muut epämiellyttävät hajut	17	40	25	0.638*	26	28	0.889
Tupakansavu	4	0	0	---	0	0	---
Melu	17	20	25	1.000*	39	45	0.672
Heikko valaistus / heijastukset	14	10	0	1.000*	7	10	1.000*
Havaittava pöly tai lika	25	40	38	1.000*	32	43	0.408
Työ mielenkiintoista ja innostavaa (%)							
Useimmiten	75	100	100	-	89	86	1.000*
Joskus	20	0	0		11	14	
Harvoin tai ei koskaan	4	0	0		0	0	
Työtä liian paljon (%)							
Useimmiten	20	10	0	1.000*	14	21	0.185*
Joskus	59	60	75		61	72	
Harvoin tai ei koskaan	21	30	25		25	7	
Vaikutusmahdollisuuksia työhön (%)							
Useimmiten	35	60	50	0.798*	46	38	0.839*
Joskus	44	30	50		46	55	
Harvoin tai ei koskaan	21	10	0		7	7	
Apuja ongelmiin työtovereilta (%)							
Useimmiten	72	80	100	0.477*	82	83	1.000*
Joskus	22	20	0		14	17	
Harvoin tai ei koskaan	6	0	0		4	0	
Sairaudet (%)							
Astma	8	10	13	1.000*	18	7	0.253*
Heinänuha	38	40	75	0.188*	46	45	0.903
Allerginen ihottuma	28	40	38	1.000*	14	17	1.000*
Stressi (%)							
Melko tai erittäin paljon	10	20	0		18	28	
Jonkin verran	28	20	63		29	41	
En lainkaan / vain vähän	63	60	38	0.214*	54	31	0.226
Työhön liittyvät oireet (%)							
Väsymys	16	10	13	1.000*	14	34	0.077
Pää tuntunut raskaalta	9	0	25	0.183*	11	17	0.706*
Päänsärky	7	0	13	0.444*	11	18	0.705*
Keskittymisvaikeudet	3	0	13	0.444*	4	14	0.352*
Silmien ärtyminen	17	20	13	1.000*	37	41	0.740*
Nenän ärtyminen	20	20	25	1.000*	39	62	0.085
Käheys / kurkun kuivuus	14	10	50	0.118*	36	45	0.483
Yskä	5	20	50	0.321*	11	17	0.706
Yöunta häiritsevä yskä	1	10	13	1.000*	0	0	-
Kasvojen kuivuus / punoitus	11	10	13	1.000*	7	29	0.036
Käsien iho-oireet	15	10	0	1.000*	4	14	0.352*
Hengenahdistus	3	10	13	1.000*	0	7	0.491*
Hengityksen vinkuminen	1	10	13	1.000*	0	0	-
Kuume tai vilunväreet	2	0	0	-	4	7	1.000*
Nivelsärky tai -jäykkyys	3	10	0	1.000*	4	0	0.491*
Lihaskipu	4	0	0	-	0	0	-
Muu oire		20	25	1.000*	4	3	1.000*

¹⁾ Vertailuarvot (Reijula, Sundman Digert 2004, Lahtinen, Sundman Digert & Reijula 2004, Hellgren 2008)

Fisher's Exact Test (SPSS)

Rakenteiden kosteustekninen toiminta

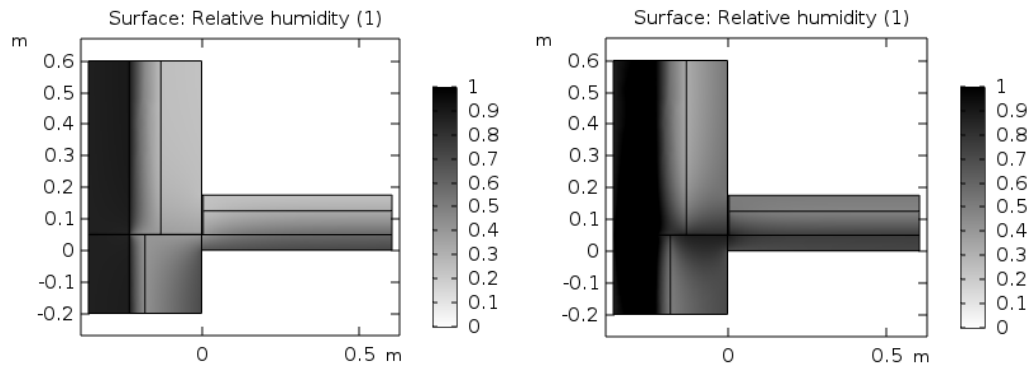
Seurantamittauksissa rakenteisiin ei havaittu kertyvän kosteutta talven aikana (Kuva 22). Korkeimmat suhteellisen kosteuden arvot (78 %) mitattiin mittausjakson alkupuolella pisteessä T&RH1, joka sijaitsi luokan 1 alapohjan eristekerroksen ulkopinnassa.



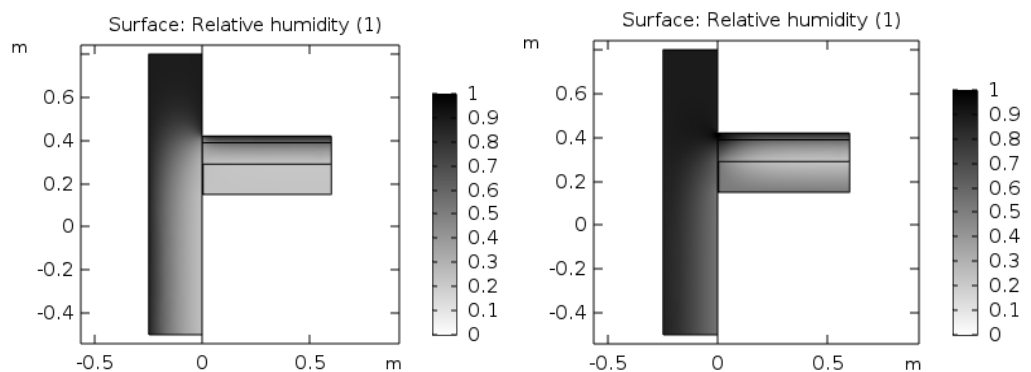
Kuva 22. Suurin mitattu suhteellinen kosteus oli luokan 1 alapohjan eristekerroksen ulkopinnassa (Mattila 2017).

Tutkittavat tilat pysyivät vaihtelevasti ylipaineisina, joten kenttämittausten perusteella ei voida tehdä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta perusteellisia johtopäätöksiä ylipaineistuksen vaikutuksesta. Ylipaineistusjakson aikana suoritetuissa seurantamittauksissa rakenteisiin ei kertynyt kosteutta. Seurantamittauksissa sisäilman havaittiin olleen talvella kuivaa, ja sisäilman kosteuslisä todettiin mitättömän pieneksi, mikä johtui luokahuoneiden toimivasta ilmanvaihdesta. Laskennallisessa kosteuden ja lämmönsiirron tarkastelussa konvektiovirtaus ei aiheuta rakenteille ylimääräistä kosteusrasitusta mitatulla sisäilman kosteuslisällä. Mitoitusarvon mukaisella kosteuslisällä konvektiovirtauksen aiheuttama kosteusrasitus olisi jo huomattava.

Tarkastelussa havaittiin, että sisältä ulos liikkuvan konvektiovirtauksen vaikutus rakenteiden kosteuteen riippuu sisäilman kosteuslisän suuruudesta. Mittausajankohtana sisäilma oli niin kuivaa, että sisäilman kosteuslisä oli käytännössä mitätön toimivan ilmanvaihdon takia. Laskentatulosten mukaan ylipaineen aiheuttama konvektiovirtaus ei kastele rakenteita mitatulla sisäilman kosteuslisällä. Sisäilman kosteuslisän ollessa 2 g/m^3 konvektion rakenteita kasteleva vaikutus on edelleen pieni. Kosteuslisän ollessa mitoitusarvon mukaisesti 5 g/m^3 konvektion rakenteita kasteleva vaikutus on jo selkeästi havaittavissa sekä alapohjan ja ulkoseinän että yläpohjan ja ulkoseinän rakenneliittymissä (Kuvat 23 ja 24).



Kuva 23. Alapohjan ja ulkoseinän liitoksen suhteellista kosteutta tarkasteltiin laskennallisesti. Vasemmassa kuvassa sisäilma on kentämittausten mukaisesti kuivaa, jolloin konvektiolla ei ole vaikutusta rakenteiden kosteuteen. Mitoitusarvon mukaisella sisäilman kosteuslisällä konvektiovirtaus kastelee rakenteita (oikea kuva). (Mattila 2017)



Kuva 24. Yläpohjan ja ulkoseinän liitoksen suhteellinen kosteus sisäilman ollessa kuivaa (vasen kuva) ja mitoitusarvon mukaisella kosteuslisällä (oikea kuva) (Mattila 2017).

Tuloksia on käsitelty tarkemmin julkaisuissa: (Vornanen-Winqvist et al. 2018a, Vornanen-Winqvist et al. 2018b, Vornanen-Winqvist, Toomla et al. 2017), (Mattila et al. 2017, Mattila et al. 2018, Mattila 2017).

4.3.3 Hybridi-ilmanvaihdon tutkimus (tutkimuskohde I2)

Ilmamäärät ja paine-erot

Tutkimuksessa havaittiin, että ilmanvaihtojärjestelmän toiminnassa oli perustavanlaatuisia puutteita, sillä tuloilmakanavien säätöpellit olivat perusilmanvaihdon tilanteessa täysin kiinni (Kuva 25). Alkuperäisessä ilmanvaihdon tilanteessa luokkin tuleva ilmamäärä oli näin ollen 0 L/s lukuun ottamatta lyhyitä hetkiä, jolloin CO₂-pitoisuuden nousu aiheutti säätöpeltien avautumisen ja tuloilmamäärän hetkellisen kasvun. Virhetilanne johtui säätöjärjestelmässä olevasta viasta, jota kiinteistön huoltohenkilöstö tai edes järjestelmää korjanneet yritykset eivät olleet kyenneet havaitsemaan tai säätötoimenpiteillä poistamaan. Luokkiin virtasi tuloilmaa ainoastaan hetkellisesti silloin, kun CO₂-pitoisuus kohosi yli 500 ppm:n. Näin ollen luokkien CO₂-pitoisuus pysytteli hyväksyttävällä tasolla, mutta perusilmanvaihto puuttui kokonaan.

Alkutilanteen tutkimusten jälkeen ilmanvaihdon ohjausjärjestelmän alun perin asennaneen yrityksen edustaja kävi korjaamassa säätövirheen, ja luokkiin saatiin toimiva perusilmanvaihto eli tuloilmakanavien säätöpellit olivat perustilassa vähintään 20 % auki (Kuva 25).



Kuva 25. Luokkaan johtavan tuloilmakanavan alkupää raitisilmakammiossa. Alkutilanteessa (kuva vas.) säätöpelti oli pääasiassa täysin kiinni. Ilmanvaihdon parannuksen jälkeen säätöpelti oli perustilassa vähintään 20 % auki (kuva oik.) (Vornanen-Winqvist, Ahmed et al. 2017).

Kaiken kaikkiaan ilmanvaihdon todettiin olevan vaikeasti hallittava kokonaisuus, sillä raitisilmakammiossa tuloilma jakaantui huonommin mutkaisella käytävällä oleviin tuloilmakanaviin painehäviön vuoksi. Näin ollen luokat, joiden tuloilmakanavat sijaitsivat mutkaisen kanavan loppupäässä (luokat 1 ja 2) saivat vähemmän tuloilmaa kuin suoralla käytävällä sijaitsevien kanavien luokat. Lisäksi luokkien ovien auki/kiinnipito vaikutti koko rakennusosan luokkien ilmanvaihtoon painesuhteiden muuttumisen vuoksi. Hybridijärjestelmän todettiin pystyvän tuottamaan tarvittava ilmanvaihto, mutta toimintaa pitäisi varmistaa ohjausjärjestelmän ja säätöjen teknisillä parannuksilla.

Ilmanvaihdon parannuksen jälkeen järjestelmän todettiin tuottavan riittävä ilmanvaihto luokkiin. Luokassa 2 tuloilmamäärä oli noin 72-112 L/s ja 4,8-7,4 L/s/hlö, kun henkilömäärän arvioitiin olevan 15 henkilöä. Ilmanvaihtojärjestelmän suunnittelun ja rakentamisen aikana voimassa olleen Rakentamismääräyskokoelman osan D2 (Ympäristöministeriö 2012) mukaan tuloilmamäärän vähimmäisvaatimus oli 6 L/s/hlö, joka täyttyi myös ilmanvaihtokoneeseen nähden epäsuotuisimmin sijoittuneissa luokissa maksimituloilmamäärällä.

Ennen ilmanvaihdon parannusta paine-ero vaihteli välillä -47,1 ja 8,9 Pa luokassa 1, ja välillä -36,7 ja 6 Pa luokassa 2 (keskiarvot: -7,0 and -7,9 Pa). Ajoittain suuri negatiivinen paine-ero on voinut aiheuttaa epäpuhtauksien virtaamista rakenteista sisäilmaan. Ilmanvaihdon parannuksen jälkeen paine-ero oli tasaisempi, ja vaihteli välillä -17,5 ja 4,7 Pa luokassa 1, ja välillä -3,6 ja 0,7 Pa luokassa 2 (keskiarvot: -6,8 and -1,0 Pa). Joissain luokissa paine-ero oli positiivinen.

Painevaihteluiden laskennallisessa mallinnuksessa havaittiin, että yläkerran tarkastelussa luokassa oli ylipaine kaikissa lämpötiloissa riippumatta apupuhaltimen käytöstä. Alakerran luokassa 1 vallitsi alipaine ilman apupuhallinta, mutta ylipaine puhaltimen ollessa päällä. Apupuhaltimen käytöllä voidaan näin ollen varmistaa, ettei rakenteista

kulkeudu epäpuhtauksia sisäilmaan ilmapuotokohdista. Tulos on kuitenkin suuntaa antava.

Sisäilman laatu

Sisäilman T, RH ja CO₂ luokissa 1 ja 2 ennen ja jälkeen ilmanvaihdon parannuksen koulupäivien klo 8-17 ajalta on esitetty Taulukossa 12 (minimit, maksimit ja keskiarvot). Lisäksi taulukossa on esitetty ulkoilman vastaavat arvot, jotka on otettu Ilmatieteen laitoksen säähavaintoaseman mittausdatasta kyseiseltä kuukaudelta. Havaintoasema sijaitsee koulusta noin kuuden kilometrin päässä. Sääolosuhteet eivät poikenneet merkittävästi toisistaan eri mittausjaksojen aikana.

Taulukko 12. RH, T ja CO₂ luokissa 1 ja 2 koulupäivän aikana klo 8-17 kahdeksan vrk:n mittausjakson ajalta ennen ilmanvaihdon parannusta, ja 14 vrk:n mittausjakson ajalta ilmanvaihdon parannuksen jälkeen.

		Luokka 1			Luokka 2			Ulkoilma, per kk*
		RH (%)	T (°C)	CO ₂ (ppm)	RH (%)	T (°C)	CO ₂ (ppm)	T (°C)
Ennen	Min	18	20	394	16	20	402	-1,4
	Maks	40	22	1431	38	22	829	13.7
	Keskiarvo	29	21	488	27	21	458	4.9
Jälkeen	Min	11	12	394	10	20	400	-7.8
	Maks	46	22	801	29	21	700	11.9
	Keskiarvo	23	20	464	22	20	450	1.0

* Ilmatieteen laitoksen mittausdata

Sisäilmastoluokituksen 2008 mukaan CO₂-pitoisuus ja RH olivat luokassa S1. Lämpötila oli tasainen ja tavoitetasolla noin 21 °C. CO₂-pitoisuuden hallinnan merkitys on laajalti tiedossa (Salthammer et al. 2016b). On kuitenkin huomattava, että tutkitussa rakennuksessa säätöjärjestelmästä johtuen CO₂-pitoisuus ei kohonnut eikä näin ollen viitanut ilmanvaihdon puutteisiin, jotka silti olivat sisäilman laadun kannalta merkittäviä. Kun CO₂-pitoisuuksia tarkasteltiin kaksisuuntaisella t-testillä, ero ennen ja jälkeen ilmanvaihdon parannusten oli merkittävä 100 %:n luottamustasolla (p=0,000). Tarkoituksenmukainen perusilmanvaihto laski siis myös luokkien käytönaikaista CO₂-pitoisuutta.

Luokan 2 TVOC-pitoisuus oli 71,5 µg/m³ ennen ilmanvaihdon parannusta ja 10 µg/m³ parannuksen jälkeen, eli väheni 86 %. Myös yksittäisten VOC-yhdisteiden pitoisuudet laskivat asetonia ja nonanaalia lukuun ottamatta, vaikkakin kaikki pitoisuudet olivat alle Asumisterveysasetuksen raja-arvojen (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015). Työterveyslaitoksen julkaisemien viitearvojen mukaan ennen ilmanvaihdon parannusta mitatut tolueeni- ja dekametyylisyklopentasiloksaani-pitoisuudet (25 ja 15 µg/m³) ylittivät arvot (4 ja 10 µg/m³), jotka voivat viitata epätavanomaiseen lähteeseen ja edellyttää lisätutkimuksia (Työterveyslaitos 2017). Nämä yhdisteet voivat kuitenkin olla peräisin esimerkiksi puhdistus- tai kosmetiikka-aineista (Wang, Ang & Tade 2007, Salonen 2009).

Sisäilman mikrobit

Taulukossa 13 esitetään pyyhintäpölystä viljeltyjen homeiden vallitsevat kannat. Pölyt kerättiin kahdesta tilasta ennen ilmanvaihdon korjausta toukokuussa 2016 ja kolmesta tilasta ilmanvaihdon korjausten jälkeen maaliskuussa 2017. Tuloksista näkee, että mikrobin vallitsevat tyypit ennen ilmanvaihdon korjausta olivat ihmisille potentiaalisesti patogeeninen *T. citrinoviride* (Hatvani et al. 2013), toksigeeninen potentiaalisesti mykoparasiittinen (Howell 2003) *Trichoderma* sp., ja myrkytön ei-patogeeninen *Rhizopus* sp. Pölyt, jotka kerättiin ilmanvaihdon korjausten jälkeen, sisälsivät monimuotoiseman homelajiston, joka koostui myrkyttömistä *Penicillium*-lajeista sekä muutamasta potentiaalisesti patogeenisesta *Aspergillus*- ja *Eurotium*-pesäkkeestä.

Taulukko 13. Viljelykelpoinen homelajisto laskeutuneessa pölyssä, joka kerättiin vaakapinoilta lattiatason yläpuolelta. Pölyt kerättiin ennen ilmanvaihdon parannusta ja sen jälkeen.

Koulunäytteet	Lasketuneet pölyt		
Ennen ilmanvaihdon parannusta	Kerätty 31.5.2016	Pesäkkeiden lukumäärät / malja	Pesäkkeitä sisältävien maljojen lukumäärä / kaikki maljat
Luokka 2 ja aula	<i>Trichoderma citrinoviride</i> ^{ab}	> 100	1/6
	<i>Rhizopus</i> sp.	Plate overgrown	2/6
	<i>Trichoderma</i> sp. ^a	>100	2/6
Ilmanvaihdon parannuksen jälkeen	Kerätty 6.3.2017		
Luokat 1 ja 2 sekä kolmas luokka samasta rakennusosasta	<i>Penicillium</i> sp. ^c	>100-120	3/9
	<i>Penicillium</i> sp. ^d	10	2/9
	<i>Aspergillus westerdijkiae</i> ^a	2-3	2/9
	<i>Asp. niger</i> ^{ab}	1-2	3/9
	<i>Eurotium</i> sp. ^a	1	1/9

^a Pesäkkeet, jotka olivat myrkyllisiä siittiöille ja munuaissoluille.

^b Pesäkkeet, jotka edustivat potentiaalisesti patogeenistä lajia (kasvoivat 37 °C:ssa).

^c Terveticillinen *Penicillium*-laji.

^d Monoverticillinen *Penicillium*-laji.

Kolme tavallisinta koulurakennuksessa esiintyvää homesukua kohtalaista mannerilmastoa edustavilla alueilla ovat *Cladosporium* spp., *Penicillium* spp., ja *Aspergillus* spp. (Salonen et al. 2015). Aiemmissä tutkimuksissa *Trichoderma* sp. ja *Aspergillus versicolor* on yhdistetty koulujen kosteus- ja homevaurioihin. (Salonen et al. 2015). *T. citrinoviride* on potentiaalisesti ihmispatogeeninen homelaji, joka tuottaa toksisia peptaiboleja ja jonka tiedetään kasvavan kosteissa rakennusmateriaaleissa. (Mikkola et al. 2012, Kuhls et al. 1999, Hatvani et al. 2013). Toksisia peptaiboleja tuottavia *T. longibrachiatum* ja *T. harzianum* -kantoja on eristetty vesivahinkoisista rakennusmateriaaleista suomalaisista asuinrakennuksista (Peltola et al. 2004). Tietojemme mukaan tämä on ensimmäinen raportoitu havainto patogeenisesta *T. citrinoviride* -esiintymästä vallitsevana lajina laskeutuneessa pölyssä suomalaisessa koulussa.

Koska laskeutunut pöly on todennäköisesti peräisin ilmasta, altistuminen eläville *T. citrinoviride* -itiöille ilmasteitse on ollut mahdollista, mikä voi olla huolenaihe koulurakennuksessa. Aikaisemmat tutkimukset osoittavat merkitsevän korrelaation astman ja *T.*

citrinovidelle spesifisille IgG-vasta-aineiden välillä, mikä viittaa siihen, että tällä homelajilla saattaa olla osuutta astman etiologiassa. (M. Jaakkola et al. 2002, Hyvarinen et al. 2001).

Laskeutunut pöly, joka oli kerätty lähes vuosi ilmanvaihdon parannuksen jälkeen, ei sisältänyt pesäkkeitä muodostavia *T. citrinoviride* -itiöitä. Tämä viittaa siihen, että ilmanvaihdon parannus poisti *T. citrinoviden* itiöiden leviämisen sisäilmaan. Monet *Trichoderma*-lajit ovat mykoparasiitteja (Howell 2003), ja niiden elävien itiöiden läsnäolon on raportoitu viittaavan kosteuteen ja homekasvuun rakenteissa (Salonen et al. 2015).

Sisäilmastokysely

Työntekijöille tehdyn sisäilmastokyselyn tulokset ennen ja jälkeen ilmanvaihdon parannuksen on esitetty Taulukossa 14. Taulukossa on tulokset tutkitusta rakennusosasta sekä toisesta täysin vastaavasta hybridi-ilmanvaihdolla varustetusta rakennusosasta. Molemmista rakennusosissa oli kaksi kerrosta, jossa kussakin kahdeksan luokkatilaa sekä yhteensä noin 38–40 työntekijää.

Ainoa tilastollisesti 50 %:n luottamustasolla merkitsevä ero kyselyiden välillä oli vedon tunne ($p=0,037$), joka lisääntyi kyselyiden välillä. Myös kuivan ja kylmän ilman tunne lisääntyi. Nämä tekijät selittyvät vuodenajalla. Ensimmäisessä kyselyssä tunkkainen ilma (53 %), riittämätön ilmanvaihto (47 %) ja epämiellyttävät hajut (40 %) olivat vertailuarvoihin nähden eniten poikkeavia. Ilmanvaihdon parannusten jälkeen kokemukset vähenivät vertailuarvojen tasolle, mutta ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Samansuuntainen muutos havaittiin toisessa vastaavassa rakennusosassa.

Ensimmäinen kysely tehtiin toukokuussa 2016 lämpimän alkukesän aikana. Koulujen kesäloma oli alkamassa kahden viikon kuluttua. Seurantakysely tehtiin maaliskuussa 2017 talvikauden aikana, jolloin lomia ei ollut lähiaikoina tulossa. Tämä asetelma ei ollut tutkimuksen kannalta tarkoituksenmukainen, mutta projektin resurssien vuoksi kyselyt jouduttiin toteuttamaan eri vuodenaikoina. Tiedetään, että vuodenaika ja psykososiaaliset tekijät vaikuttavat käyttäjien kokemuksiin sisäilman laadusta (Brauer, Mikkelsen 2010, Haghghat, Donnini 1999, Lahtinen et al. 2002, Frontczak, Wargocki 2011). Tässäkin tutkimuksessa ulkoilmaolosuhteet poikkesivat kyselyiden aikana merkittävästi toisistaan, mikä on todennäköisesti vaikuttanut vastauksiin.

Toisessa vastaavassa rakennusosassa astman esiintyvyys oli verrattain suuri, mikä todennäköisesti vaikutti vastauksiin myös. Merkittävin kyselyn tulkintaa heikentävä tekijä on vastausten vähyyden, mikä esti luotettavan tilastollisen analyysin tuloksista. Jotta kyselyiden käytettävyys kouluympäristöissä olisi parempi ja vastausten määrä ja koko käyttäjäryhmän edustavuus kattavampi, tulisi kouluympäristöjen kysely toteuttaa myös oppilaille heille soveltuvien kyselyin (Lampi 2015).

Tutkimuksen tuloksia on käsitelty tarkemmin julkaisussa: Vornanen-Winqvist, Ahmed et al. 2017.

Taulukko 14. Sisäilmastokyselyn (Työterveyslaitos[©] 2006–2008, versio 2.0) tulokset ennen ilmanvaihdon parannusta (2016) ja viisi kuukautta parannuksen jälkeen (2017). Tilastollisesti merkitsevät tulokset 10 % merkitsevyystasolla ($p < 0.1$) on tummennettu.

	1)			Tutkimusosa		Vastaavanlainen toinen rakennusosa	
	2016	2017	<i>p</i> -arvo	2016	2017	<i>p</i> -arvo	
Taustamuuttujia							
Vastanneiden lkm	15	16		16	17		
Vastaus%	71	79	80	84	85		
Naisten osuus (%)	21	87	88	94	94		
Päivittäin tupakoivia (%)	13	6		0	0		
Keskimääräinen ikä	41	42		41	38		
Keskimääräinen työpaikassaoloaika	5	5		4	4		
Olosuhdehaitat (%)							
Veto	22	7	44	0.037*	13	47	0.057*
Liian korkea huonelämpötila	17	0	0	-	0	6	1.000*
Vaihteleva huonelämpötila	16	20	31	0.685*	19	27	0.685*
Liian matala huonelämpötila	13	27	56	0.095	19	53	0.041
Tunkkainen (huono) ilma	34	53	38	0.376	80	71	0.691*
Kuiva ilma	35	13	44	0.113*	14	41	0.132*
Riittämätön ilmanvaihto	32	47	31	0.379	75	59	0.325
Homeen tai maakellarin haju	9	7	0	0,484*	7	6	1.000*
Muut epämiellyttävät hajut	17	40	19	0,252*	38	24	0.465*
Tupakansavu	4	0	0	-	13	0	0.227*
Melu	17	47	56	0,594	19	50	0.063
Heikko valaistus / heijastukset	14	7	13	1.000*	6	0	0.485*
Havaittava pöly tai lika	25	27	25	1.000*	25	35	0.708*
Työ mielenkiintoista ja innostavaa (%)							
Useimmiten	75	73	88	0.394*	88	82	1.000*
Joskus	20	27	13		13	18	
Harvoin tai ei koskaan	4	0	0		0	0	
Työtä liian paljon (%)							
Useimmiten	20	0	13	0.081*	13	18	0.700*
Joskus	59	40	63		56	65	
Harvoin tai ei koskaan	21	60	25		31	18	
Vaikutusmahdollisuuksia työhön (%)							
Useimmiten	35	27	25	0.513*	25	24	0.577*
Joskus	44	60	75		63	47	
Harvoin tai ei koskaan	21	13	0		13	29	
Apuja ongelmiin työvereilta (%)							
Useimmiten	72	87	88	1.000*	88	76	0.050*
Joskus	22	13	13		0	24	
Harvoin tai ei koskaan	6	0	0		13	0	
Sairaudet (%)							
Astma	8	0	0	-	19	18	1.000*
Heinänuha	38	67	56	0.552*	50	41	0.611
Allerginen ihottuma	28	40	19	0.252*	13	12	1.000*
Stressi (%)							
Melko tai erittäin paljon	10	7	0	0.450*	13	24	0.735*
Jonkin verran	28	27	47		50	35	
En lainkaan / vain vähän	63	67	53		38	41	
Työhön liittyvät oireet (%)							
Väsytys	16	7	19	0.600*	19	29	0.688*
Pää tuntunut raskaalta	9	20	13	0.654*	6	35	0.085*
Päänsärky	7	13	6	0.600*	19	29	0.688*
Keskittymisvaikeudet	3	0	6	1.000*	6	18	0.601*
Silmien ärtyminen	17	27	31	1.000*	20	41	0.265*
Nenän ärtyminen	20	13	25	0,654*	19	35	0.438*
Käheys / kurkun kuivuus	14	13	38	0,220*	31	35	0.805
Yskä	5	0	13	0,484*	6	18	0.601*
Yöunta häiritsevä yskä	1	0	6	1.000*	0	0	-
Kasvojen kuivuus / punoitus	11	7	25	0.333*	13	25	0.654*
Käsien iho-oireet	15	0	19	0.226*	7	24	0.338*
Hengenahdistus	3	7	0	0.484*	0	6	1.000*
Hengityksen vinkuminen	1	7	0	0.484*	0	6	1.000*
Kuume tai vilunväreet	2	0	0	-	7	6	1.000*
Nivelsärky tai -jäykkyys	3	0	0	-	0	0	-
Lihaskipu	4	0	0	-	0	0	-
Muu oire	0	0	0	-	9	12	0.832*

¹⁾ Vertailuarvot (Reijula, Sundman Digert 2004, Lahtinen et al. 2004, Helligren 2008)

Fisher's Exact Test (SPSS)

4.4 Koerakennustutkimukset

Sisäilman mittaukset

Koerakennus 1

Kuusivaneripäälysteisessä koerakennuksessa ilmanäytteen TVOC-pitoisuus oli lähtötasolla 338 µg/m³. Ilmanvaihdon käynnistämisen jälkeen ja ulkoilmavirran kasvaessa koerakennuksen TVOC-pitoisuus pieneni. Tunnistetuista VOC-yhdisteistä suurin pitoisuus lähtötasolla oli α-pineenillä, jonka osuus kuitenkin putosi ilmanvaihdon käynnistyttyä. Kaikilla tavoitetasoilla suurimmat pitoisuudet olivat etikkahapolla eikä osuuk- sissa tapahtunut suuria muutoksia, lukuun ottamatta α-pineenin osuuden laskua suu- rimmalla ulkoilmavirralla. Koerakennuksen olosuhteet, TVOC-pitoisuudet, suurimpien yksittäisien yhdisteiden prosentuaaliset osuudet sekä niitä vastaavat pitoisuudet esi- tetään Taulukossa 15.

Taulukko 15. Ilmanäytteiden tulokset koerakennuksessa 1.

Ilmanäytteet Koerakennus 1	Lähtötaso	Tavoitetaso 0,5 l/s/m ²	Tavoitetaso 1,0 l/s/m ²	Tavoitetaso 2,0 l/s/m ²
Lämpötila [°C]	19,0	24,3	21,7	20,3
RH [%]	25,0	22,1	22,0	31,6
TVOC [µg/m ³]	338	145	114	100
Etikkahappo [µg/m ³]	4 (1,3 %)	16 (10,9 %)	17 (14,6 %)	9 (8,9 %)
α-Pineeni [µg/m ³]	80 (23,6 %)	15 (10,4 %)	12 (10,3 %)	4 (3,6 %)
Heksadekaani [µg/m ³]	11 (3,2 %)	14 (9,6 %)	10 (8,5 %)	9 (8,5 %)
Pentadekaani [µg/m ³]	16 (4,7 %)	12 (8,5 %)	11 (9,2 %)	7 (7,4 %)
Heksanaali [µg/m ³]	14 (4,2 %)	9 (6,2 %)	5 (4,6 %)	7 (7,4 %)

Online-mittauksien TVOC-pitoisuudet olivat ilmanäytteiden tuloksia pienempiä lukuun ottamatta kokeiden aloitushetkeä (200 µg/m³), josta pitoisuus laski noin viidessä tun- nissa alle 100 µg/m³. Pitoisuudessa havaittiin pientä laskua, kun ilmanvaihdon ulkoil- mavirran määrää kasvatettiin tavoitetasosta 0,5 tasolle 1,0, mutta sen jälkeen muu- tosta ei ollut havaittavissa. TVOC-pitoisuus vaikutti seuraavan lämpötilan vaihteluita, joten lämpötilaero tavoitetasojen 0,5 ja 1,0 välillä on oletettavasti vaikuttanut laskuun ulkoilmavirran määrää enemmän. Tulokset kaikilla tavoitetasoilla esitetään Taulukossa 16.

Taulukko 16. Online-mittauksien tulokset koerakennuksessa 1.

Online-mittaukset Koerakennus 1	Tavoitetaso 0,5 l/s/m ²		Tavoitetaso 1,0 l/s/m ²		Tavoitetaso 2,0 l/s/m ²	
	Vaihteluväli	Kes- kiarvo	Vaihteluväli	Kes- kiarvo	Vaihteluväli	Kes- kiarvo
Lämpötila [°C]	23,2-28,5	26,0	18,5-25,2	20,6	19,2-25,6	22,0
RH [%]	14,2-19,0	16,1	11,0-20,0	14,6	11,6-22,3	17,1
TVOC [µg/m ³]	80-200	92	59-86	67	59-75	68
Formaldehydi [µg/m ³]		12		12		12
Hiilidioksidi [ppm]		413		359		372

Koerakennus 2

Kipsilevyypintaisessa koerakennuksessa sisäilman TVOC-pitoisuuden lähtötaso oli selvästi korkeampi kuin ilmanvaihdon ollessa päällä. Ilmanvaihtotasoa tutkittaessa pitoisuus lähes puolittui ilmanvaihdon vaihtuessa tavoitetasolta 0,5 tasolle 1,0, mutta suurimmalla tasolla pitoisuus nousi. Yksittäisiä yhdisteitä tarkasteltaessa huomattavinta oli etikkahapon osuuden moninkertaistuminen tavoitetasolla 2,0. Koerakennuksen 1 tavoin α -pineenin osuus oli suuri ennen ilmanvaihdon käynnistymistä, mutta laski selvästi ulkoilmavirran tehostuessa. Ilmanäytteiden tulokset esitetään Taulukossa 17 ja online-mittauksien tulokset Taulukossa 18. TVOC-pitoisuus online-mittauksien aikana pysyi matalana eikä merkittäviä muutoksia ilmanvaihtotasojen välillä esiintynyt. Koerakennuksen 1 tavoin TVOC-pitoisuuden vaihtelut vaikuttivat seuraavaan sisäilman lämpötilan vaihteluita.

Taulukko 17. Ilmanäytteiden tulokset koerakennuksessa 2.

Ilmanäytteet Koerakennus 2	Lähtötaso	Tavoitetaso 0,5 l/s/m ²	Tavoitetaso 1,0 l/s/m ²	Tavoitetaso 2,0 l/s/m ²
Lämpötila [°C]	19,0	24,7	21,6	20,4
RH [%]	25,0	21,2	21,9	31,7
TVOC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	500 - 700*	203	112	147
Etikkahappo [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	3-5 (0,7 %)	8 (3,8 %)	3 (2,8 %)	20 (13,9 %)
α -Pineeni [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	81-113 (16,2 %)	18 (8,7 %)	8 (6,9 %)	6 (4,3 %)
Pentadekaani [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	33-47 (6,7 %)	25 (12,4 %)	18 (16,0 %)	19 (13,0 %)
Tetradekaani [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	23-32 (4,5 %)	13 (6,4 %)	8 (6,8 %)	8 (5,5 %)
Heksanaali [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	41-58 (8,2 %)	8 (3,9 %)	4 (3,9 %)	7 (4,5 %)

* Arvio TVOC-pitoisuudesta, sillä mitattu pitoisuus sijaitsi käytetyn kalibraatiosuoran ulkopuolella

Taulukko 18. Online-mittauksien tulokset koerakennuksessa 2.

Online-mittaukset Koerakennus 2	Tavoitetaso 0,5 l/s/m ²		Tavoitetaso 1,0 l/s/m ²		Tavoitetaso 2,0 l/s/m ²	
	Vaihteluväli	Kes- kiarvo	Vaihteluväli	Kes- kiarvo	Vaihteluväli	Kes- kiarvo
Lämpötila [°C]	21,4-25,4	23,3	20,4-23,0	21,3	18,5-22,7	20,4
RH [%]	15,7-20,2	18,3	20,2-27,0	25,0	11,4-30,2	21,6
TVOC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	72-85	77	77-86	82	62-86	72
Formaldehydi [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		12		12		12
Hiilidioksidi [ppm]		392		370		359

Koerakennus 3

Hirsirakenteisessa koerakennuksessa otettujen ilmanäytteiden TVOC-pitoisuudet sijaitsivat analyysissä käytetyn kalibraatiosuoran ulkopuolella, joten tarkkoja arvoja ei voitu määrittää. Arvioidut pitoisuudet olivat kuitenkin suuria kaikilla ilmanvaihdon tavoitetasoilla, vaikka ne pienenevät ilmanvaihdon käynnistyksen jälkeen ja ulkoilmavirran tehostuessa. Selvästi suurimmat pitoisuudet yksittäisistä yhdisteistä olivat terpeenihin kuuluvilla α -pineenillä ja 3-kareenilla. Ilmanäytteiden tulokset esitetään Taulukossa 19.

Taulukko 19. Ilmanäytteiden tulokset koerakennuksessa 3.

Ilmanäytteet Koerakennus 3	Lähtötaso	Tavoitetaso 0,5 l/s/m ²	Tavoitetaso 1,0 l/s/m ²	Tavoitetaso 2,0 l/s/m ²
Lämpötila [°C]	19,0	24,0	21,7	20,7
RH [%]	38,0	22,6	22,6	30,3
TVOC [µg/m ³]	1500-2000*	1000-1500*	500-700*	500-600*
α-Pineeni [µg/m ³]	453-604 (30,2 %)	393-589 (39,3 %)	173-241 (34,5 %)	132-159 (26,4 %)
3-Kareeni [µg/m ³]	385-513 (25,6 %)	221-332 (22,1 %)	96-135 (19,3 %)	77-92 (15,4 %)
D-Limoneeni [µg/m ³]	180-240 (12,0 %)	52-78 (5,2 %)	29-40 (5,7 %)	25-30 (5,0 %)
Tetradekaani [µg/m ³]	23-31 (1,6 %)	21-32 (2,1 %)	15-22 (3,1 %)	23-28 (4,6 %)
Heksanaali [µg/m ³]	15-20 (1,0 %)	36-54 (3,6 %)	18-26 (3,7 %)	28-34 (5,6 %)

* Arvio TVOC-pitoisuudesta, sillä mitattu pitoisuus sijaitsi käytetyn kalibraatiosuoran ulkopuolella

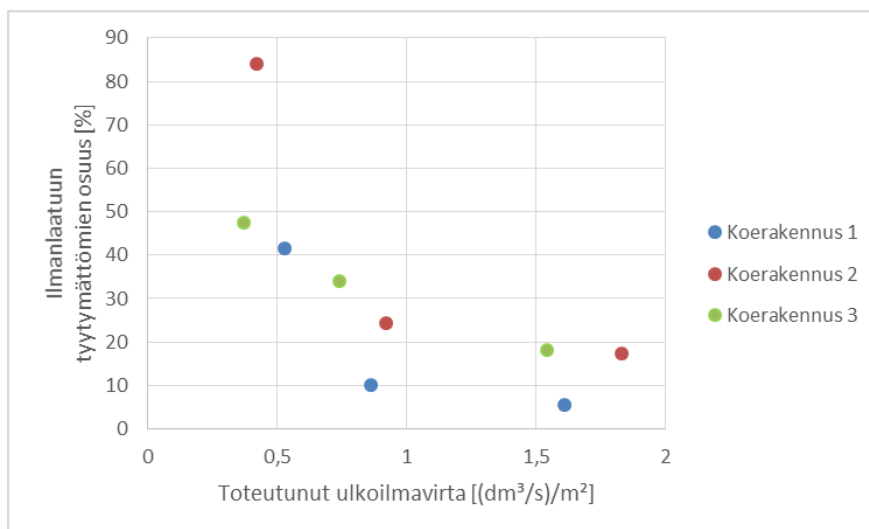
Online-mittauksien TVOC-pitoisuudet olivat korkeampia kuin kahdessa muussa koerakennuksessa, mutta selvästi matalampia ilmanäytteistä saatuihin pitoisuuksiin verrattuna. TVOC-pitoisuus vaikutti laskevan ilmanvaihdon tehostuessa. Muissa koerakennuksissa ilmennyttä pitoisuuden lämpötilariippuvuutta ei koerakennuksessa 3 esiintynyt yhtä selkeästi. Online-mittauksien tulokset koerakennuksessa 3 esitetään Taulukossa 20.

Taulukko 20. Online-mittauksien tulokset koerakennuksessa 3.

Online-mittaukset Koerakennus 3	Tavoitetaso 0,5 l/s/m ²		Tavoitetaso 1,0 l/s/m ²		Tavoitetaso 2,0 l/s/m ²	
	Vaihteluväli	Keskiarvo	Vaihteluväli	Keskiarvo	Vaihteluväli	Keskiarvo
Lämpötila [°C]	21,5-24,3	23,1	20,0-22,9	21,1	20,3-22,5	21,1
RH [%]	18,1-29,8	22,1	18,8-25,7	22,4	20,6-34,5	25,8
TVOC [µg/m ³]	110-212	187	141-208	158	123-151	130
Formaldehydi [µg/m ³]		<12		<12		<12
Hiilidioksidi [ppm]		287		370		370

Aistinvarainen arviointi

Aistinvaraisen arvioinnin tulosten (Kuva 26) perusteella laskettiin koerakennuksien sisäilman laatuun tyytymättömien prosentuaaliset osuudet kaikilla ilmanvaihdon tavoitetasoilla. Ilmanlaatuun tyytymättömiä oli kaikissa koerakennuksissa eniten ilmanvaihdon tavoitetasolla 0,5 ja tyytymättömien osuus väheni ulkoilmavirran kasvaessa. Koerakennuksissa 1 ja 2 suurimmat pudotukset ilmanlaatuun tyytymättömien prosentuaalisissa osuuksissa tapahtuivat ilmanvaihdon tavoitetasojen 0,5 (rakennus 1: 42 %; rakennus 2: 84 %) ja 1,0 (rakennus 1: 10 %; rakennus 2: 24 %) välillä. Tavoitetasolla 2,0 lasku tyytymättömien osuuksissa oli maltillisempaa (rakennus 1: 6 %; rakennus 2: 17 %). Koerakennuksessa 3 ilmanlaatuun tyytymättömien osuus pieniä tasaisemmin ulkoilmavirran kasvaessa (0,5 l/s/m²: 48 %; 1,0 l/s/m²: 34 %; 2,0 l/s/m²: 18 %).



Kuva 26. Koerakennuksien ilmanlaatuun tyytymättömien prosentuaaliset osuudet ilmanvaihtotasojen toteutuneilla ulkoilmavirroilla (Alapieti 2016).

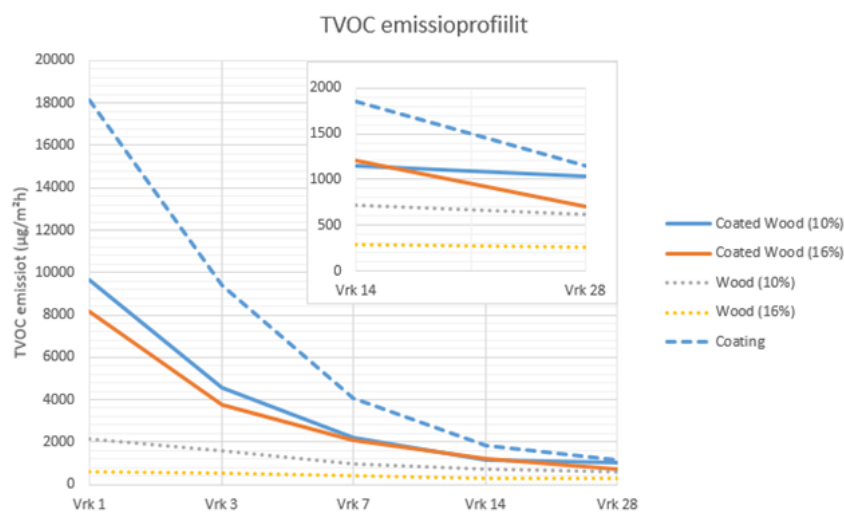
Tutkimustuloksia on käsitelty tarkemmin julkaisuissa: (Alapieti, Vornanen-Winqvist, Kurnitski et al. 2017, Alapieti 2016).

4.5 Kammiotutkimukset

4.5.1 Maalattun ja lakatun puun emissiot (kammiotutkimukset K1)

VOC-emissiot

VOC-näytteistä lasketut TVOC-arvot sisältävät kaikki havaitut VOC-yhdisteet, joten laskentamenetelmä poikkeaa ISO 16000-6:2011 -standardista. Pääsääntöisesti TVOC-pitoisuudet laskivat ajan kuluessa (Taulukko 21). Maalaamattomien puukappaleiden TVOC-emissiot olivat huomattavasti pienemmät kuin maalien tai maalattujen puukappaleiden emissiot, jotka pienenevät nopeasti kokeiden aikana maalin kuivuessa (Kuva 27).



Kuva 27. Keskiarvoiset TVOC-emissiofiilit: maali, maalattu puu ja maalaamaton puu (Salo 2017).

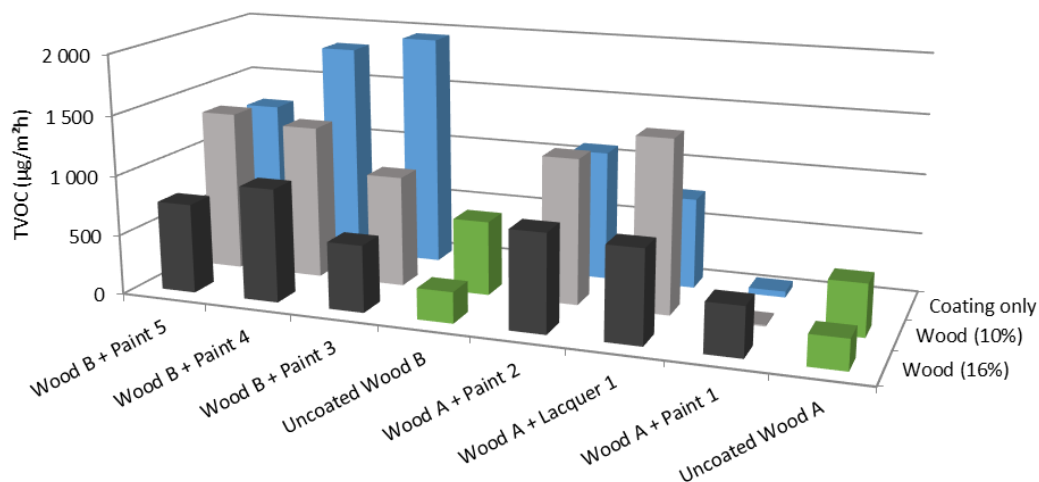
Taulukko 21. Tutkittavien materiaalien TVOC-pitoisuudet.

TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$)	Vrk 1	Vrk 3	Vrk 7	Vrk 14	Vrk 28
Puu A (10%)	202	131	56	36	435
Puu A (16%)	630	611	457	264	252
<i>Maali 1</i>	3 093*	450	471	136	50
Maalattu puu A (10%)	1 140*	320	121	24	13
Maalattu puu A (16%)	6 948*	2 634*	797*	409	411
<i>Maali 2</i>	2 799	3 939	2 173	1 352	1 089
Maalattu puu A (10%)	99	174	215	620	1 213
Maalattu puu A (16%)	2 065	1 862	1 533	925	816
Puu B (10%)	2 129	1 613	961	715	621
Puu B (16%)	611	493	387	315	259
<i>Maali 3</i>	26 939*	13 306*	6 671*	3 093	1 952
Maalattu puu B (10%)	13 165*	7 057*	3 657*	1 599	927
Maalattu puu B (16%)	10 640*	4 823*	2 423*	1 244	558
<i>Maali 4</i>	31 274*	13 099*	4 441*	2 163*	1 823
Maalattu puu B (10%)	23 341*	9 500*	4 062*	1 799*	1 285
Maalattu puu B (16%)	11 808*	4 457*	2 775*	2 093*	948
<i>Maali 5</i>	28 449*	16 363*	7 303*	3 153*	1 263
Maalattu puu B (10%)	19 229*	10 174*	4 759*	2 192*	1 348
Maalattu puu B (16%)	10 835*	5 785*	3 260*	1 669	749
<i>Lakka 1</i>	16 251*	9 336*	3 474	1 190	759
Maalattu puu A (10%)	816*	302	244	647	1 439
Maalattu puu A (16%)	6 708*	3 080	1 817	923	772

*TVOC sisältää pitoisuuksia kalibraatiosuoran yläpuolelta ja tulos on arvioitu.

Korostettujen kenttien havaitut pitoisuudet ovat todellista pienempiä TD-laitteiston vian takia.

Näytteenottopäivänä 28 TVOC-emissioiden erot (Kuva 28) olivat suhteellisen pienet (13–1 952 $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) verrattuna aiempien koepäivien arvoihin (131–16 363 $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ näytteenottopäivänä 3). Maalattun puulaudan TVOC-emissiot olivat pääsääntöisesti pienempiä kuin materiaalien erillisistä näytteistä mitatut TVOC-emissiot yhteenlaskettuina (maali lasialustalla ja maalaamaton puulauta).



Kuva 28. TVOC-emissiot, 28. vrk (Salo 2017).

Maalaus pienensi puulle tyypillisten yhdisteiden pitoisuuksia (Taulukko 22). Vaikutus riippui maalituotteesta ja yhdisteestä.

Taulukko 22. Puulle tyypillisten yhdisteiden pitoisuuksia maalatusta puulaudasta, 28. vrk. Emissiot alle 1 µg/m²h jätettiin huomiotta.

Yhdiste (µg/m ³)	Puu (10%) maalattuna					
	Maali 1	Maali 2	Maali 3	Maali 4	Maali 5	Lakka 1
Heksanaali	-	26	8	8	47	31
Pentanaali	-	7	-	-	13	-
α-Pineeni	3	28	9	12	60	88
β-Pineeni	1	-	-	-	4	43
1-Pentanol	-	8	2	6	8	6
Yhdiste (µg/m ³)	Puu (16%) maalattuna					
	Maali 1	Maali 2	Maali 3	Maali 4	Maali 5	Lakka 1
Heksanaali	14	44	7	3	35	21
Pentanaali	4	9	2	1	8	6
α-Pineeni	23	26	14	4	15	20
β-Pineeni	9	12	-	-	-	9
1-Pentanol	2	7	-	2	3	3

Maalaamattoman puun emissioista mitatut hallitsevimmat yhdisteet on esitetty Taulukossa 23. Maalaamattomasta puusta havaitut suurimpien yksittäisten emissioiden yhdisteet kuuluivat terpeeneihin ja aldehydeihin. Kaikista näytteistä hallitsevimpia terpeeneitä olivat α-pineeni and β-pineeni ja aldehydeistä heksanaali ja pentanaali. Muita merkittävien emissioiden yhdisteitä olivat aldehydeistä nonanaali ja oktanaali, vaikkakin emissiotasot olivat pääsääntöisesti alle 10 µg/m²h. Lisäksi havaittiin suurempia emissioita terpeeneiltä β-myrrseeni and D-limoneeni. Satunnaisesti korkeita emissioita havaittiin myös hapolla teksanoli ja eetterillä pentyyli-oksiraani. Lisäksi havaittiin pienemmissä määrin muita happoja, eettereitä estereitä ja ketoneja. Maalien VOC-emissioita dominoivat propaanihapot, 1,2 propaanidioli ja 2-propanoli.

Puun emissiot jaettiin kemiallisiin ryhmiin ja niiden keskiarvot laskettiin maalatusta ja maalaamattomasta puulaudasta (Taulukko 24). Maalaus vähensi puulaudasta (10 % lähtötilanteen kosteuspuuolosuhteella) terpeenien emissioita noin 67 %, aldehydien 88 % ja muiden kemiallisten ryhmien emissioita 81 %. Puulaudasta (16 %) maalaus vähensi terpeenejä 27 %, aldehydejä 81 % ja muita yhdisteitä 78 %.

Taulukko 23. Maalaamattoman puun emissioista mitatut hallitsevimmat yhdisteet.

Puu A (10%)	Yhdiste ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$)	Vrk 1	Vrk 3	Vrk 7	Vrk 14	Vrk 28
Aldehydit	Heksanaali	14*	11*	11*	5*	82
	Pentanaali	5*	5*	4*	2*	23
Terpeenit ja niiden johdannaiset	α -Pineeni	28*	27*	23*	8*	87
	β -Pineeni	11*	12*	11*	4*	54
TVOC		202*	131*	56*	36*	435
Puu B (10%)						
Aldehydit	Heksanaali	109	101	107	123	168
	Pentanaali	27	25	26	28	38
	Nonanaali	15	41	10	6	6
	Oktanaali	7	10	5	4	5
Terpeenit ja niiden johdannaiset	α -Pineeni	186	171	137	80	68
	β -Pineeni	10	11	8	6	5
	β -myrseeni	0	9	7	7	7
Yksiarvoiset alkoholit	1-Pentanoli	29	28	29	28	39
	2-etyyli-1-heksanoli	13	14	11	0	9
Hapot	Teksanoli	30	28	19	8	10
Eetterit	Pentyyli-oksiraani	5	5	5	5	6
TVOC		2 129	1 613	961	715	621
Puu A (16%)						
Yksiarvoiset alkoholit	1-Pentanoli	15	17	15	14	17
Aldehydit	Heksanaali	0	110	100	69	87
	Pentanaali	18	22	22	18	23
Terpeenit ja niiden johdannaiset	α -Pineeni	37	48	45	34	23
	β -Pineeni	14	19	20	14	11
TVOC		630	611	457	264	252
Puu B (16%)						
Aldehydit	Heksanaali	114	102	94	93	89
	Pentanaali	15	16	18	20	21
	Nonanaali	8	8	5	5	5
	Oktanaali	7	5	5	4	5
Terpeenit ja niiden johdannaiset	α -Pineeni	27	30	28	25	18
	Limoneeni	3	4	4	5	5
Yksiarvoiset alkoholit	1-Pentanoli	10	10	10	10	11
TVOC		611	493	387	315	259

* Vika TD-laitteistossa väärästi tulokset pienemmiksi, koska kaikkia yhdisteitä ei havaittu. Ennen laitteiston korjaamista käytettiin kalibraatiota 400 ng. Myöhemmissä analyyseissä käytettiin kalibraatiota 1800 ng.

Taulukko 24. Maalattun ja maalaamattoman puun emissiot 28 vrk:n iässä keskiarvoina ja tulosten vaihteluväli. Tuloksiin on laskettu puulaudasta lähtöisin olevat yhdisteet. Maalien emittoimat yhdisteet ja emissiot alle $1 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ on jätetty tarkastelussa huomiotta.

Kemiallinen ryhmä ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Maalaamaton puu (10%)	Maalattu puu (10%)	Maalaamaton puu (16%)	Maalattu puu (16%)
Terpeenit	155 (106 - 173)	53 (4 - 141)	35 (24 - 42)	26 (9 - 38)
Aldehydit	230 (121 - 399)	29 (<1 - 68)	153 (117 - 215)	30 (8 - 54)
Muut ryhmät	93 (61 - 150)	18 (<1 - 38)	37 (31 - 45)	8 (4 - 12)

Karboonyliemissiot

Formaldehydin, asetaldehydin (aldehydit) ja asetonin (ketoni) pitoisuudet analysoitiin keskittyen näytteenottopäivään 28. Pääsääntöisesti yhdisteiden pitoisuudet olivat alle 50 µg/m³ (Taulukko 25 ja Taulukko 26).

Taulukko 25. Formaldehydin, asetaldehydin ja asetonin pitoisuudet, vrk 28.

Pitoisuudet (µg/m ³)					
Maali 1	Puu (10%)	Maalattu puu (10%)	Maali	Maalattu puu (16%)	Puu (16%)
Formaldehydi	12	49	54	65	16
Asetaldehydi	32	39	31	58	56
Asetoni*	91	10	-	8	48
Maali 2					
Formaldehydi	12	15	7	33	16
Asetaldehydi	32	6	-	24	56
Asetoni**	96	8	-	8	53
Maali 3					
Formaldehydi	17	5	8	6	27
Asetaldehydi	34	9	5	17	40
Asetoni**	68	14	-	28	61
Maali 4					
Formaldehydi	17	8	7	4	27
Asetaldehydi	34	7	9	6	40
Asetoni**	68	23	12	12	61
Maali 5					
Formaldehydi	17	9	7	6	27
Asetaldehydi	34	21	3	41	40
Asetoni**	68	45	24	44	61
Lakka 1					
Formaldehydi	12	-	3	6	16
Asetaldehydi	32	21	-	25	56
Asetoni**	96	28	-	35	53

* Taustanäytteissä oli asetonina 25–30 µg/m³. Tuloksista on vähennetty 25 µg/m³.

** Taustanäytteissä oli asetonina 20–27 µg/m³. Tuloksista on vähennetty 20 µg/m³.

Pitoisuudet yli 50 µg/m³ on korostettu ja pitoisuudet alle 1 µg/m³ on jätetty huomiomatta.

Taulukko 26. Maalattun ja maalaamattoman puun sekä maalin 28 vrk:n karboonyliemissiot (µg/m³) keskiarvoina ja tulosten vaihteluväli.

Yhdiste	Maalaamaton puu (10%)	Maalattu puu (10%)	Maali	Maalattu puu (16%)	Maalaamaton puu (16%)
Formaldehydi	15 (12 - 17)	17 (<1 - 49)	14 (<1 - 54)	20 (4 - 65)	22 (16 - 27)
Asetaldehydi	33 (32 - 34)	17 (6 - 39)	12 (<1 - 31)	29 (6 - 58)	48 (40 - 56)
Asetoni	80 (68 - 96)	21 (8 - 45)	18 (<1 - 24)	23 (8 - 44)	56 (48 - 61)

Tuloksia on käsitelty tarkemmin julkaisuissa: (Salo et al. 2018, Salo 2017).

4.5.2 Maalattun puun ja muovimattojen emissiot ja ilmavaihdon vaikutus emissioihin (kammiotutkimukset K2)

Havaituista VOC-yhdisteistä tarkasteltiin lähemmin vain muutamaa yhdistettä. Näytteistä havaittiin useita kymmeniä erilaisia VOC-yhdisteitä, joten kaikkia havaittuja yhdisteitä ei pystytty käymään läpi yksityiskohtaisesti.

Kaikissa koesarjoissa aldehydi- ja ketoniyhdisteiden pitoisuudet olivat erittäin matalia (0,3–33,7 µg/m³). Maalista ja mäntylaudasta havaittiin emittoituvan lähinnä asetonia sekä pieniä määriä formaldehydiä, asetaldehydiä, butanonia ja butanaalia. Muovimattoista emittoitui matalia pitoisuuksia formaldehydiä, asetaldehydiä, asetonia, butanonia ja butanaalia.

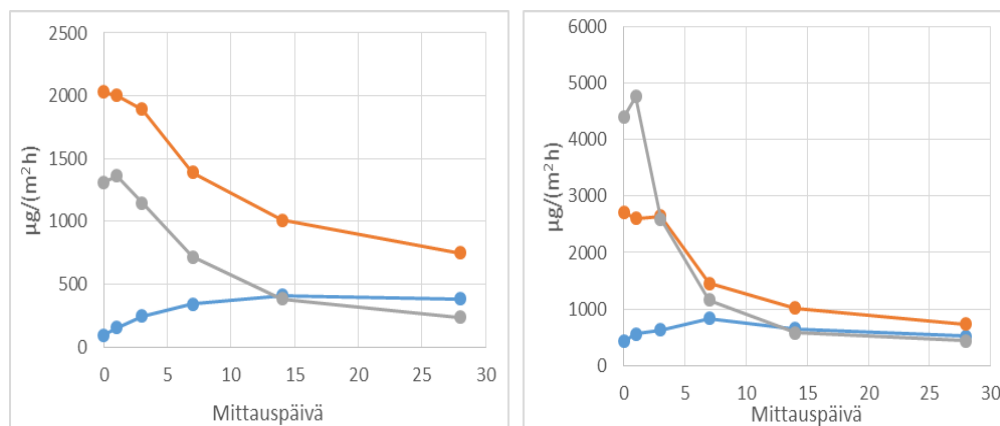
Mäntylaudasta ja maalista emittoituvat yhdisteet

Höylätystä mäntylaudasta emittoitui ensimmäisessä kammiokokeessa eniten 3-kareenia (korkein emissiotaso noin 200 µg/m²h) ja kolmannessa kammiokokeessa α-pineeniä (vastaavasti noin 700 µg/m²h). Mäntylaudasta emittoitui useita erilaisia terpeenejä. Eri yhdisteiden emissiotasoprofiili oli erilainen eri näytekappaleilla. Kuitenkin molemmissa kammiokokeissa oli yhteinen suuntaus, eli mäntylautojen TVOC-emissiot nousivat ajan kuluessa (Kuva 30).

Maalin yksittäisistä VOC-yhdisteistä propyleeniglykolin emissiot olivat suurimmat. Sen emissiotaso ensimmäisenä mittauspäivänä heikommalla ilmanvaihdolla oli noin 700 µg/m²h ja tehokkaammalla ilmanvaihdolla noin 2500 µg/m²h. Toiseksi suurimpia emissiotasoja mitattiin dipropyleeniglykolin monobutyylieetterillä, jonka emissiotaso oli ensimmäisenä mittauspäivänä heikolla ilmanvaihdolla noin 300 µg/m²h ja tehokkaalla ilmanvaihdolla 750 µg/m²h. Näiden lisäksi maalista emittoitui suuria pitoisuuksia butaanihapon butyyliesteriä, tripropyleeniglykolin butyylieetteriä ja propaanihapon 2-metyyli-1-(2-hydroksi-1-metyylietyyli)-2,2-dimetyylipropyyliesteriä.

Maalattusta mäntylaudasta dipropyleeniglykolin monobutyylieetterin emissiotaso oli korkeampi kuin propyleeniglykolin. Propyleeniglykolin emissio oli heikolla ilmanvaihdolla noin 440 µg/m²h ensimmäisenä mittauspäivänä ja tehokkaalla ilmanvaihdolla noin 500 µg/m²h. Dipropyleeniglykolin monobutyylieetterin emissio oli heikolla ilmanvaihdolla noin 670 µg/m²h ensimmäisenä mittauspäivänä ja tehokkaalla ilmanvaihdolla noin 850 µg/m²h. Mäntylaudalle maalattun maalin VOC-emissiot olivat matalampia kuin lasin päälle maalattun maalin.

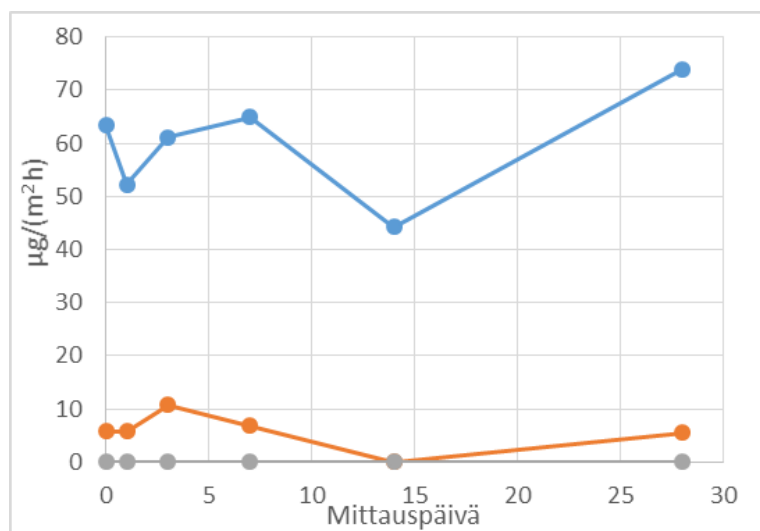
Kuvissa 30 ja 31 on esitetty höylätyn mäntylaudan, maalattun mäntylaudan ja maalin TVOC-emissiot mittausajanjakson aikana. Eri ilmanvaihtotasolla tehdyissä kammiokokeissa havaittiin, että materiaalien TVOC-emissiot (µg/m²h) olivat suuremmat tehokkaalla ilmanvaihdolla kuin heikolla ilmanvaihdolla. Höylätyn mäntylaudan TVOC-emissio kohosi mittausajanjakson aikana, kun taas maalattun mäntylaudan ja maalin TVOC-emissio laski.



Kuva 29. Höylätyn mäntylaudan (sininen), maalatun mäntylaudan (oranssi) ja maalin (harmaa) TVOC-emissiot ensimmäisessä kammiokoesarjassa (vasen kuva, ilmanvaihtokerroin 0,07–0,23 h⁻¹) ja kolmannessa kammiokoesarjassa (oikea kuva, ilmanvaihtokerroin 0,5 h⁻¹) (Nuutinen 2017).

Muovimatoista emittoituvat yhdisteet

Kuvassa 31 on esitetty mattojen A, B ja C TVOC-emissiot mittausajanjakson aikana. Muovimattojen VOC-emissiot olivat erittäin matalia, minkä vuoksi esimerkiksi TVOC-emissiotasoon vaikutti suuresti yhdenkin yhdisteen emissiotason muutos. Muovimattojen TVOC-emissiot erosivat huomattavasti toisistaan: maton C TVOC-emissio oli 44,3–73,9 µg/m²h, maton A 0,0–10,7 µg/m²h ja maton B 0,0 µg/m²h koko mittausajan ajan. Matosta A emittoitui eniten p-ksyleeniä (korkein emissiotaso noin 7 µg/m²h). Matosta B emittoitui eniten fenolia (vastaavasti noin 4 µg/m²h) ja matosta C emittoitui eniten 1-butanolia (noin 35 µg/m²h).



Kuva 30. Muovimattojen A (oranssi), B (harmaa) ja C (sininen) TVOC-emissiot (µg/m²h, ilmanvaihtokerroin 0,5 h⁻¹).

Tuloksia on käsitelty tarkemmin julkaisussa: (Nuutinen 2017).

5. Yhteenveto

5.1 Aineistotutkimus

Julkisten uudisrakennusten sisäilman laadussa ilmenee nykyisin paljon ongelmia ja niiden selvittely vaatii paljon aikaa ja monialaista osaamista. Sisäilmailmoitusten taustalla on harvoin selkeä kosteus- tai homevaurio. Usein yksiselitteistä korjaustarvetta ei selvitysten perusteella löydy ja ongelmien ratkaiseminen on vaikeaa. Rakennuksen ongelmiin liittyvät käyttäjien yksilölliset erot ja psykososiaaliset tekijät. Tässä suuntaa antavassa katsauksessa mukana olleissa sisäilmaongelmakohteissa havaitut ongelmat koskivat usein ilmanvaihtojärjestelmän toimintaa (85 %:ssa kohteista), rakennusteknisiä puutteita tai kosteusvaurioita (85 %:ssa kohteista) tai kemiallisten yhdisteiden kohonneita pitoisuuksia tai häiritsevää hajua (69 %:ssa kohteista). 31 %:ssa kohteista havaittiin linoleumin hajua.

Sisäilmaongelmien ratkaiseminen on merkittävää oppilaiden ja työntekijöiden terveyden sekä taloudellisten resurssien kannalta. Kun ongelma havaitaan mahdollisimman varhaisessa vaiheessa, haitat jäävät vähäisemmiksi ja korjaustoimenpiteet tulevat usein edullisemmiksi. Suurin osa ongelmista on lieviä ja korjattavissa esimerkiksi ilmanvaihdon säädöillä. Pitkittyneet ongelmat voivat kuitenkin aiheuttaa vakavia oireita ja haittoja sekä heikentää merkittävästi työyhteisön ilmapiiriä ja työssäviihtyvyyttä.

Koulurakennusten tekniikan huolto ja ylläpito vaatisi erittäin sitoutunutta ja osaavaa huoltohenkilökuntaa. Yksittäisten huoltohenkilöiden motivaatio ylläpitää järjestelmiä ja rakennuksen kuntoa parhaansa mukaan tuli tutkimuksen monissa kohteissa esille, mutta erilaisten järjestelmien hallinta sekä tietotaidon jatkuvuus henkilöstön vaihtuessa ovat selkeitä riskitekijöitä sisäilman laadun valvonnassa. Lisäksi useissa kohteissa sisäilmaongelmien syyksi, pitkittäjäksi tai ainakin yhdeksi ongelmien ratkaisua häiritseväksi tekijäksi on lopulta todettu rikkinäiset järjestelmän osat, kuten CO₂- tai lämpötilanturit, joiden vikaantumista ei ole havaittu tai osattu edes tarkkailla.

5.2 Kenttätutkimukset

5.2.1 Ilmanvaihdon ylipaineistustutkimus (tutkimuskohde I1)

Tutkimus osoitti, että lievätkin muutokset ilmamäärissä ja paine-eroissa voivat aiheuttaa todennettavia muutoksia koetussa ja mitatussa sisäilman laadussa. Intervention tavoite 5–7 Pa toteutui tutkitussa rakennusosassa vain osittain. Silti TVOC- ja PM_{2,5}-pitoisuuksissa näkyi tilastollisesti merkitsevä lasku intervention jälkeen.

Kyselyiden käytettävyys intervention vaikutusten osoittamiseen jäi pienen vastaajamäärän vuoksi toivottua heikommaksi, sillä tilastollisesti merkitseviä tuloksia ei voitu osoittaa. Tulokset antoivat kuitenkin viitteitä siitä, että tutkitussa rakennusosassa ei koettu vastaavaa selvää vuodenaajasta johtuvaa olosuhteiden huononemista kuin muualla rakennuksessa. Näin ollen lievälläkin ylipaineistuksella voi olla vaikutuksia käyttäjien kokemiin oire- ja olosuhteisiin. Havainnon varmentamiseksi tarvittaisiin kui-

tenkin suurempi vastaajamäärä ja seurantakysely tulisi toteuttaa samana vuodenaikana. Myös oppilaille suunnatut kyselyt olisi hyvä toteuttaa laajemman tutkimuksen yhteydessä, sillä oppilaat ovat koulurakennuksessa merkittävä käyttäjäryhmä.

Sisätilojen mikrobiston määrittämiseksi kerätyt pölynäytteet poikkesivat lajistoltaan ulkoilman näytteistä, ja muuttuivat merkittävästi intervention seurauksena. Ennen interventiota valtalajeina olivat mahdollisesti patogeeniset *Aspergillus*-lajit, kun taas intervention jälkeen valtalajistona olivat ei-patogeeniset *Aspergillus*-lajit. Mahdollisesti mykoparasiittista *Trichoderma atroviridea* ei esiintynyt intervention jälkeen. Mykoparasiittisia *Trichoderma*-kantoja ei myöskään löytynyt ulkoilmannäytteistä, joissa oli enimmäkseen toksisia *Curvularia*-lajeja.

Tulokset viittaavat siihen, että ennen ylipaineistusta tutkitun tilan sisäilmassa esiintyi sisälähteistä - kuten rakenteista - peräisin olevaa mikrobilajistoa. Menetelmä mikrobinäytteen keräämiseksi poistoilmasuodattimesta antoi lupaavia tuloksia.

Kosteudenseurantamittauksissa havaittiin, että vaipparakenteisiin ei kertynyt kosteutta talven aikana. Mittauksissa havaittiin sisäilman olleen talvella todella kuivaa, joten sisä- ja ulkoilman kosteussisältö on ollut likimain sama, ja sisäilman kosteuslisä oli lähes mitätön. Toimivan ilmanvaihdon ja sisäilman kuivuuden vuoksi suurempikaan ylipaineisuus ei oletettavasti olisi aiheuttanut rakenteille kosteusrasitusta. Kenttämittausten perusteella tällaista suoraa johtopäätöstä ei voida kuitenkaan tehdä, koska ylipaineistus ei ollut jatkuvasti vallitseva.

Laskennallisesti havaittiin, että sisäilman kosteuslisän ollessa mitatulla tasolla konvektiolla ei ole merkittävää vaikutusta rakenteiden kosteuteen. Konvektion rakenteille aiheuttama kosteusrasitus muuttuu huomattavaksi lähestyttäessä sisäilman kosteuslisän mitoitusarvoa, jolla sisäilman kosteussisältö yli kaksinkertaistuu todellisuudessa mitattuun arvoon nähden. Tutkimuskohteessa havaituissa olosuhteissa ylipaineisuudesta ei vaikuta olevan haittaa rakenteiden kosteustekniselle toiminnalle.

Tutkimuksen mukaan ilmanvaihdon ylipaineistusinterventio voi olla käyttökelpoinen menetelmä olosuhteiden parantamiseksi sisäilmaongelmaisessa rakennuksessa, erityisesti jos ongelmien syynä epäillä olevan rakenteista kulkeutuvat epäpuhtaudet. 5-7 Pa:n positiivinen paine oli riittävä parantamaan sisäilman laatua, mutta tarkempi tiheyskorjattu ilmavirtojen säätö olisi suositeltava, jotta pieni ylipaine pysyisi jatkuvasti. Ylipaineistus voidaan toteuttaa vain muissa kuin asuinrakennuksissa, eli rakennuksissa, joissa on toimiva ilmanvaihto ja pieni kosteuslisä.

5.2.2 Hybridi-ilmanvaihdon tutkimus (tutkimuskohde I2)

Käyttäjät olivat havainneet alkuperäisen ilmanvaihdon tilan puutteet aistinvaraisesti oireina, hajuina ja epämukavuutena. Perusilmanvaihdon puutteet vahvistettiin tutkimuksin. Huomattavaa on, että luokkien CO₂-pitoisuudet pysyivät hyväksytyllä tasolla perusilmanvaihdon puuttumisesta huolimatta, koska CO₂-anturien vaikutuksesta tuloilmakanavien säätöpellit avautuivat hetkellisesti jolloin CO₂-pitoisuus laski. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että pelkästään CO₂-pitoisuutta tarkastelemalla ilmanvaihdon toiminta olisi arvioitu merkittävästi väärin. Ilmanvaihdon puutteet eivät näkyneet raja-arvojen ylittymisellä TVOC- tai VOC-pitoisuuksissa, mutta sekä niiden että CO₂:n pitoisuudet laskivat ilmanvaihdon parannusten seurauksena.

Rakennuksen hybridi-ilmanvaihtojärjestelmän todettiin olevan käytönaikaisten muutuvien tilanteiden kanssa vaikeasti hallittava kokonaisuus, vaikkakin riittävän tehokas tuottamaan tarvittavan tuloilmamäärän luokkiin. Järjestelmän toimintaa parantaisivat ilmanjakoa säätelevät muutokset, kuten tuloilmakanavan halkaisijan koon muunteleminen riippuen kanavan sijainnista järjestelmässä, tai säätöpeltien ohjausjärjestelmän asetusten yksityiskohtaisempi hyödyntäminen. Kaiken kaikkiaan tuloilmamäärien tasapainotus ja pysyvyys olisi suunniteltava uudestaan jotta järjestelmä toimisi optimaalisesti sekä energiatehokkuuden että sisäilmaston kannalta. Ilmanvaihtojärjestelmän kokonaisvaltaiseen ymmärrykseen ja hallittavuuteen rakennuksen mahdollisesti aika ajoin vaihtuvan huolto- ja ylläpito henkilöstön toimesta olisi kiinnitettävä aivan erityistä huomiota.

Sisäilmastokyselyiden avulla ei voitu todeta tilastollisesti merkitseviä parannuksia käyttäjien kokemuksissa ilmanvaihdon parannusten jälkeen, sillä vastaajien määrä jäi tutkitussa rakennusosassa niin pieneksi, ja vielä lisäksi eri vuodenaika kyselyiden toteuttamisajankohtana heikensi tulosten tulkittavuutta. Oppilaiden mukaanotto kyselyihin parantaisi niiden käytettävyyttä sisäympäristön laadun arvioinnissa kouluympäristöissä.

Tietojemme mukaan tämä tutkimus on ensimmäinen, jossa raportoidaan opportunistisen, mahdollisesti patogeenisen *T. citrinoviriden* esiintyminen sisätilan pölyssä suomalaisessa koulurakennuksessa. Laji löydettiin pyyhintäpölystä ennen ilmanvaihdon parannusta, mutta ei enää sen jälkeen. Koska laji löydettiin laskeutuneesta pölystä, on hyvin todennäköistä että se on peräisin ilman välityksellä liikkuneesta pölystä ja näin ollen myös hengitettävissä. Ilmanvaihdon parannusten jälkeen *T. citrinoviridea* ja toksisia *Trichoderma*-lajeja ei löydetty, mikä viittaa siihen, että ilmanvaihdon parannuksilla on voinut olla merkittävä vaikutus sisätilojen mikrobilajistoon.

5.3 Koerakennustutkimukset

Online-mittauksien ja ilmanäytteiden perusteella sisäilman epäpuhtauspitoisuudet koerakennuksissa 1 ja 2 olivat pieniä kaikilla tutkituilla ulkoilmavirroilla. Sekä TVOC (suurin arvo 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ koerakennuksessa 1 ja 203 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ koerakennuksessa 2) että yksittäisten yhdisteiden (suurin arvo koerakennuksessa 1 etikkahapolla $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ja koerakennuksessa 2 pentadekaanilla 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pitoisuudet olivat selvästi alle Sosiaali- ja terveysministeriön Asumisterveysasetuksen toimenpiderajojen (TVOC 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, yksittäiset VOC-yhdisteet 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Koerakennuksen 3 online-mittauksissa TVOC-pitoisuudet (110–212 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) jäivät alle toimenpiderajan, mutta ilmanäytteiden perusteella (500–1500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) toimenpideraja ylittyi kaikilla ilmanvaihdossa käytetyillä ulkoilmavirroilla. Mittaustulosten eron mittaustapojen välillä arveltiin johtuvan siitä, että online-mittareiden anturit eivät havaitse kaikkia sisäilman VOC-yhdisteitä, jolloin niiden TVOC-pitoisuudet jäävät ilmanäytteitä pienemmiksi. Koerakennuksessa 3 yksittäisistä VOC-yhdisteistä selkeästi suurimmat pitoisuudet olivat monoterpeeneihin kuuluvilla α -pineenillä (132–589 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ja 3-kareenilla (77–332 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), jotka kuuluvat havupuiden pääasiallisiin emissiotuotteisiin. Tutkimuksen perusteella hirsirakenteisessa rakennuksessa etenkin sisäilman terpeenipitoisuudet voivat pysytellä korkealla tasolla useita vuosia rakentamisen jälkeen. VOC-yhdisteiden lisäksi rakennuksissa ei havaittu

muita merkittäviä epäpuhtauspitoisuuksia.

Online-mittauksien perusteella koerakennuksissa 1 ja 2 ilmanvaihdossa käytettyjen ulkoilmavirtojen välillä ei ollut havaittavissa suurta vaihtelua sisäilman TVOC-pitoisuudessa vaan vaihtelu vaikutti seuraavan enemminkin koerakennuksien lämpötilan vaihteluita. Ilmanäytteiden tuloksien perusteella ilmanvaihdon kasvattaminen tavoitetasosta 0,5 tasoon 1,0 laski sisäilman TVOC-pitoisuutta koerakennuksissa 1 ja 2, mutta siirryttäessä tasolle 2,0 pitoisuuden pieneneminen oli koerakennuksessa 1 vähäistä ja koerakennuksessa 2 pitoisuus kasvoi. Koerakennuksessa 3 TVOC-pitoisuudet pienivät sekä jatkuvatoimisien mittausten että ilmanäytteiden perusteella ulkoilmavirran kasvaessa. Tutkimuksen perusteella ilmanvaihdossa käytetty suurempi ulkoilmavirta pienensi epäpuhtauspitoisuutta suuremmilla pitoisuuksilla, mutta alhaisilla pitoisuuksilla ilmanvaihdon merkitys väheni.

Aistinvaraisesta arvioinnin tuloksissa sisäilmaan tyytymättömien osuudessa oli suuria eroja koerakennuksissa 1 ja 2 ilmanvaihdon kasvaessa tasosta 0,5 tasoon 1,0, vaikka sisäilmamittauksissa suuria eroja epäpuhtauspitoisuuksissa ei ilmennyt. Tämän arvelaan johtuvan siitä, että tason 0,5 arvioinnissa ilmanvaihto oli käynnistetty muutamia päiviä aikaisemmin pitkän ajanjakson jälkeen, jolloin ilmanvaihto ei ollut toiminnassa. Tällöin sisäilmassa on ollut suurempia pitoisuuksia voimakashajuisia yhdisteitä, kuten terpeenejä ja aldehydejä. Tavoitetason 1,0 arvioinnissa ilmanvaihto oli ollut toiminnassa kolmen viikon ajan laimentaen voimakashajuisten yhdisteiden konsentraatiota. Koerakennuksessa 3 tyytymättömien osuuden lasku ilmanvaihtotasojen välillä oli taiseempaa, mikä voi selittyä sillä, että rakennuksessa oli kaikilla ilmanvaihtotasolla hajukynnyksen ylittäviä VOC-yhdisteiden pitoisuuksia. Arvioinnissa osallistujien määrä oli 10–13 henkilöä ilmanvaihtotasolla, mikä on standardissa ISO 16000-30 suositeltua vähimmäismäärää (15 hlöä) pienempi ja tulee ottaa huomioon tuloksissa. Regressioanalyysillä tarkasteltuna tulokset osoittautuivat osallistujamäärästä huolimatta tilastollisesti merkittäviksi. Aistinvaraisen arvioinnin tuloksien ja sisäilmamittauksien perusteella sisäilman laatu parani ilmanvaihdossa käytetyn ulkoilmavirran kasvaessa pienimmältä tasolta keskimmaiselle tasolle ja vaikutus oli vähäisempää suurimmalle tasolle siirryttäessä erityisesti pienemmillä sisäilman epäpuhtauspitoisuuksilla.

Tutkimuksen perusteella ilmanvaihdossa käytetyn ulkoilmavirran kasvattaminen arvosta $\sim 0,5 \text{ (dm}^3/\text{s)/m}^2$ arvoon $\sim 1,0 \text{ (dm}^3/\text{s)/m}^2$ parantaa mitattua ja koettua sisäilman laatua, mutta merkitys vähenee suuremmilla ilmavirroilla. Rakennuksien energiankulutuksen vähentämiseksi ilmanvaihdon mitoittamiseen tulisi kiinnittää huomiota, sillä ulkoilmavirran kasvattamisen hyödyt sisäilmanlaadulle vähenevät ilmamäärän kasvaessa. Tutkimustulosten mukaan ”kevyitä” puurakenteita käyttämällä voidaan rakentaa tiiviitä rakennuksia, joissa sisäilman epäpuhtauspitoisuudet ovat alhaisella tasolla neljä vuotta rakentamisen jälkeen, eikä sisäpinnan materiaalina käytettyjen kipsilevyjen ja kuusivanerien välillä ollut juurikaan eroavaisuuksia. Lamellihirsirunkoisessa rakennuksessa terpeeneiden pitoisuudet voivat kuitenkin pysyä korkealla tasolla. Terpeeneiden terveysvaikutuksista tarvittaisiin tarkempia tutkimuksia, jotta mitattujen pitoisuuksien vaikutuksia ihmisille voitaisiin arvioida. Kokeiden tuloksissa tulee ottaa huomioon, että mitatut pitoisuudet ovat peräisin rakennusmateriaalien emissioista, ilmanvaihtokoneista ja ulkoilmasta, sillä koerakennukset ovat kalustamattomia ja niiden sisäpinnat ovat lattiaa lukuun ottamatta päällystämättömiä, mikä ei vastaa todellisia

käyttötilanteita asuinrakennuksissa. Koerakennuksissa ei myöskään ole ollut käyttäjien aiheuttamaa kuormitusta.

5.4 Kammiotutkimukset

Maalaamattomien puukappaleiden emissiot olivat matalia suhteessa lasialustalle levitetyn maalin tai maalatun puun emissioihin, eivätkä muuttuneet suuresti kokeiden aikana. Kammiotutkimuksissa K1 maalaamattoman puun emissiot hieman laskivat ajan kuluessa, kun taas kammiotutkimuksissa K2 ne kasvoivat mittausjakson aikana. Emissiotasot olivat samaa luokkaa molemmissa tutkimuksissa.

Maalatun puun emissioprofiili muistutti maalin emissioprofiilia ja maali dominoi maalatun puun emissioita erityisesti emissiokokeiden alkupuolella. Maalaaminen vähensi huomattavasti puualustasta lähtöisin olevia emissioita, mutta vaikutus riippui maali- tuotteesta ja osittain yhdisteestä. Pitemmän ajan kuluessa voi olla mahdollista, että maalatusta puusta alkaa haihtua enemmän puualustasta lähtöisin olevia yhdisteitä. Maalin ja maalatun mäntylaudan kokonaisemissiot olivat korkeat vielä 28 vuorokauden jälkeen, mutta vähenivät radikaalisti 28 päivän aikana, ja lähestyivät maalaamattomien puukappaleiden emissioprofiileja. Maalatun puun emissiokokeiden aikana havaittiin myös α -pineenin ja β -pineenin pitoisuuksien suurenemista, vaikkakin hyvin rajallisessa määrin.

Yleisimmät VOC-yhdisteet, jotka havaittiin maalaamattomasta mäntypuusta, olivat heksanaali, pentanaali, 1-pentanol, α -pineeni, β -pineeni ja 3-kareeni, jotka on havaittu myös aiemmissa tutkimuksissa. Näytteenottopäivänä 28 hallitsevimpien yhdisteiden pitoisuudet olivat huomattavasti alle EU-LCI-arvojen, jotka ovat $2\,500\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ α -pineenille (mitattu määrä $1\,250\ \mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$), $1400\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ β -pineenille ($700\ \mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) ja $900\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ heksanaalille ($450\ \mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$). Myös analysoitujen karbonyylien emissiot olivat alle EU-LCI-arvojen: $100\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ formaldehydille ($50\ \mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$), ja $1\,200\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ asetaldehydille ($600\ \mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$). Asetonille ei ole määritetty EU-LCI-arvoa, mutta AgBB:n (Committee for Health-related Evaluation of Building Products, Saksa) määrittämä AgBB-LCI arvo asetonille on $1\,200\ \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Maalatun puun emissiot olivat pienemmät kuin maalin ja puun erillisistä emissiokokeista mitatut emissiot yhteenlaskettuna. Maalin muodostama kalvo estää puualustan yhdisteiden haihtumista ja toisaalta huokoinen puualusta sitoo maalin yhdisteitä ja pitkittää maalin emissioprosessia. Yhdistelmämaterialin emissioita ei voi päätellä materiaalien erillisistä emissiokokeista.

Puun kosteuspitoisuudella oli vaikutusta VOC-yhdisteiden ja karbonyylien pitoisuuksiin, mutta vaikutus oli osin erilainen eri yhdisteillä. Pääsääntöisesti VOC-pitoisuudet olivat suuremmat puukoekappaleen pienemmällä kosteuspitoisuudella (10 %). Karbonyylinäytteistä oli kuitenkin havaittavissa myös päinvastaista vaikutusta. Asetaldehydin ja formaldehydin pitoisuudet olivat pienemmät puukoekappaleen pienemmällä kosteuspitoisuudella (10 %).

Tulosten soveltamisessa on huomioitava epävarmuustekijät, joita ovat muun muassa ajan vaikutus, puulajien ja puutuotteiden heterogeenisuus sekä puutteellinen tutkimustieto puumateriaalien terveysvaikutuksista sisäilmassa. Puun emissiot riippuvat

monesta tekijästä, kuten puulajista, iästä ja kasvupaikasta. Sopiva, vähäpäästöinen pintakäsittelyaine puun pinnalla hidastaa puun emissioita käytön aikana. Puutuotteiden emissiot taas riippuvat lisäksi valmistusmenetelmistä ja käytetyistä lisäaineista, säilytysolosuhteista sekä iästä.

Tehokkaan ilmanvaihdon havaittiin pienentävän ilman VOC-pitoisuutta, mutta samalla nostavan emissiotasoa. Ilmiö oli hyvin havaittavissa erityisesti tuoreesta maalista haihtuvien yhdisteiden osalta. Ilmanvaihto ei kuitenkaan ole ensisijainen keino VOC-päästöjen vähentämiseksi, vaan vähäpäästöisten materiaalien käyttäminen.

Kuivien materiaalien, kuten puun ja muovimattojen, emissiomekanismi perustuu diffuusioon, ja märkien, kuten maalin, aluksi pääsääntöisesti haihtumisilmiöön. Haihtuminen on nopeampi prosessi verrattuna puun pitkäaikaisiin emissioihin.

Ilmiö näkyi myös muovimattojen kohdalla erittäin alhaisina emissioina muihin tutkituihin materiaaleihin verrattuna. Tutkitut muovimatot olivat erittäin matalapäästöisiä. Todellisessa tilanteessa lattiapinnoituksen VOC-emissioihin vaikuttavat myös kiinnitykseen käytettävien liimojen emissiot yhdessä maton omien päästöjen kanssa. Tällöin VOC-emissiotaso voi olla hyvinkin erilainen verrattuna muovimattojen VOC-emissioon yksinään.

6. Johtopäätökset

Tutkimustulosten perusteella esitetään seuraavat johtopäätökset:

- 1) Sisäilman laatuun liittyvät ongelmat ovat yleisiä kaikenikäisissä koulu- ja päiväkotirakennuksissa. Sisäilmaongelmien aiheuttajia on useita ja ongelmat voivat olla monen tekijän summa. Tutkimuksen mukaan tyypillisimpiä ongelman aiheuttajia koulu- ja päiväkotirakennuksissa ovat ilmanvaihtojärjestelmän toimimattomuus ja rakennustekniset puutteet.
- 2) Ylipaineistusta voidaan suositella yksinkertaisena toimenpiteenä vähentämään epäpuhtauksille altistumista sisäilmaongelmaisessa koulurakennuksessa, jossa kosteudentuotto on vähäistä ja ilmanvaihto tehokas.
- 3) Ilmanvaihtokoneen poistoilmasuodattimen pölyn mikrobitutkimusta (viljelymenetelmä) voidaan hyödyntää arvioitaessa sisäympäristön ilman välityksellä tapahtuvaa mikrobialtutusta ja selvitetessä ilmanvaihtointerventioiden vaikutusta rakennuksen sisäilman mikrobiologisen laadun muutoksiin.
- 4) Työntekijöille suunnatut sisäilmastokyselyt ovat hyödyllisiä erityisesti silloin, kun rakennuksessa epäillään sisäilmaongelmia, mutta tiedossa ei ole tarkemmin vielä niiden laajuutta eikä tarkempaa tietoa mahdollisen oireilun ja olosuhdevalitusten määrästä. Koulurakennuksissa vastauksia saadaan kuitenkin yleensä vähän, sillä ainoastaan pieni osan tilankäyttäjistä on henkilökuntaa, ja mahdollisesti raportoituja sisäilmaongelmia on vaikea luotettavasti kohdistaa rakennuksen eri osiin.
- 5) Koerakennustutkimusten perusteella puurakenteisissa, neljän vuoden ikäisissä,

passiivitalojen vaatimukset täyttävissä koerakennuksissa sisäilman epäpuhtauspitoisuudet olivat keskimäärin matalia. Lamellihirsirakennuksen terpeenipitoisuudet olivat kuitenkin korkeita. Mahdollisten haitallisten vaikutusten lisäksi terpeeneillä on todettu olevan myös positiivisia terveysvaikutuksia, ja lisätutkimuksia tarvitaan. Kasvattamalla tuloilmavirtaa (koerakennuksissa tasolta 0,5 L/(s/m²) tasolle 1,0 L/(s/m²)) voitiin vähentää sisäilman epäpuhtauksia. Korkeammilla tuloilmavirroilla sisäilman epäpuhtaustasoissa ei enää havaittu merkittävää vähenemistä.

- 6) Maalattun puun emissiot ovat pienemmät kuin maalin ja puun erilliset emissiot yhteenlaskettuna. Muovimattojen emissiot yksittäin tarkasteltuina ovat matalia, mutta käytännön tilanteissa yhteisemissiot liima-aineiden kanssa voivat olla merkittäviä. Yhdistelmäateriaalin emissioita ei voi päätellä materiaalien erillisistä emissiokokeista. Ilmanvaihto lisää materiaalin kokonaisemissiota, mutta toisaalta laimentaa pitoisuutta ilmassa.

Tutkimushankkeen perusteella esitetään seuraavia jatkotutkimustarpeita:

- 1) Uudehkojen tai peruskorjattujen rakennusten sisäilman tutkimiseen käytettyjä menetelmiä tulisi kartoittaa suhteessa niistä saatuun hyötyyn ongelman ratkaisussa.
- 2) Ylipaineistuksen hyödyntämisestä sisäilmaongelmien aiheuttamien haittojen ehkäisyssä tai lievittämisessä erilaisissa tilanteissa tarvitaan lisätutkimuksia. Ylipaineen tulisi olla riittävän suuri ja ylipaineistuksen täysin yhtäjaksoinen vaikutusten todentamiseksi.
- 3) Pinnoille tai ilmanvaihtokoneen poistosuodattimelle kertyneen pölyn mikrobien määrittämistä sisäilman mikrobialtistuksen selvittämiseksi tulisi tutkia systemaattisesti lisää vaurio- ja vertailukouluissa yhdessä ilmanvaihdon toiminnan tutkimuksen ja muiden käytössä olevien mikrobikeräysmenetelmien kanssa.
- 4) Koulurakennuksissa oppilaat tulisi saada järjestelmällisesti mukaan sisäilmastokyselyihin, ja sekä koulu- että päiväkotirakennuksissa kyselyiden tulisi olla paikkaan ja ajankohtaan sidottuja. Tällöin kyselyn hyöty ongelmiensa ratkaisussa tai paikantamisessa saataisiin maksimoitua, sillä sisäilmaongelmat ovat usein paikallisia tai saattavat ilmetä esimerkiksi tiettyinä ilmanvaihdon käynnin ajankohtina tai tietyn toiminnan aikana.
- 5) Puumateriaalien emissioita eri ikäisissä ja eri tavoin pinnoitetuissa tai pinnoittamattomissa sisärakenteissa kannattaa tutkia lisää niin, että samanaikaisesti kartoitetaan käyttäjien kokemuksia puumateriaalin käytöstä ja sisäilman laadusta. Terpeeneiden terveysvaikutuksista tarvittaisiin tarkempia tutkimuksia, jotta mitattujen pitoisuuksien vaikutuksia ihmisille voitaisiin arvioida. Tyypillisten sisätilojen materiaaliyhdistelmien emissioita tulisi tutkia lisää.

Tutkimushankkeen julkaisut

Tieteelliset artikkelit ja konferenssijulkaisut

Alapieti T, Vornanen-Winqvist C, Kurnitski J, Mikkola R, Salonen H. Ilmanvaihdon vaikutus mitattuun ja koettuun sisäilman laatuun kolmessa puurakenteisessa koerakennuksessa [in Finnish]. Sisäilmastoseminaari (Indoor Climate Seminar) 15.3.2017. SIY Raportti 35, s. 259-264.

Alapieti T, Vornanen-Winqvist C, Mikkola R, Aalto L, Peltokorpi A, Salonen H. The effect of wooden building materials on measured and perceived indoor environment quality: A review. Healthy Buildings 2017 European Conference, July 2-5 2017, Lublin, Poland. Paper ID 0164. ISBN 978-83-7947-232-1.

Järvi K, Vornanen-Winqvist C, Mikkola R, Kurnitski J, Pekkanen J, Salonen H. 2018. Online questionnaire as a tool to assess symptoms and perceived indoor air quality in a school environment. Käsikirjoitus valmistunut.

Mattila, M, Vornanen-Winqvist, C, Jerkku, I, Kurnitski, J. 2018. Ylipaineistuksen ja ilmanpitävyyden vaikutus rakenteiden kosteustekniseen toimintaan. Sisäilmastoseminaari 2018 (Indoor Climate Seminar 2018). 15.3.2018. SIY raportti 36. ISSN 1237-1866, ISBN 978-952-5236-46-0.

Mattila, M, Vornanen-Winqvist, C, Jerkku, I, Kurnitski, J. Ylipaineistuksen ja ilmanpitävyyden vaikutus rakenteiden kosteustekniseen toimintaan. Rakennusfysiikka 2017. 24 October 2017 - 26 October 2017. Conference Publication 4. Tampere University of Technology, Tampere, Finland; pp. 91-96.

Salo L, Castagnoli E, Alapieti T, Vornanen-Winqvist C, Mikkola R, Salonen H. The effects of coatings on the indoor air emissions from pinewood building materials. Sisäilmastoseminaari 2018 (Indoor Climate Seminar 2018). 15.3.2018. SIY raportti 36. ISSN 1237-1866, ISBN 978-952-5236-46-0.

Salonen H, Castagnoli E, Vornanen-Winqvist C, Mikkola R, Duchaine C, Morawska L, Kurnitski J. Effect of local factors on concentrations and flora of viable fungi in school buildings. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering. April 2017. <https://waset.org/journal/Civil>

Vornanen-Winqvist C, Järvi K, Toomla S, Ahmed K, Andersson MA, Mikkola R, Marik T, Kredics L, Salonen H, and Kurnitski J. Ilmanvaihdon ylipaineistuksen vaikutus koulurakennuksen mitattuun ja koettuun sisäilman laatuun. Sisäilmastoseminaari 2018 (Indoor Climate Seminar 2018). 15.3.2018. SIY raportti 36. ISSN 1237-1866, ISBN 978-952-5236-46-0.

Vornanen-Winqvist C, Toomla S, Ahmed K, Kurnitski J, Mikkola R, Salonen H. Ventilation and indoor air quality in newly built school with hybrid ventilation. Healthy Buildings 2017 Europe, July 2-5, 2017, Lublin, Poland. Paper ID 0228 ISBN: 978-83-7947-232-1.

Vornanen-Winqvist C, Mattila M, Lignell U, Hildén S, Tuomi T, Salonen H. 2015. Sisäilmaongelmat julkisissa uudisrakennuksissa. Rakennusfysiikka 2015. Tampere University of Technology. Department of Civil Engineering. Seminar publication 4. pp. 383-388.

Vornanen-Winqvist C, Toomla S, Ahmed K, Kurnitski J, Mikkola R, Salonen, H. 2017. The effect of positive pressure on indoor air quality in a deeply renovated school building—a case study. *Energy Procedia*, 132, 165-170.

Vornanen-Winqvist C, Järvi K, Andersson MA, Ahmed K, Toomla S, Mikkola R, Marik T, Kredics L, Salonen H, Kurnitski J. 2018. Effects of Ventilation Improvement on Measured and Perceived Indoor Air Quality in a School Building with a Hybrid Ventilation System. *Käsikirjoitus valmistunut*.

Vornanen-Winqvist C, Järvi K, Toomla S, Ahmed K, Andersson MA, Mikkola R, Marik T, Kredics L, Salonen H, Kurnitski J. 2018. Ventilation Positive Pressure Intervention Effect on Indoor Air Quality in a School Building with Moisture Problems. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2018, 15, 230.

Vornanen-Winqvist C, Mikkola R, Mattila M, Kurnitski J, Lignell U, Hildén S, Tuomi T, Salonen H. 2016. Indoor Air Problems in New Schools and Daycare centers. *Indoor Air 2016. Proceedings: 11th International Conference of Indoor Air Quality and Climate*. ISBN 978-0-9846855-5-4.

Valmisteilla

Ferrantelli A, Vornanen-Winqvist C, Mattila M, Salonen H, Kurnitski J. Moisture behaviour of building's structures during ventilation positive pressure. Kevät 2018.

Vornanen-Winqvist C, Järvi K, Alapieti T, Andersson MA, Mikkola R, Kurnitski J, Salonen H. Characteristics of measured and perceived indoor air quality in modern school buildings. Kevät 2018.

Vornanen-Winqvist C, Mikkola R, Kurnitski J, Salonen H. Indoor air VOC levels in modern school buildings. Kevät 2018.

Yhteistyöhankkeiden tieteelliset artikkelit ja konferenssijulkaisut

Castagnoli E, Andersson M, Mikkola R, Kurnitski J, Salonen H. Airborne toxicity of a non-ionic alcohol ethoxylate surfactant and wetting agent used in cleaning chemicals. Accepted to the 15th Conference of the International Society of Indoor Air Quality & Climate (ISIAQ) Philadelphia, PA, USA, July 22 to 27, 2018. Paper ID: 373.

Castagnoli E, Marik T, Mikkola R, Kredics L, Andersson M.A, Kurnitski J, Salonen H. Indoor isolated Trichoderma strains form exudates containing toxic peptaibols. Submitted to the journal *Fungal Biology*. 08/2017.

Castagnoli E, Mikkola R, Andersson M, Kredics, L, Marik T, Kurnitski J, Salonen H. Indoor Chaetomium-like isolates; resistance to chemicals, fluorescence and mycotoxin production. *Sisäilmastoseminaari* 2017.

Castagnoli E, Taiarol D, Mikkola R, Salo J, Kurnitski J, Salonen H. Localisation of indoor contamination sources via a new PulseTest method. *Healthy Buildings 2017 European Conference*, July 2-5 2017, Lublin, Poland. Paper ID 0131. ISBN 978-83-7947-232-1.

Castagnoli E, Mikkola R, Vornanen-Winqvist C, Andersson M, Kredics, L, Marik T, Kurnitski J, Salonen H. Indoor Chaetomium-like isolates; resistance to chemicals, fluorescence and mycotoxin production. *Sisäilmastoseminaari (Indoor Climate Seminar)* 15.3.2017. SIY Raportti 35, s. 227-232

Castagnoli E, Vornanen-Winqvist C, Mikkola R, Mattila M, Kurnitski J, Salonen H. 2016. Case Study - Online Monitoring of the Indoor Pollutants in a Renovated School with Several Building-Related Symptoms Among Occupants. *Sisäilmastoseminaari* 2016.

Gingrich J, Salonen H, Wade M, Novoselac A, Corsi R. Ozone and Ultrafine Particle Emission Rates in University Copy Rooms. Accepted to the 15th Conference of the International Society of Indoor Air Quality & Climate (ISIAQ) Philadelphia, PA, USA, July 22 to 27, 2018. Paper ID: 738.

Järvi K, Alapieti T, Vornanen-Winqvist C, Harmo P, Selkänaho J, Mikkola R, Visala A, Salonen H. Sisäilmapoliisi-Sisäilmaongelmien havainnointi ja ennaltaehkäisy-projekti [in finnish]. Sisäilmastoseminaari (Indoor Climate Seminar)15.3.2017. SIY Raportti 35, s. 401-406.

Järvi K, Vornanen-Winqvist C, Harmo P, Mikkola R, Selkänaho J, Visala A, Salonen H. Indoor Air Quality Police-project: a new practice to assess indoor air quality. ISEE 2017 Conference, Sydney, Australia.

Kakko L, Reunanen E, Järvi K, Alapieti T, Mikkola R, Andersson M, Leppänen H, Täubel M, Hyvärinen A, Salonen H. Siivouskemikaalien ja biosidien vaikutukset mitattuun ja koettuun sisäilman laatuun. Sisäilmastoseminaari 2018 (Indoor Climate Seminar 2018). 15.3.2018. SIY raportti 36. ISSN 1237-1866, ISBN 978-952-5236-46-0.

Salonen H, Heinonen T, Mannerström M, Jackson M, Andersson M, Mikkola R, Kurnitski J, Khurshid S, Novoselac A, Corsi R. Assessing indoor air toxicity with condensate collected from air using the mitochondrial activity of human BJ fibroblasts and THP-1 monocytes. Accepted to the 15th Conference of the International Society of Indoor Air Quality & Climate (ISIAQ) Philadelphia, PA, USA, July 22 to 27, 2018. Paper ID: 330.

Selkänaho J, Harmo P, Salkinoja-Salonen M, Luukkaa J, Siren H.M, Riekkola M-L, Andersson M.A, Mikkola R, Salonen H, Kurnitski J, Visala A. Water vapour mobilises building related non-volatile chemicals and mycotoxins and may be used to remove substances of potential health hazard from indoor surfaces. Accepted to the Roomvent & ventilation-conference. Espoo, Finland, June 2-5.2018.

Opinnäytetyöt

Diplomityöt

Alapieti, Tuomas. 2016. Puumateriaalien vaikutukset mitattuun ja koettuun sisäympäristöön sekä ilmanvaihdon merkitys sisäilman laadulle puurakenteisissa koerakennuksissa. Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos.

Mattila, Milla. 2017. Ylipaineistuksen ja ilmanpitävyyden vaikutus rakenteiden kosteustekniseen toimintaan. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos.

Nuutinen, Sini. 2017. Rakennusmateriaalien VOC-emissiot. Pro Gradu –tutkielma. Itä-Suomen yliopisto, Ympäristö- ja Biotieteiden laitos.

Salo, Laura. 2017. The effects of coatings on the indoor air emissions of wood board. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos.

Valmisteilla

Tirkkonen, Janne. Rakennustekniset tutkimustarpeet uudisrakentamisen ja peruskorjauksen jälkeen Helsingin tilakeskuksen isännöimissä kohteissa, Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Syksy 2018.

Kandidaatintyöt, Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos

Hykkönen, Tuomas. 2016. Puumateriaalien käyttö rakentamisessa sekä vaikutukset rakennuksen sisäilman laatuun ja käyttäjiin.

- Laakso, Kalle. 2016. Sisäilmaongelmat kouluissa ja päiväkodeissa.
- Laine, Saku. 2017. Uusien rakennusten pintamateriaalien emissiot - vaikutukset sisäilman laatuun.
- Lindroos, Leo. 2016. Lämpöviihtyvyys julkisissa rakennuksissa.
- Malka, Ella. 2018. Hyvinvointia edistävä sisäympäristösuunnittelu.
- Mehtätalo, Matias. 2016. Koettu ja mitattu ilmanlaatu hirsirakennuksissa.
- Rantanen, Waltteri. 2016. Erilaiset ilmanvaihtojärjestelmät ja niiden yhteydet koettuun sisäilman laatuun.
- Salerto, Saara. 2016. Siivouskemikaalien kulkeutuminen ja mahdolliset haittavaikutukset sisäilmassa.
- Salmi, Aino. 2016. Teolliset mineraalikuidut sisäilmaongelmien aiheuttajana koulu- ja toimistoympäristössä.
- Varje, Riku. 2016. Rakennusten paloturvalliset eristysmateriaalit ja dynaamiset rakenteet sekä niiden mahdolliset vaikutukset sisäilman laatuun.
- Wiik, Vincent. 2018. Kosteus- ja homeongelmat koulurakennuksissa.

Erikoistyöt, Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos

- Hyytiäinen, Esa. 2016. Koulun painesuhteiden mallinnus. Rakennusfysiikan erikoistyö.
- Saarinen, Ronja. 2017. Luokkahuoneen kosteustase ja kosteuslisä. Rakennusfysiikan erikoistyö.

Lähteet

- Airaksinen, M., Kurnitski, J., Pasanen, P. & Seppänen, O. 2004, "Fungal spore transport through a building structure", *Indoor air*, vol. 14, no. 2, pp. 92-104.
- Airaksinen, M., Pasanen, P., Kurnitski, J. & Seppänen, O. 2004, "Microbial contamination of indoor air due to leakages from crawl space: a field study", *Indoor air*, vol. 14, no. 1, pp. 55-64.
- Alapieti, T., Vornanen-Winqvist, C., Kurnitski, J., Mikkola, R. & Salonen, H. 2017, "Ilmanvaihdon vaikutus mitattuun ja koettuun sisäilman laatuun kolmessa puurakenteisessa koerakennuksessa [in Finnish]. Sisäilmastoseminaari (Indoor Climate Seminar) 15.3.2017. SIY Raportti 35, s. 259-264.", .
- Alapieti, T., Vornanen-Winqvist, C., Mikkola, R., Aalto, L., Peltokorpi, A. & Salonen, H. 2017, "The effect of wooden building materials on measured and perceived indoor environment quality: A review.", *Healthy Buildings 2017 European Conference, July 2-5 2017, Lublin, Poland. Paper ID 0164. ISBN 978-83-7947-232-1*.
- Alapieti, T. 2016, *Puumateriaalien vaikutukset mitattuun ja koettuun sisäympäristöön sekä ilmanvaihdon merkitys sisäilman laadulle puurakenteisissa koerakennuksissa. Diplomityö.*, Aalto-yliopisto.
- Andersson, K. & Stridh, G. 1992, *The use of standardized questionnaires in building related illness (BR) and sick building syndrome (SBS) surveys. In NATO/CCMS Pilot Study on Indoor Air Quality*, Oslo, Norway: National Institute of Occupational Health.
- Andersson, K. 1998, "Epidemiological approach to indoor air problems", *Indoor air*, vol. 8, no. S4, pp. 32.
- Andersson, M.A., Jääskeläinen, E.L., Shaheen, R., Pirhonen, T., Wijnands, L.M. & Salkinoja-Salonen, M.S. 2004, "Sperm bioassay for rapid detection of cereulide-producing *Bacillus cereus* in food and related environments", *International Journal of Food Microbiology*, vol. 94, no. 2, pp. 175-183.
- Anme, T., Shinohara, R., Sugisawa, Y., Tada, C., Matsui, T. & Asada, S. 2012, "Behavior Changes in Older Persons Caused by Using Wood Products in Assisted Living", *Public Health Research*, vol. 2, no. 4, pp. 106-109.
- Asikainen, V. & Peltola, S. 2008, *Sisäilmaongelmaisten koulurakennusten korjaaminen*, Opetushallitus, Helsinki.
- Azuma, K. 2017, "Evaluating prevalence and risk factors of building-related symptoms among office workers: Seasonal characteristics of symptoms and psychosocial and physical environmental factors", *Environmental health*, [Online], vol. 22, no. 1, pp. 38.
- Bartekova, A., Lungu, C., Shmulsky, R., Huelman, P. & Park, J. 2006, "Laboratory evaluation of volatile organic compounds emissions from coated and uncoated oriented strandboard", *Forest Products Journal*, vol. 56, no. 2, pp. 85.
- Bayer, C.W. & Grimes, C. 2015, "The indoor environmental microbiome", *Indoor and Built Environment*, vol. 24, no. 8, pp. 1035-1037.
- Becker, R., Goldberger, I. & Paciuk, M. 2007, "Improving energy performance of school buildings while ensuring indoor air quality ventilation", *Building and Environment*, vol. 42, no. 9, pp. 3261-3276.

- Bencsik, O., Papp, T., Berta, M., Zana, A., Forgó, P., Dombi, G., Andersson, M.A., Salkinoja-Salonen, M., Vágvölgyi, C. & Szekeres, A. 2014, "Ophiobolin A from *Bipolaris oryzae* Perturbs Motility and Membrane Integrities of Porcine Sperm and Induces Cell Death on Mammalian Somatic Cell Lines", *Toxins*, vol. 6, no. 9, pp. 2857-2871.
- Brauer, C. & Mikkelsen, S. 2010, "The influence of individual and contextual psychosocial work factors on the perception of the indoor environment at work: a multilevel analysis", *International archives of occupational and environmental health*, vol. 83, no. 6, pp. 639-651.
- Brohus, H., Frier, C., Heiselberg, P. & Hendriksen, O.J. 2003, "Measurements of hybrid ventilation performance in an office building", *International Journal of Ventilation*, vol. 1, no. 4, pp. 77-88.
- Burnard, M.D. & Kutnar, A. 2015, "Wood and human stress in the built indoor environment: a review", *Wood Science and Technology*, vol. 49, no. 5, pp. 969-986.
- Cabral, J.P.S. 2010, *Can we use indoor fungi as bioindicators of indoor air quality? Historical perspectives and open questions.*
- Carrer, P., Wargocki, P., Fanetti, A., Bischof, W., Fernandes, E.D.O., Hartmann, T., Kephapoulos, S., Palkonen, S. & Seppänen, O. 2015, "What does the scientific literature tell us about the ventilation–health relationship in public and residential buildings?", *Building and Environment*, vol. 94, pp. 273-286.
- Chenari, B., Carrilho, J.D. & da Silva, M.G. 2016, "Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 1426-1447.
- Claudio, L., Rivera, G.A. & Ramirez, O.F. 2016, "Association Between Markers of Classroom Environmental Conditions and Teachers' Respiratory Health", *Journal of School Health*, vol. 86, no. 6, pp. 444-451.
- Corneau, D. 2006, "Effectiveness of barriers to minimize VOC emissions including formaldehyde", *Forest Products Journal*, vol. 56, no. 9, pp. 38.
- de Gennaro, G., Dambruoso, P., Loiotile, A., Di Gilio, A., Giungato, P. & Tutino, M. 2014, "Indoor air quality in schools", *Environ Chem Lett*, vol. 12, pp. 467-482.
- Emmerich, S.J. 2006, "Simulated performance of natural and hybrid ventilation systems in an office building", *Hvac&R Research*, vol. 12, no. 4, pp. 975-1004.
- Eriksson, K.A., Levin, J.O., Sandström, T., Lindström-Espeling, K., Lindén, G. & Stjernberg, N.L. 1997, "Terpene exposure and respiratory effects among workers in Swedish joinery shops", *Scandinavian journal of work, environment & health*, , pp. 114-120.
- Ervasti, J., Kivimäki, M., Kawachi, I., Subramanian, S., Pentti, J., Oksanen, T., Puusniekka, R., Pohjonen, T., Vahtera, J. & Virtanen, M. 2012, "School environment as predictor of teacher sick leave: data-linked prospective cohort study", *BMC public health*, vol. 12, no. 1, pp. 770.
- Fang, L. 1998, "Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality", *Indoor air*, vol. 8, no. 2, pp. 80.
- Fang, L., Wyon, D.P., Clausen, G. & Fanger, P.O. 2004, "Impact of indoor air temperature and humidity in an office on perceived air quality, SBS symptoms and performance", *Indoor air*, vol. 14, pp. 74-81.
- Frontczak, M. & Wargocki, P. 2011, "Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments", *Building and Environment*, vol. 46, no. 4, pp. 922-937.

- Gminski, R., Marutzky, R., Kevekordes, S., Fuhrmann, F., Buerger, W., Hauschke, D. & Mersch-Sundermann, V. 2010, "Studies on health effects in healthy human volunteers caused by VOC emissions from oriented strand boards (OSB)", *NAUNYNSCHMIEDEBERGS ARCHIVES OF PHARMACOLOGY* SPRINGER 233 SPRING ST, NEW YORK, NY 10013 USA, , pp. 65.
- Gminski, R., Marutzky, R., Kevekordes, S., Fuhrmann, F., Bürger, W., Hauschke, D., Ebner, W. & Mersch-Sundermann, V. 2011, "Sensory irritations and pulmonary effects in human volunteers following short-term exposure to pinewood emissions", *Journal of wood science*, vol. 57, no. 5, pp. 436.
- Gminski, R., Tang, T. & Mersch-Sundermann, V. 2010, "Cytotoxicity and genotoxicity in human lung epithelial A549 cells caused by airborne volatile organic compounds emitted from pine wood and oriented strand boards", *Toxicology letters*, vol. 196, no. 1, pp. 33-41.
- Granström, K. 2010, "Underestimation of terpene exposure in the Nordic wood industry", *Journal of occupational and environmental hygiene*, vol. 7, no. 3, pp. 144-151.
- Granström, K. 2005, *Emissions of volatile organic compounds from wood. Doctoral dissertation. Karlstad University Studies 2005:6. ISBN 91-85335-46-0.*
- Haghighat, F. & Donnini, G. 1999, "Impact of psycho-social factors on perception of the indoor air environment studies in 12 office buildings", *Building and Environment*, vol. 34, no. 4, pp. 479-503.
- Haghighat, F. & De Bellis, L. 1998, *Material emission rates: Literature review, and the impact of indoor air temperature and relative humidity.*
- Hameury, S. 2007, "Influence of coating system on the moisture buffering capacity of panels of *Pinus sylvestris* L.", *Wood Material Science and Engineering*, vol. 2, no. 3-4, pp. 97-105.
- Hatvani, L., Manczinger, L., Vágvölgyi, C. & Kredics, L. 2013, "Trichoderma as a Human Pathogen. In *Trichoderma: biology and applications*, Mukherjee, P.K., Horwitz, B.A., Singh, U.S., Mukherjee, M., Schmoll, M., Eds.; CAB International: Wallingford, UK", *Trichoderma: biology and applications*, , pp. 292-313.
- Haverinen-Shaughnessy, U., Hyvärinen, A., Putus, T. & Nevalainen, A. 2008, *Monitoring success of remediation: Seven case studies of moisture and mold damaged buildings.*
- He, Z., Zhang, Y. & Wei, W. 2012, "Formaldehyde and VOC emissions at different manufacturing stages of wood-based panels", *Building and Environment*, vol. 47, pp. 197-204.
- Heiselberg, P. 2000, *Design principles for natural and hybrid ventilation*, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University.
- Heiselberg, P.K. 2002, *Principles of hybrid ventilation.*, Aalborg Universitet.
- Heiselberg, P., Bjørn, E. & Nielsen, P.V. 2002, "Impact of open windows on room air flow and thermal comfort", *International Journal of Ventilation*, vol. 1, no. 2, pp. 91-100.
- Hellgren, U.M. 2008, "Complaints and symptoms among hospital staff in relation to indoor air and the condition and need for repairs in hospital buildings", *Scandinavian journal of work, environment & health*, vol. 34, no. 4, pp. 58.
- Howell, C. 2003, "Mechanisms employed by Trichoderma species in the biological control of plant diseases: the history and evolution of current concepts", *Plant Disease*, vol. 87, no. 1, pp. 4-10.
- Hyttinen, M., Masalin-Weijo, M., Kalliokoski, P. & Pasanen, P. 2010, "Comparison of VOC

emissions between air-dried and heat-treated Norway spruce (*Picea abies*), Scots pine (*Pinus sylvestris*) and European aspen (*Populus tremula*) wood", *Atmospheric Environment*, vol. 44, no. 38, pp. 5028-5033.

Hyvarinen, A., Reponen, T., Husman, T. & Nevalainen, A. 2001, "Comparison of the indoor air quality in mould damaged and reference buildings in a subarctic climate", *Central European journal of public health*, vol. 9, no. 3, pp. 133-139.

ISO 16000-3:2011 *Indoor air - Part 3: Determination of formaldehyde and other carbonyl compounds in indoor air and test chamber air - Active sampling method.*

ISO 16000-30:2012 *Indoor air - Part 30: Sensory testing of indoor air.*

ISO 16000-6:2011 *Indoor air — Part 6: Determination of volatile organic compounds in indoor and test chamber air by active sampling on Tenax TA sorbent, thermal desorption and gas chromatography using MS or MS-FID.*

ISO 16000-9:2006 *Indoor air - Part 9: Determination of the emission of volatile organic compounds from building products and furnishing - Emission test chamber method.*

Jaakkola, J., Heinonen, O. & Seppänen, O. 1991, "Mechanical ventilation in office buildings and the sick building syndrome. An experimental and epidemiological study", *Indoor air*, vol. 1, no. 2, pp. 111-121.

Jaakkola, M., Laitinen, S., Piipari, R., Uitti, J., Nordman, H., Haapala, A. & Jaakkola, J. 2002, "Immunoglobulin G antibodies against indoor dampness-related microbes and adult-onset asthma: a population-based incident case-control study", *Clinical & Experimental Immunology*, vol. 129, no. 1, pp. 107-112.

Jensen, L.K., Larsen, A., MØlhave, L., Hansen, M.K. & Knudsen, B. 2001, "Health evaluation of volatile organic compound (VOC) emissions from wood and wood-based materials", *Archives of Environmental Health: An International Journal*, vol. 56, no. 5, pp. 419-432.

Ji, Y., Lomas, K.J. & Cook, M.J. 2009, "Hybrid ventilation for low energy building design in south China", *Building and Environment*, vol. 44, no. 11, pp. 2245-2255.

Johansson, E. 1994, *Emissioner från byggnadsmaterial*, Lunds Tekniska Högskola, Avdelningen för Byggnadsmaterial.

Kalamees, T. 2010, "Measured and simulated air pressure conditions in Finnish residential buildings", *Building Services Engineering Research & Technology*, vol. 31, no. 2, pp. 177.

Kasanen, J., Pasanen, A., Pasanen, P., Liesivuori, J., Kosma, V. & Alarie, Y. 1999, "Evaluation of sensory irritation of 3-carene and turpentine, and acceptable levels of monoterpenes in occupational and indoor environment", *Journal of Toxicology and Environmental Health Part A*, vol. 57, no. 2, pp. 89-114.

Kephalopoulos, S., Geiss, O. & Annys, E. 2014, *Harmonisation Framework for Health Based Evaluation of Indoor Emissions from Construction Products in the European Union using the EU-LCI Concept*, .

Kielb, C., Lin, S., Muscatiello, N., Hord, W., Rogers-Harrington, J. & Healy, J. 2015, "Building-related health symptoms and classroom indoor air quality: a survey of school teachers in New York State", *Indoor air*, vol. 25, no. 4, pp. 371-380.

Kim, J., Elfman, L., Mi, Y., Wieslander, G., Smedje, G. & Norbäck, D. 2007, "Indoor molds, bacteria, microbial volatile organic compounds and plasticizers in schools: associations with asthma and respiratory symptoms in pupils", *Indoor air*, vol. 17, no. 2, pp. 153-163.

- Kirkeskov, L., Witterseh, T., Funch, L., Kristiansen, E., Mølhave, L., Hansen, M. & Knudsen, B. 2009, "Health evaluation of volatile organic compound (VOC) emission from exotic wood products", *Indoor air*, vol. 19, no. 1, pp. 45-57.
- Kokko, E. 2004, *Sisäilman kosteusolojen parantaminen puurakenteilla*. Vantaa, Wood Focus Oy.
- Koskela, H., Maula, H., Haapakangas, A., Moberg, V. & Hongisto, V. 2014, "Effect of low ventilation rate on office work performance and perception of air quality—a laboratory study", *Extended abstract, Submitted to Indoor Air*, , pp. 7-12.
- Kuhls, K., Lieckfeldt, E., Börner, T. & Guého, E. 1999, "Molecular reidentification of human pathogenic *Trichoderma* isolates as *Trichoderma longibrachiatum* and *Trichoderma citrinoviride*", *Medical mycology*, vol. 37, no. 1, pp. 25-33.
- Kusuhara, M., Urakami, K., Masuda, Y., Zangiacomì, V., Ishii, H., Tai, S., Maruyama, K. & Yamaguchi, K. 2012, "Fragrant environment with α -pinene decreases tumor growth in mice", *Biomedical Research*, vol. 33, no. 1, pp. 57-61.
- L Undin, A. & M Usabašić, V. 2000, "Improved health after intervention in a school with moisture problems", *Indoor air*, vol. 10, no. 1, pp. 57-62.
- Lahtinen, M., Sundman Digert, C. & Reijula, K. 2004, "Psychosocial work environment and indoor air problems: a questionnaire as a means of problem diagnosis.", *Occupational and environmental medicine*, vol. 61, no. 2, pp. 143-149.
- Lahtinen, M., Huuhtanen, P., Kähkönen, E. & Reijula, K. 2002, "Psychosocial dimensions of solving an indoor air problem", *Indoor air*, vol. 12, no. 1, pp. 33-46.
- Laireiter, C.M., Schnabel, T., Köck, A., Stalzer, P., Petutschnigg, A., Oostingh, G.J. & Hell, M. 2013, "Active anti-microbial effects of larch and pine wood on four bacterial strains", *BioResources*, vol. 9, no. 1, pp. 273-281.
- Lampi, J. 2015, "Developing indoor air questionnaire for primary school pupils: Test-retest repeatability of self-and parent-administered questionnaires", *European Respiratory Journal*, vol. 46, no. suppl 59, pp. PA3402.
- Lan, L., Wargocki, P., Wyon, D.P. & Lian, Z. 2011, "Effects of thermal discomfort in an office on perceived air quality, SBS symptoms, physiological responses, and human performance", *Indoor air*, vol. 21, no. 5, pp. 376-390.
- Lappalainen, S., Reijula, K., Tähtinen, K., Latvala, J., Hongisto, V., Holopainen, R., Kurttio, P., Lahtinen, M., Rautiala, S. & Tuomi, T. 2017, "Ohje työpaikkojen sisäilmasto-ongelmien selvittämiseen", .
- Larsen, A., Frost, L., Funch, L.W., Jensen, L.K., Mølhave, L., Hansen, M. & Knudsen, B. 1999, "Emission of volatile organic compounds from wood and wood-based materials", *Copenhagen, Denmark: Ministry of Environment, Danish Environmental Protection Agency*, .
- Latvala, J., Karvala, K., Sainio, M., Selinheimo, S., Tähtinen, K., Lappalainen, S., Lahtinen, M. & Reijula, K. 2017, *Ohje työterveyshuollon toimintaan ja potilasvastaanotolle kun työpaikalla on sisäilmasto-ongelma*, Työterveyslaitos.
- Laukkanen, M. 2014, *Puun käyttö sairaalarakentamisessa tukee tervehtymistä*. 27.5.2014. Helsinki: Puuinfo Oy. [Verkkodokumentti.] Viitattu 16.5.2016. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/tiedote/puun-k%C3%A4ytt%C3%B6-sairalarakentamisessa-tukee-tervehtymist%C3%A4>.
- Leivo, V., Kiviste, M., Aaltonen, A., Turunen, M. & Haverinen-Shaughnessy, U. 2015, "Air

- pressure difference between indoor and outdoor or staircase in multi-family buildings with exhaust ventilation system in Finland", *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1218-1223.
- Leppänen, H. 2017, *Assessing microbial exposure in indoor environments by using house dust samples. Academic dissertation.*, University of Eastern Finland.
- Levänen, O. 2016, *Sisäilmakorjausprojektin onnistumisen varmentaminen ja laadunvarmistus. Diplomityö. Aalto-yliopisto.*
- Li, Q., Nakadai, A., Matsushima, H., Miyazaki, Y., Krensky, A.M., Kawada, T. & Morimoto, K. 2006, "Phytoncides (wood essential oils) induce human natural killer cell activity", *Immunopharmacology and immunotoxicology*, vol. 28, no. 2, pp. 319-333.
- Liu, Z., Ye, W. & Little, J.C. 2013, "Predicting emissions of volatile and semivolatile organic compounds from building materials: a review", *Building and Environment*, vol. 64, pp. 7-25.
- Lomas, K.J., Cook, M.J. & Fiala, D. 2007, "Low energy architecture for a severe US climate: design and evaluation of a hybrid ventilation strategy", *Energy and Buildings*, vol. 39, no. 1, pp. 32-44.
- Lozhechnikova, A., Bellanger, H., Michen, B., Burgert, I. & Österberg, M. 2017, "Surfactant-free carnauba wax dispersion and its use for layer-by-layer assembled protective surface coatings on wood", *Applied Surface Science*, vol. 396, pp. 1273-1281.
- Lozhechnikova, A., Vahtikari, K., Hughes, M. & Österberg, M. 2015, "Toward energy efficiency through an optimized use of wood: The development of natural hydrophobic coatings that retain moisture-buffering ability", *Energy and Buildings*, vol. 105, pp. 37-42.
- Lübeck, M., Poulsen, S.K., Lübeck, P.S., Jensen, D.F. & Thrane, U. 2000, "Identification of Trichoderma strains from building materials by ITS1 ribotyping, UP-PCR fingerprinting and UP-PCR cross hybridization", *FEMS microbiology letters*, vol. 185, no. 2, pp. 129-134.
- Magnavita, N. 2015, "Work-related symptoms in indoor environments: a puzzling problem for the occupational physician", *International archives of occupational and environmental health*, vol. 88, no. 2, pp. 185-196.
- Malmberg, B., Leanderson, P., Nilsson, A. & Flodin, U. 2000, "Powdering floor polish and mucous membrane irritation in secondary school pupils", *International archives of occupational and environmental health*, vol. 73, no. 7, pp. 498-502.
- Manninen, A., Pasanen, P. & Holopainen, J.K. 2002, "Comparing the VOC emissions between air-dried and heat-treated Scots pine wood", *Atmospheric Environment*, vol. 36, no. 11, pp. 1763-1768.
- Mattila, M., Vornanen-Winqvist, C., Jerkku, I. & Kurnitski, J. 2018, "Ylipaineistuksen ja ilmanpitävyyden vaikutus rakenteiden kosteustekniseen toimintaan.", *Sisäilmastoseminaari 2018 (Indoor Climate Seminar 2018). 15 March 2018. SIY raportti 36. ISSN 1237-1866, ISBN 978-952-5236-46-0.*
- Mattila, M. 2017, *Ylipaineistuksen ja ilmanpitävyyden vaikutus rakenteiden kosteustekniseen toimintaan. Diplomityö. Aalto-yliopisto.*
- Mattila, M., Vornanen-Winqvist, C., Jerkku, I. & Kurnitski, J. 2017, "Ylipaineistuksen ja ilmanpitävyyden vaikutus rakenteiden kosteustekniseen toimintaan.", *The Building Physics Conference (Rakennusfysiikka 2017) 24 October 2017 - 26 October 2017. Conference publication 4. Tampere University of Technology. [In Finnish.]* Juvenes Print, Tampere, Finland, pp. 91.

- McMullin, D.R., Renaud, J.B., Barasubiye, T., Sumarah, M.W. & Miller, J.D. 2017, "Metabolites of Trichoderma species isolated from damp building materials", *Canadian journal of microbiology*, vol. 63, no. 7, pp. 621-632.
- Meklin, T., Putus, T., Pekkanen, J., Hyvärinen, A., Hirvonen, M.-. & Nevalainen, A. 2005, "Effects of moisture-damage repairs on microbial exposure and symptoms in schoolchildren", *Indoor air*, vol. 15, pp. 40-47.
- Mikkola, R., Andersson, M.A., Kredics, L., Grigoriev, P.A., Sundell, N. & Salkinoja-Salonen, M.S. 2012, "20-Residue and 11-residue peptaibols from the fungus Trichoderma longibrachiatum are synergistic in forming Na⁺/K⁺-permeable channels and adverse action towards mammalian cells", *FEBS journal*, vol. 279, no. 22, pp. 4172-4190.
- Milling, A., Kehr, R., Wulf, A. & Smalla, K. 2005, "Survival of bacteria on wood and plastic particles: Dependence on wood species and environmental conditions", *Holzforschung*, vol. 59, no. 1, pp. 72-81.
- Muscatiello, N., McCarthy, A., Kielb, C., Hsu, W., Hwang, S. & Lin, S. 2015, "Classroom conditions and CO₂ concentrations and teacher health symptom reporting in 10 New York State Schools", *Indoor air*, vol. 25, no. 2, pp. 157-167.
- Niachou, K., Hassid, S., Santamouris, M. & Livada, I. 2005, "Comparative monitoring of natural, hybrid and mechanical ventilation systems in urban canyons", *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 5, pp. 503-513.
- Nuutinen, S. 2017, *Rakennusmateriaalien VOC-emissiot. Pro Gradu -tutkielma.*, Itä-Suomen yliopisto.
- Nyrud, A.Q. & Bringslimark, T. 2010, "Is interior wood use psychologically beneficial? A review of psychological responses toward wood", *Wood and Fiber Science*, vol. 42, no. 2, pp. 202-218.
- Nyrud, A.Q., Bringslimark, T. & Bysheim, K. 2014, "Benefits from wood interior in a hospital room: a preference study", *Architectural Science Review*, vol. 57, no. 2, pp. 125-131.
- Pekkanen, J. & Lampi, J. 2015, "Rakennusten kosteus- ja homevauriot ja terveyst", *Duodecim* ISSN: 2242-3281, .
- Peltola, J., Ritieni, A., Mikkola, R., Grigoriev, P.A., Pocsfalvi, G., Andersson, M.A. & Salkinoja-Salonen, M.S. 2004, "Biological effects of Trichoderma harzianum peptaibols on mammalian cells", *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 70, no. 8, pp. 4996-5004.
- Rakennustietosäätiö 1999, *RT 05-10710. Kosteus rakennuksissa. Ohjetiedosto.*
- Reijula, K., Ahonen, G., Alenius, H., Holopainen, R., Lappalainen, S., Palomäki, E. & Reiman, M. 2012, "Rakennusten kosteus- ja homeongelmat (in Finnish)", *Eduskunnan tarkastusvaliokunnan julkaisu*, vol. 1, pp. 2012.
- Reijula, K. & Sundman Digert, C. 2004, "Assessment of indoor air problems at work with a questionnaire.", *Occupational and environmental medicine*, vol. 61, no. 1, pp. 33-38.
- Risholm-Sundman, M., Lundgren, M., Vestin, E. & Herder, P. 1998, "Emissions of acetic acid and other volatile organic compounds from different species of solid wood", *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 56, no. 2, pp. 125-129.
- Roth, K., Dieckmann, J. & Brodrick, J. 2006, "Natural and hybrid ventilation", *ASHRAE Journal*, vol. 48, no. 6, pp. H37.

- Rundt, A., Backlund, P. & Paakkola, K. 2005, "Sisäilman hajut ja orgaaniset epäpuhtaudet. Työterveyslääkäri [verkkolehti] no, 23, s. 156-163.", .
- Sakuragawa, S., Kaneko, T. & Miyazaki, Y. 2008, "Effects of contact with wood on blood pressure and subjective evaluation", *Journal of wood Science*, vol. 54, no. 2, pp. 107-113.
- Sakuragawa, S., Miyazaki, Y., Kaneko, T. & Makita, T. 2005, "Influence of wood wall panels on physiological and psychological responses", *Journal of Wood Science*, vol. 51, no. 2, pp. 136-140.
- Salo, L., Castagnoli, E., Alapieti, T., Vornanen-Winqvist, C., Mikkola, R. & Salonen, H. 2018, "The effects of coatings on the indoor air emissions from pinewood building materials. Sisäilmastoseminaari 2018 (Indoor Climate Seminar 2018). 15.3.2018. SIY raportti 36. ISSN 1237-1866, ISBN 978-952-5236-46-0.", .
- Salo, L. 2017, *The effects of coatings on the indoor air emissions of wood board. Diplomityö.*, Aalto-yliopisto.
- Salonen, H. 2009, *Indoor air contaminants in office buildings. Doctoral dissertation*, Finnish Institute of Occupational Health.
- Salonen, H., Duchaine, C., Mazaheri, M., Clifford, S., Lappalainen, S., Reijula, K. & Morawska, L. 2015, "Airborne viable fungi in school environments in different climatic regions—A review", *Atmospheric Environment*, vol. 104, pp. 186-194.
- Salonen, H., Lappalainen, S., Lahtinen, M., Holopainen, R., Palomäki, E., Koskela, H., Backlund, P., Niemelä, R., Pasanen, A. & Reijula, K. 2011, *Toimiston sisäilmaston tutkiminen*, Helsinki: Työterveyslaitos.
- Salonvaara, M., Ojanen, T., Holm, A., Künzel, H.M. & Karagiozis, A.N. 2004, "Moisture buffering effects on indoor air quality-experimental and simulation results", *Proceedings (CD) of the Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings IX International Conference*, pp. 11.
- Salthammer, T., Uhde, E., Schripp, T., Schieweck, A., Morawska, L., Mazaheri, M., Clifford, S., He, C., Buonanno, G. & Querol, X. 2016a, "Children's well-being at schools: Impact of climatic conditions and air pollution", *Environment international*, vol. 94, pp. 196-210.
- Salthammer, T., Uhde, E., Schripp, T., Schieweck, A., Morawska, L., Mazaheri, M., Clifford, S., He, C., Buonanno, G. & Querol, X. 2016b, "Children's well-being at schools: Impact of climatic conditions and air pollution", *Environment international*, vol. 94, pp. 196-210.
- Schönwälder, A., Kehr, R., Wulf, A. & Smalla, K. 2002, "Wooden boards affecting the survival of bacteria?", *Holz als Roh-und Werkstoff*, vol. 60, no. 4, pp. 249-257.
- Seppänen, O.A. & Fisk, W.J. 2004, "Summary of human responses to ventilation", *Indoor air*, vol. 14, pp. 102-118.
- Shaughnessy, R., Haverinen-Shaughnessy, U., Nevalainen, A. & Moschandreas, D. 2006, "A preliminary study on the association between ventilation rates in classrooms and student performance", *Indoor air*, vol. 16, no. 6, pp. 465-468.
- Simonson, C., Salonvaara, M. & Ojalén, T. 2001, "Improving indoor climate and comfort with wooden structures. Espoo 2001", .
- Simonson, C., Salonvaara, M. & Ojanen, T. 2002, "The effect of structures on indoor humidity—possibility to improve comfort and perceived air quality", *Indoor air*, vol. 12, no. 4, pp. 243-251.

- Sisäilmastoluokitus 2008, RT 07-10946. *Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset.*
- Smedje, G. & Norbäck, D. 2003, "Asthmatic symptoms in school children in relation to building dampness and atopy", *Indoor and Built Environment*, vol. 12, no. 4, pp. 249-250.
- Son, Y., Lim, B., Park, H. & Kim, J. 2013, "Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from building materials to improve indoor air quality: focused on natural VOCs", *Air quality, atmosphere & health*, vol. 6, no. 4, pp. 737-746.
- Sosiaali- ja terveysministeriö 2016, *HTP-arvot 2016. Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. Julkaisuja 2016:8. ISBN:978-952-00-3792-5.*
- Sosiaali- ja terveysministeriö 2015, *Asumisterveysasetus (545/2015). Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista.*
- Spengler, J.D., Samet, J.M. & McCarthy, J.F. 2001, *Indoor air quality handbook*, McGraw-Hill New York, ISBN: 9780074455494.
- Sundell, J., Levin, H., Nazaroff, W.W., Cain, W.S., Fisk, W.J., Grimsrud, D.T., Gyntelberg, F., Li, Y., Persily, A. & Pickering, A. 2011, "Ventilation rates and health: multidisciplinary review of the scientific literature", *Indoor air*, vol. 21, no. 3, pp. 191-204.
- Sweco Asiantuntijapalvelut Oy 2016, *Sisäilmasto- ja kosteustekninen kuntotutkimus. Tutkimusselostus.*, Helsinki.
- Toyinbo, O., Shaughnessy, R., Turunen, M., Putus, T., Metsämuuronen, J., Kurnitski, J. & Haverinen-Shaughnessy, U. 2016, "Building characteristics, indoor environmental quality, and mathematics achievement in Finnish elementary schools", *Building and Environment*, vol. 104, pp. 114-121.
- Työterveyslaitos 2017, , *Kooste toimistoympäristöjen epäpuhtaus- ja olosuhdetasoista, joiden ylittyminen voi viitata sisäilmasto-ongelmiin. Päivitetty 27.2.2017. Saatavilla: <https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/09/sisaympariston-uitearvoja.pdf>.*
- Tyrväinen, L., Ojala, A., Korpela, K., Lanki, T., Tsunetsugu, Y. & Kagawa, T. 2014, "The influence of urban green environments on stress relief measures: A field experiment", *Journal of Environmental Psychology*, vol. 38, pp. 1-9.
- Vainio-Kaila, T., Hänninen, T., Kyyhkynen, A., Ohlmeyer, M., Siitonen, A. & Rautkari, L. 2017, "Effect of volatile organic compounds from *Pinus sylvestris* and *Picea abies* on *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Streptococcus pneumoniae* and *Salmonella enterica* serovar Typhimurium", *Holzforschung*, vol. 71, no. 11, pp. 905-912.
- Vainio-Kaila, T., Kyyhkynen, A., Viitaniemi, P. & Siitonen, A. 2011, "Pine heartwood and glass surfaces: Easy method to test the fate of bacterial contamination", *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 69, no. 3, pp. 391-395.
- Vesper, S.J., McKinstry, C., Yang, C., Haugland, R.A., Kerckmar, C.M., Yike, I., Schluchter, M.D., Kirchner, H.L., Sobolewski, J., Allan, T.M. & Dearborn, D.G. 2006, "Specific molds associated with asthma in water-damaged homes", *Journal of occupational and environmental medicine*, vol. 48, no. 8, pp. 852-858.
- Vornanen-Winqvist, C., Järvi, K., Toomla, S., Ahmed, K., Andersson, M., Mikkola, R., Marik, T., Kredics, L., Salonen, H. & Kurnitski, J. 2018a, "Ilmanvaihdon ylipaineistuksen vaikutus koulurakennuksen mitattuun ja koettuun sisäilman laatuun. Sisäilmastoseminaari 2018 (Indoor Climate Seminar 2018). 15.3.2018. SIY raportti 36. ISSN 1237-1866, ISBN 978-952-5236-46-0.", .

- Vornanen-Winqvist, C., Mattila M, Lignell U, Hildén S, Tuomi T & Salonen H. 2015, "Sisäilmaongelmat julkisissa uudisrakennuksissa. Rakennusfysiikka 2015. Tampere University of Technology. Department of Civil Engineering. Seminar publication 4. pp. 383-388.", .
- Vornanen-Winqvist, C., Ahmed, K., Toomla, S., Kurnitski, J., Mikkola, R. & Salonen, H. 2017, "Ventilation and indoor air quality in newly built school with hybrid ventilation. In: Healthy Buildings 2017 Europe July 2-5, 2017, Lublin, Poland, P0228.", .
- Vornanen-Winqvist, C., Järvi, K., Toomla, S., Ahmed, K., Andersson, M.A., Mikkola, R., Marik, T., Kredics, L., Salonen, H. & Kurnitski, J. 2018b, "Ventilation Positive Pressure Intervention Effect on Indoor Air Quality in a School Building with Moisture Problems", *International journal of environmental research and public health*, vol. 15, no. 2, pp. 230.
- Vornanen-Winqvist, C., Mikkola, R., Mattila, M., Kurnitski, J., Lignell, U., Hildén, S., Tuomi, T. & Salonen, H. 2016, "Indoor Air Problems in New Schools and Daycare centers. Indoor Air 2016. Proceedings: 11th International Conference of Indoor Air Quality and Climate. ISBN 978-0-9846855-5-4.", .
- Vornanen-Winqvist, C., Toomla, S., Ahmed, K., Kurnitski, J., Mikkola, R. & Salonen, H. 2017, "The effect of positive pressure on indoor air quality in a deeply renovated school building—a case study", *Energy Procedia*, vol. 132, pp. 165-170.
- Wang, S., Ang, H. & Tade, M. 2007, "Volatile organic compounds in indoor environment and photocatalytic oxidation: state of the art", *Environment international*, vol. 33, no. 5, pp. 694-705.
- Wargocki, P. & Wyon, D.P. 2017, "Ten questions concerning thermal and indoor air quality effects on the performance of office work and schoolwork", *Building and Environment*, vol. 112, pp. 359-366.
- Wargocki, P., Sundell, J., Bischof, W., Brundrett, G., Fanger, P.O., Gyntelberg, F., Hanssen, S.O., Harrison, P., Pickering, A., Seppänen, O. & Wouters, P. 2002, "Ventilation and health in non-industrial indoor environments: report from a European Multidisciplinary Scientific Consensus Meeting (EUROVEN)", *Indoor air*, vol. 12, no. 2, pp. 113-128.
- Wargocki, P., Wyon, D.P., Sundell, J., Clausen, G. & Fanger, P.O. 2000, "The Effects of Outdoor Air Supply Rate in an Office on Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity", *Indoor air*, vol. 10, no. 4, pp. 222-236.
- Winter, S., Schulte-Wrede, M. & Jebens, K. 2012, "Highly insulated wooden structures in Nordic climate", *World Conference on Timber Engineering 2012 (WCTE 2012)*. Curran Red Hook, NY, , pp. 227.
- Wirtanen, L. 2006, *Influence of moisture and substrate on the emission of volatile organic compounds from wall structures*, Helsinki University of Technology.
- Wolkoff, P. 2013, "Indoor air pollutants in office environments: assessment of comfort, health, and performance", *International journal of hygiene and environmental health*, vol. 216, no. 4, pp. 371-394.
- Wolkoff, P. 1998, *Impact of air velocity, temperature, humidity, and air on long-term voc emissions from building products*.
- Yang, C., Pakpour, S., Klironomos, J. & Li, D. 2016, "Microfungi in Indoor Environments: What Is Known and What Is Not" in *Biology of Microfungi* Springer, , pp. 373-412.
- Ympäristöministeriö 2012, *D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet 2012*.

Yu, C.W. & Kim, J.T. 2012, "Long-term impact of formaldehyde and VOC emissions from wood-based products on indoor environments; and issues with recycled products", *Indoor and Built Environment*, vol. 21, no. 1, pp. 137-149.