

Julkisten rakennusten ilmanvaihdon käyttöaikojen vaikutus työolosuhteisiin ja sisäilman laatuun

Työsuojelurahaston hanke 180094

Sami Lestinen, Simo Kilpeläinen ja Risto Kosonen



Julkisten rakennusten ilmanvaihdon käyttöaikojen vaikutus työolosuhteisiin ja sisäilman laatuun

Työsuojelurahaston hanke 180094

**Sami Lestinen, Simo Kilpeläinen ja Risto
Kosonen**

Aalto-yliopiston julkaisusarja
TIEDE + TEKNOLOGIA 3/2021

© 2021 Sami Lestinen, Simo Kilpeläinen ja Risto Kosonen

ISBN 978-952-64-0413-4 (painettu)

ISBN 978-952-64-0414-1 (pdf)

ISSN 1799-487X (painettu)

ISSN 1799-4888 (pdf)

<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-64-0414-1>

Unigrafia Oy
Helsinki 2021



Painotuotteet
4041-0619

Author

Sami Lestinen, Simo Kilpeläinen ja Risto Kosonen

Name of the publication

Julkisten rakennusten ilmanvaihdon käyttöaikaisten vaikutus työolosuhteisiin ja sisäilman laatuun

Publisher School of Engineering**Unit** Konetekniikan laitos**Series** Aalto-yliopiston julkaisusarja TIEDE + TEKNOLOGIA 3/2021**Field of research** HVAC**Language** Finnish**Abstract**

The public sector employs about 30% of the total employment. In addition, the building users include just under a million children and students. Therefore, a good indoor climate and the proper use of ventilation systems are important. Night ventilation is used to improve indoor air quality in public buildings before the premises are used. A typical use has been to turn off the ventilation after using the facilities and restart it about 2 hours before reusing those facilities. Another option is to keep night ventilation running at minimum ventilation. The third option is to use night ventilation intermittently. Nowadays it is common to keep ventilation units running continuously to ensure good indoor air quality in all situations, even if it significantly increases the energy consumption of ventilation.

The goal of this research project of the Finnish Work Environment Fund during 2019-2021 was to find out how night-time ventilation in public buildings should be used wisely so that good indoor climate conditions can be maintained, and unnecessary energy consumption can be avoided. The study measured the effects of night-time ventilation on indoor air quality and thermal conditions in 11 public buildings with no previously reported indoor air problems. In addition, the potential for microbial growth in the ventilation duct was examined in the laboratory. The study compared a stopped, continuous, and intermittent night ventilation strategy. Daytime ventilation was used normally in all cases. Each test case lasted for 2 weeks. Indoor air quality was assessed by measuring TVOC, carbon dioxide, and microbial concentrations. The pressure differences were measured over the external wall of the building and the ventilation operation was monitored by measuring the pressure difference of the devices.

The results show that the average TVOC concentrations in the mornings were at the same level in all ventilation strategies. TVOC concentrations were higher during the day than at night. This indicates that the use of the facilities had the greatest effect on the TVOC concentrations. In the samples of settled dust, the microbial concentration was usually only a few percent of the corresponding outdoor air concentration. The used strategy of night ventilation did not have a systematic effect on indoor microbial concentrations. It has been hypothesized that the contaminants in ventilation ductwork can flow into the room when the ventilation unit is started. However, in the ventilation start-up test, the particulate matter levels were not increased in the supply air. In the laboratory test, no mold growth occurred in humid conditions during a 3-month measurement. The throw distance of a supply air terminal unit is usually poor at a low ventilation rate, and therefore, if the low airflow is used at night, the supply air temperature should be lower than the indoor air temperature because it mixes into space more efficiently than the isothermal supply air. In general, the natural variation of the measured physical quantities was greater during the test periods than could be observed with different night ventilation operating strategies. The working conditions at the measured buildings were at normal levels. The results show that 2 hours of ventilation before the premises are used is sufficient, and therefore, continuous ventilation at night is not necessary.

Keywords night ventilation, IAQ, TVOC, microbes, pressure differences, thermal conditions**ISBN (printed)** 978-952-64-0413-4**ISBN (pdf)** 978-952-64-0414-1**ISSN (printed)** 1799-487X**ISSN (pdf)** 1799-4888**Location of publisher** Helsinki**Location of printing** Helsinki **Year** 2021**Pages** 95**urn** <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-64-0414-1>

Tekijä

Sami Lestinen, Simo Kilpeläinen ja Risto Kosonen

Julkaisun nimi

Julkisten rakennusten ilmanvaihdon käyttöaikojen vaikutus työolosuhteisiin ja sisäilman laatuun

Julkaisija Insinööritieteiden korkeakoulu**Yksikkö** Konetekniikan laitos**Sarja** Aalto-yliopiston julkaisusarja TIEDE + TEKNOLOGIA 3/2021**Tutkimusala** LVI-tekniikka**Kieli** Suomi**Tiivistelmä**

Julkisella sektorilla työskentelee noin 30 % työvoimasta. Lisäksi julkisten rakennusten käyttäjiin kuuluu vajaa miljoona lasta ja opiskelijaa. Sen vuoksi näiden rakennusten hyvä sisäilmasto ja ilmanvaihtojärjestelmien oikeanlainen käyttö on tärkeää. Yöilmanvaihtoa käytetään sisäilman laadun parantamiseen julkisissa rakennuksissa ennen tilojen käyttöä. Tyypillinen käytötapa on sulkea ilmanvaihto tilojen käytön jälkeen ja käynnistää se uudelleen noin 2 tuntia ennen tilojen uudelleenkäyttöä. Toinen vaihtoehto on pitää tiloissa ilmanvaihto käynnissä jatkuvasti minimi-ilmanvaihdoilla. Kolmas vaihtoehto on käyttää ilmanvaihtoa jaksottain tilojen käytön ulkopuolisina ajanjaksoina. Nykyisin on yleistä, että ilmanvaihtokoneita pidetään jatkuvasti päällä, jolla halutaan taata hyvä sisäilman laatu kaikissa tilanteissa. Tällöin ilmanvaihdon energiankulutus kasvaa merkittävästi.

Työsuojelurahaston tutkimushankkeessa 2019-2021 oli tavoitteena selvittää, miten julkisten rakennusten yöaikaista ilmanvaihtoa tulisi käyttää järkevästi siten, että voidaan ylläpitää hyvät sisäilmasto-olosuhteet ja välttää turhaa energiankulutusta. Tutkimuksessa mitattiin yöaikaisen ilmanvaihdon vaikutuksia sisäilman laatuun ja lämpöoloihin 11 julkisessa rakennuksessa, joissa ei ollut aiemmin raportoituja sisäilmaongelmia. Lisäksi laboratorioissa tutkittiin ilmanvaihtokanavaan syntyvää mikrobikasvustoa. Tutkimuksessa verrattiin pysäytettyä, jatkuvaa ja jaksottaista ilmanvaihtostrategiaa. Päiväilmanvaihtoa käytettiin kaikissa tapauksissa normaalisti. Jokainen testitapaus kesti 2 viikkoa. Sisäilman laatua arvioitiin mittaamalla TVOC-, hiilidioksidi- ja mikrobipitoisuuksia. Paine-eroja mitattiin rakennuksen ulkoseinän yli ja ilmanvaihdon toimintaa monitorointiin päätelaitteiden paine-eroa mittaamalla.

Tulokset osoittavat, että keskimääräiset TVOC-pitoisuudet olivat aamuisin samalla tasolla kaikilla ilmanvaihtostrategioilla. TVOC-pitoisuudet olivat suurempia päivällä kuin yöllä. Tämä osoittaa sen, että tilojen käytöllä oli suurin vaikutus tilojen TVOC-pitoisuuksiin. Laskeutuvan pölyn näytteissä sisäilman mikrobipitoisuus oli yleensä vain muutaman prosentin luokkaa vastaavasta ulkoilman pitoisuudesta. Yöilmanvaihdon käyttöstrategialla ei ollut systemaattista vaikutusta sisäilman mikrobipitoisuuksiin. On esitetty hypoteesi, että ilmanvaihtokoneen käynnistyksen yhteydessä kanavassa olevia epäpuhtauksia siirtyisi huonetilaan. Ilmanvaihtokoneen käynnistyksessä ei kuitenkaan havaittu hiukkastason nousua tuloilmassa. Laboratoriokokeessa ei 3 kk:n mittauksen aikana saatu kosteissa olosuhteissa homekasvua syntymään. Pienellä ilmavirralla tuloilman päätelaitteen heittopituus on yleensä varsin lyhyt, ja jos pientä ilmavirtaa käytetään yöaikana, niin silloin tuloilman tulisi olla alilämpöistä koska se sekoittaa tilan ilmaa tehokkaammin kuin isoterminen suihku. Yleisesti ottaen hankkeessa mitattujen fysikaalisten suureiden luonnollinen vaihtelu oli testijaksoilla suurempaa kuin mitä erilaisilla yöilmanvaihdon käyttöstrategioilla pystyi havaitsemaan ja kaiken kaikkiaan työolosuhteet olivat mitatuissa kohteissa normaalilla tasolla. Tulokset osoittavat, että ilmanvaihdon käynnistyksen 2 tuntia ennen tilojen käyttöä on riittävä, ja jatkuvalla ilmanvaihdoilla ei saada käyttöjakson alkuhetkellä parempia sisäilmaolosuhteita.

Avainsanat yöilmanvaihto, ilman laatu, TVOC, mikrobit, painesuhteet, lämpöolot**ISBN (painettu)** 978-952-64-0413-4**ISBN (pdf)** 978-952-64-0414-1**ISSN (painettu)** 1799-487X**ISSN (pdf)** 1799-4888**Julkaisupaikka** Helsinki**Painopaikka** Helsinki**Vuosi** 2021**Sivumäärä** 95**urn** <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-64-0414-1>

Alkusanat

Työsuojelurahaston tutkimushankeen aiheena oli julkisten rakennusten ilmanvaihdon käyttöaikojen vaikutus työolosuhteisiin ja sisäilman laatuun. Tutkimuksessa selvitettiin tilojen käytön ulkopuolisen ajanjakson ilmanvaihtostrategian vaikutusta ilman laatuun. Tämä tarkoittaa yöaikaista ilmanvaihtoa, jolla on merkitystä aamutilanteessa tilojen käytön alkaessa. Lisäksi julkisissa rakennuksissa näitä ulkopuolisia ajanjaksoja ovat viikonloput ja loma-ajat. Tutkimus käynnistyi kuntien toimesta sisäilmapajan pohjalta ja tutkimusta ovat rahoittaneet Työsuojelurahasto, Aalto-yliopistokiinteistöt Oy ja Senaatti-kiinteistöt sekä Helsingin, Espoon ja Vantaan kaupungit, jotka mahdollistivat mittaukset omistamissaan julkisissa rakennuksissa.

Tutkimusprojektin onnistumisen kannalta ensiarvoisen tärkeää oli ohjausryhmän toiminta sekä tilojen käyttäjien, koulujen ja päiväkotien johtajien sekä kiinteistöhuoltoyritysten toiminta. Ilman heidän asiantuntijuuttaan interventioiden tekeminen ei olisi ollut mahdollista. Mittausten haasteellisuus tuli esille erityisesti interventioiden myötä, koska nykyisiin järjestelmiin on varsin vaikeaa tehdä muutoksia, jotka eivät ole alkuperäisen suunnitelman mukaisia. Yleisesti ottaen kenttämittausten toteuttaminen vie paljon aikaa, ja yhden kohteen mittaaminen valmisteluineen kesti seitsemän viikkoa. Tutkimuksen toteutukseen vaikutti olennaisesti koronapandemia, koska rajoitusten aikana kohteita ei voitu mitata. Näin ollen alkuperäisestä 15 kohteesta pystyttiin mittaamaan vain 11 vuosina 2019-2020. Se ei kuitenkaan vähennä merkittävästi saatujen tulosten kattavuutta, ja tehtyjen mittausten avulla saatiin uutta tietoa ilmanvaihdon käyttöaikojen vaikutuksista työolosuhteisiin ja sisäilman laatuun todellisissa sisäympäristöissä.

Suurin kiitos tutkimushankkeen onnistumiselle kuuluu Työsuojelurahastolle, jonka tutkimushanke toteutettiin Aalto-yliopiston toimesta. Lämmin kiitos kuuluu myös tutkimushankkeen ohjausryhmälle, jossa oli rahoittajien edustajia, sekä THL:lle, joka analysoi laskeutuneen pölyn näytteet. Lisäksi kiitos Aalto-yliopiston mittausryhmälle kenttämittauksista, jossa Petteri Kivivuorella oli merkittävä rooli. Lisäksi haluamme kiittää Aalto-yliopiston Juha Jokisaloa tieteellisestä asiantuntemuksesta. Suuri kiitos Sisäilmayhdistys ry:n Mervi Aholalle, joka osallistui hankkeen ohjausryhmään ja kansalliseen tiedotukseen. Lisäksi kiitämme Itä-Suomen yliopistoa, joka osallistui ilmanvaihtokanavan mikrobikasvuston koejärjestelyn suunnitteluun ja toteutukseen. Lämmin kiitos myös Halton Oy:lle, joka luovutti testilaboratoriossa tehtyjä luokkahuoneen mittaustuloksia ja tietokoneella tehtyjä sisäilman CFD-simulointimalleja tutkimushankkeen käyttöön. Loppuraporttia kommentoivat Helsingin kaupungin Marianna Tuomainen, THL:n Maria Valkonen ja Itä-Suomen yliopiston Pertti Pasanen, joille haluamme antaa erityiskiitokset. Yleisesti ottaen tapaamisissa ja kokouksissa oli tärkeää ja asiantuntevaa keskustelua tulosten merkityksestä, mikä ohjasi tutkimusta koko hankkeen aikana. Kiitos kaikille hankkeeseen osallistuneille.

Espoossa 18.6.2021

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	1
Symbolit ja lyhenteet.....	4
1. Johdanto	7
2. Menetelmät	11
2.1 Kenttämittausten toteutus	11
2.1.1 Kenttämittaushaasteet.....	12
2.1.2 Yöilmanvaihdon testitapaukset	13
2.1.3 Mittalaitteet.....	14
2.1.4 Mikrobiologiset näytteet	17
2.1.5 Sisäilmaston kyselytutkimus	18
2.2 Ilmanvaihtokanavan mikrobikasvusto.....	18
2.3 Ilmanjaon ja aerosolien vaikutus.....	20
2.4 Yöilmanvaihdon vaikutus epäpuhtauksiin luokkatilassa	21
2.5 Tilastolliset muuttujat	23
3. Kenttämittaukset.....	25
3.1 Yöilmanvaihdon vaikutus sisäilman laatuun.....	25
3.1.1 Mikrobiologinen analyysi.....	28
3.1.2 TVOC-pitoisuus.....	32
3.1.3 Yhteenveto yöilmanvaihdon vaikutuksesta	33
3.2 Ilmanvaihdon käynnistyksen vaikutus PM-pitoisuuteen	35
3.3 Yöilmanvaihdon vaikutus kosteusolosuhteisiin	36
3.4 Ilmanvaihdon käyntiajan vaikutus vaipan paine-eroon	39
4. Lämpöolojen ja ilman laadun sisäilmastokysely.....	41
4.1 Yliopistorakennuksen ryhmätyötilat	41
4.1.1 Huoneen lämpöolot.....	41
4.1.2 Huoneilman laatu	44
4.2 Muut kohteet.....	47
4.2.1 Huoneen lämpöolot.....	47

4.2.2	Huoneilman laatu	51
5.	Ilmanvaihtokanavan mikrobikasvusto.....	55
5.1	Kontaktinäytteet	56
5.2	Sivelynäytteet	56
5.3	Ilmanäytteet	57
6.	Ilmanjaon ja aerosolien vaikutus	59
6.1	Ilmanvaihdon käynnistyksen vaikutus.....	59
6.2	Käyttöaineiden vaikutus TVOC-pitoisuuteen	59
7.	Yöilmanvaihdon vaikutus epäpuhtauksiin luokkatilassa	61
7.1	Yöaikainen minimi-ilmanvaihto.....	61
7.2	Päiväaikainen ilmanvaihto.....	62
7.3	Tuloilman lämpötila	62
7.4	Epäpuhtauslähteen sijainti	65
8.	Yhteenveto ja pohdinta	69
	Julkaisuluettelo	73
	Lähdeluettelo.....	74
	LIITE I: Sisäilmastokysely.....	81
	LIITE II: Mitattuja suureita	83
	LIITE III: Ilmanvaihdon aikatauluja	87

Symbolit ja lyhenteet

AsH ₃	arsiini
avg	keskiarvo
CAV	vakioilmavirtainen ilmanvaihtojärjestelmä
CE/m ² , d	soluekvivalenttia neliömetrille päivässä
CFD	computational fluid dynamics, laskennallinen virtausdynamiikka
CO ₂	hiilidioksidi
DNA	deoksiribonukleiinihappo
Gramneg	gramnegatiiviset bakteerit
Grampos	grampositiiviset bakteerit
H ₂ S	rikkivety
IV	ilmanvaihto
K1-K8	kysymys 1-8
KA	keskiarvo
max.	maksimi
min.	minimi
MIV	muutuvilmavirtainen ilmanvaihtojärjestelmä
MOS	metalli-oksidi-puolijohde -anturi
n	otoksen lukumäärä
NGS	uuden sukupolven sekvenssimenetelmä
NH ₃	ammoniakki
O ₃	otsoni
Pen/Asp	Penicillium, Aspergillus ja Paecilomyces variotii –ryhmä
PM 2,5	hiukkaspitoisuus, jossa hiukkasen halkaisija on alle 2,5 µm
PM 10	hiukkaspitoisuus, jossa hiukkasen halkaisija on alle 10 µm
pmy	pesäkkeen muodostava yksikkö
ppb	parts per billion
ppm	parts per million
qPCR	kvantitatiivinen polymeraasiketjureaktio
qv	ilman tilavuusvirta [m ³ /s]
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes simulation, RANS-simulointi
RAU	rakennusautomaatio
RH	ilman suhteellinen kosteus [%]
sade	sateen intensiteetti [mm/h]
SD	keskihajonta
SF ₆	rikkiheksafluoridi
SK	ilman suhteellinen kosteus [%]
s _{n-1}	otoskeskihajonta
s _φ	otoskeskiarvon keskivirhe
SST	Shear Stress Transport
t	aika [s]
T	ilman lämpötila [°C]
T1, T2, T3	testijakso
TVOC	haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuus

Unifung	sienien kokonaispitoisuus
URANS	Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes simulation, URANS-simulointi
V	huoneen tilavuus [m ³]
VAV	muutuvaimavirtainen ilmanvaihtojärjestelmä
VOC	haihtuva orgaaninen yhdiste
x	ilman kosteussisältö [kg/kg]
$\bar{\phi}$	otoskeskiarvo

1. Johdanto

Suomessa kaikessa sisäilman laatuun liittyvässä toiminnassa on ollut periaatteena ennaltaehkäistä ja vähentää sisäympäristöjen epäpuhtauksiin liittyviä terveysriskejä velvoittavilla säädöksillä ja korjaamalla rakennuksissa havaitut puutteet ja epäpuhtaudet (Lampi ja Pekkanen 2018). Julkisten rakennusten sisäilman laatu onkin ollut useita vuosia näkyvästi esillä eri medioissa, koska ilmanvaihtoon liittyvät ongelmat ovat yleisiä (Wargocki ym. 2002; Daisey ym. 2003; Mendell ja Heath 2005; Kosonen ym. 2011; Chatzidiakou ym. 2012; Hyvärinen ym. 2017; Fisk 2017; Ojanen ym. 2021). Suomessa julkinen sektori vastaa noin 30 % Suomen kokonaistyöllisyydestä, joten julkisten rakennusten sisäympäristöjen hyvät työolosuhteet ja ilman laatu ovat tärkeä osa ihmisten hyvinvointia. Tämän lisäksi varhaiskasvatuksessa on arvioitu olevan noin 200 000 lasta ja perusopetuksessa noin 500 000 oppilasta. WHO:n mukaan sisäilman laatu onkin yksi tärkeitä ihmisten terveyttä ja hyvinvointia määrittäviä tekijöitä (WHO 2000).

Kansalliset määräykset ja standardit määrittelevät sisäilmaston vaatimukset ja suositukset. Näitä vaatimuksia on mm. sosiaali- ja terveysministeriön, ympäristöministeriön, kuntien sisäilmaverkoston ja Sisäilmayhdistyksen julkaisuissa (Sosiaali- ja Terveysministeriö 2016; Ympäristöministeriö 2019; Tuomainen ym. 2019; Säteri ja Ahola 2018). Rakennettua sisäympäristöä voidaan kontrolloida LVI-järjestelmillä, joista oleellinen on koneellinen ilmanvaihto. Ilmanvaihdon tarkoituksena on tuoda puhdasta ilmaa tilakäyttäjille sekä laimentaa ja poistaa likaantunutta ilmaa hengitysvyöhykkeeltä. Tutkimuksissa on todistettu, että ilmanvaihto on välttämätön tekijä laadukkaan sisäilman hallinnassa (Mundt ym. 2004; Wyon 2004; Seppänen 2008; Sundell ym. 2011; Morawska ym. 2017; Wargocki 2021). Tähän vaikuttavat käytetyt ilmanjakotavat (Cao ym. 2014; Yang ym. 2019) ja huonevirtausten vuorovaikutus (Chung ja Hsu 2001; Koskela ym. 2010; Müller ym. 2013; Melikov 2015; Licina ym. 2015; Bivolarova ym. 2017). Lisäksi ilmanvaihdon ja sisäilmaston on osoitettu vaikuttavan merkittävästi ihmisen oppimiseen ja suorituskyykyyn (Wargocki ym. 2000; Wargocki ym. 2002; Shaughnessy ym. 2006; Wargocki ja Wyon 2007; Clements-Croome ym. 2008; Haverinen-Shaughnessy ym. 2011; Maula ym. 2017; Carrer ym. 2018). Yleisesti ottaen käytetyt ilmavirrat ja ilmanvaihtojärjestelmien toiminnan varmistaminen ovat saattaneet olla liian matalalla tasolla ja puutteellisia estämään sisäilmaston terveysriskejä (Seppänen ym. 1999; Seppänen ja Fisk 2004; Fanger 2006; Pegas ym. 2011; Wierzbicka ym. 2018). Sen vuoksi ilmanvaihtojärjestelmien oikeanlainen käyttö sekä ilmanvaihdon tehokkuuden ja toimivuuden varmistaminen on tärkeä osa rakennusten elinkaarta. (Yang ym. 2014; Borrego ym. 2015).

Käyttäjän ulkopuolisen ilmanvaihdon vaikutuksia sisäilman laatuun on tutkittu vähän. Suomessa aiheesta on tehty muutamia tutkimuksia (Fingerroos ym. 2005; Asikainen ym. 2015; Alanko 2018; Hyvärinen ym. 2017; Ojanen ym. 2021). Useimmiten yöaikaista ilmanvaihtoa on tutkittu lähinnä tilojen lämpöolojen hallinnan näkökulmasta (Blondeau ym. 1997; Geros ym. 1999; Artmann ym. 2007; Lynch ja Hunt 2011; Le Dreau ym. 2013; Santamouris ja Kolokotsa 2013; Solgi ym. 2018; Guo ym. 2021). Ilman laadun tutkimuksissa on todettu, että kasvaneet TVOC-pitoisuudet aamuisin voivat johtua

rakennusmateriaalien emissioista, koska ilmanvaihto ei ole yöllä käynnissä (Montgomery ym. 2015). Lisäksi tilakäyttäjät voivat altistua haitallisille epäpuhtauksille, koska ne voivat kerääntyä huoneilmaan ilman asianmukaista tuuletusta (Chao ja Hu 2004). Kouluissa tavanomainen menetelmä on ollut tuulettaa ikkunoista tai ovista oppituntien jälkeen (Coley ja Beisteiner 2002; Griffiths ja Eftekhari 2008; Almeida ym. 2011). Kuitenkin myös ulkoilman lähteet voivat nostaa VOC-pitoisuuksia (Ekberg 1994), vaikka tilojen käytön onkin todettu olevan merkittävä VOC-pitoisuuksien lähde (Wallace ym. 1989; Madureira ym. 2009). Lisäksi uusissa rakennuksissa on havaittu olevan suuremmat pitoisuudet kuin pitkään käytössä olleissa rakennuksissa (Brown ym. 1994). Erilaisten orgaanisten yhdisteiden haitallisia vaikutuksia voi olla erityisesti herkistyneillä tilakäyttäjillä (Mølhave 1982; Samet ym. 1987; Norbäck ym. 1990).

Koneellisen ilmanvaihdon käytöllä pystytään normaalisti suodattamaan huoneilman epäpuhtauspitoisuuksia alle 10 %:iin ulkoilman vastaavista pitoisuuksista, jos tuloilman suodattimet vaihdetaan suositusten mukaisesti. Ilmanvaihtojärjestelmien käytössä on kuitenkin ollut paljon ongelmia (Bask 2019; Kilpeläinen ym. 2021). Tämä voi johtua rakennusten ylläpidon riittämättömistä resursseista tai puutteista järjestelmän säädössä ja ilmavirtojen asettamisesta vastaanoton yhteydessä. Ilmanvaihtokoneet voivat esimerkiksi käydä vakioteholla koko vuoden ajan vuorokauden ympäri. Tätä perustellaan mm. sillä, että koneiden käydessä jatkuvasti sisäilmaongelmia ei pääse syntymään. Ilmanvaihtokoneiden jatkuvan käytön ei kuitenkaan ole osoitettu olevan edellytys laadukkaalle sisäilmalle. Varmin keino olisi luonnollisesti poistaa tilojen epäpuhtauslähteet ja varmistaa riittävä sisäilman vaihtuvuus tilojen käytön aikana (Fanger 1988; Seppänen ja Fisk 2004; Sundell 2004; Sisäilmayhdistys 2020; Springston ym. 2021). Monissa eurooppalaisissa standardeissa on annettu ohjeita ilmanvaihdon oikeanlaiselle käytölle (CEN 2001a; CEN 2012; CEN 2007).

Eräs oletamus on, että ilmanvaihtokoneiden pysäyttäminen aiheuttaa pölyn ja kosteuden kertymistä ilmanvaihtokanaviin, joissa ne mahdollisesti aiheuttavat mikrobikasvustoa. Tällöin ilmanvaihtokoneiden käynnistyttyä epäpuhtauksia voisi siirtyä tilojen oleskeluvyöhykkeelle. Jaksottaista ilmanvaihtoa ei yleensä käytetä, koska koneiden käynnistämisen uskotaan synnyttävän suuria hetkellisiä painepiikkejä, joilla voi olla haitallisia vaikutuksia sisäympäristöön. Ilmanvaihtokoneiden jatkuvaa käyttöä viikonloppuisin on perusteltu mm. sillä, että kouluissa lapset voivat tuoda vaatteiden ja kenkien mukana sisälle lunta ja vettä, joista syntyvä kosteus ei pääsisi poistumaan, mikäli ilmanvaihtokoneet ovat osan ajasta pysäytettynä. Näiden hypoteesien selvittäminen on tärkeää, sillä ilmanvaihtokoneiden jatkuva käyttö kuluttaa energiaa ja lyhentää koneiden käyttöikää. Tämän lisäksi ilmanvaihtokoneiden käyttäminen ympärivuorokautisesti voi lisätä haasteita saavuttaa Suomessa asetetut energiankulutustavoitteet, joten ilmanvaihtokoneiden jatkuvan käytön hyödyt on hyvä tarkastella tutkitun tiedon avulla eikä oletuksilla.

Koulujen ja muiden julkisrakennusten sisäilmaongelmia on tutkittu eri näkökulmista. Esimerkiksi VOC-pitoisuuksia on selvitetty 11 eurooppalaisessa kaupungissa (Geiss ym. 2011). Lisäksi tarkasteluissa on esitetty terveysongelmia mahdollisesti aiheuttavia tekijöitä (Sundell ym. 1993; Haverinen-Shaughnessy ym. 2015; Madureira ym. 2015; Allen ym. 2016; OAJ 2017) ja niiden vaikutusta rakennusten käyttäjiin (Turunen ym. 2014; Bakò-Birò ym. 2011), sekä menetelmiä sisäilmasto-ongelmien tunnistamiseksi ja korjaamiseksi (Tirkkonen ym. 2016; Salin ym. 2017; OAJ 2017). Yleisesti ottaen ongelmien ennaltaehkäisyyn on kuitenkin puututtu hyvin vähän, mikä saattaa johtua esimerkiksi puutteellisesta tiedosta yhdisteiden haittavaikutuksista (Koester ym. 2021). Ilmanvaihdon käyttötapoja on tutkittu Itä-Suomen yliopiston teettämässä opinnäytetyössä, jossa tarkasteltavana oli neljä erilaisilla ilmanjakotavoilla varustettua koulua (Alanko 2018). Ilmanvaihtojärjestelmän oikealla käytöllä ja kunnossapidolla riittävä sisäilman laatu pystytään varmistamaan rakenteellisten ratkaisuiden ja toteutuksen ollessa kunnossa, mikä on huomattavasti kustannustehokkaampaa kuin

ongelmiin reagoiti vasta niiden ilmetessä. Kehittynyt talotekninen anturointi mahdollistaa olosuhteiden reaaliaikaisen seurannan ja järjestelmien toimintatilan muutokset erilaisten raja-arvojen ylityksessä, jotka tähtäävät terveellisen ja viihtyisän sisäympäristön toteuttamiseen ja ylläpitoon rakennuksissa koko elinkaaren ajan. Aiemmassa tutkimuksessa määritettiin eräässä kohteessa käyttäjäkokemusten ero pysäytetyllä yöilmanvaihdolla ja jatkuvalla ilmanvaihdolla. Palautteiden perusteella tilojen käyttäjät eivät huomanneet eroa tilojen sisäilman viihtyisyyteen liittyvissä tekijöissä (Ojanen ym. 2021).

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten julkisten rakennusten käytönajan ulkopuolinen ilmanvaihto tulisi toteuttaa siten, että sisäilman laatu ja työolosuhteet pysyvät tavoitetasolla työpäivän aikana. Silloin riittävällä ilmanvaihdolla pystytään ehkäisemään mahdollisten sisäilmaongelmien syntyminen ja pitämään energiankulutus järkevällä tasolla. Tutkimuksessa tehtiin interventioita erilaisten yöaikaisten ilmanvaihdon käyttötapojen vaikutuksesta sisäilmasto-olosuhteisiin. Tutkimuksessa mitattiin huoneilman lämpötilaa, suhteellista kosteutta, ilmavirtoja sekä paine-eroja tilojen ja ulkoilman välillä. Lisäksi ilmasta otettiin näytteitä, joilla etsittiin viitteitä hiukkasmaisista epäpuhtauksista, haihtuvista orgaanisista yhdisteistä (TVOC), kuiduista ja mikro-organismeista. Lämpötiloja, ilman kosteutta ja paine-eroja mitattiin kenttäkäyttöön soveltuville mittalaitteilla (dataloggereilla), joilla pystyttiin mittaamaan useiden viikkojen seurantajakso. Ilmavirrat todennettiin mittauskäyntien yhteydessä ja niitä seurattiin mahdollisuuksien mukaan rakennusautomaation mittaustietojen avulla. Ilman hiukkasmääriä mitattiin hiukkaslaskureilla ja TVOC-pitoisuutta sekä laajan mittausalueen fotoakustisella kaasuanalysaattorilla että kohdennetun pienemmän mittausalueen mittarilla. Koekohteista kerättiin myös pölynäytteitä biologisten epäpuhtauksien havainnoimiseksi ja tunnistamiseksi. Tilojen käyttäjät altistuvat päivittäin erilaisille mikrobeille. Siksi on oleellista arvioida niiden pitoisuuksia ja ajallista kasvua sisäympäristöissä erilaisilla menetelmillä (Diapouli ym. 2013; Myatt ym. 2004; Frankel ym. 2012; Adams ym. 2015; Leppänen ym. 2018).

Lisäksi laboratorion kontrolloiduissa olosuhteissa tutkittiin ilmanvaihtokanavaan mahdollisesti syntyvää mikrobikasvustoa, kun koneellinen ilmanvaihto ei ole tilankäytön ulkopuolisella ajanjaksolla käytössä. Tällöin kanaviston pintamateriaalin kosteus vaikuttaa eniten mikrobikasvuston syntyyn, joka voi riittävän pitkään kestätyään johtaa mikrobikasvustoon (Kokko ym. 1999). Muutamassa vuorokaudessa kuivuva kosteus ei kuitenkaan yleensä aiheuta mikrobikasvustoa (Sisäilmayhdistys 2019). Olennaista mikrobikasvuston kehittymisessä on homesienten kasvun sallivan kosteus- ja lämpöolojen kesto. Lisäksi homehtumisherkkyyteen vaikuttaa materiaalin ominaisuudet. Orgaaniset materiaalit kuten puu ja paperi ovat herkkiä homehtumaan (Viitanen ym. 2010). Metalli- ja lasimateriaalit taas eivät ole herkkiä homehtumaan. Tutkimuksissa on löydetty viitteitä siitä, että ilmanvaihtokanavaan tiivistyvä kosteus saattaa edistää mikrobikasvuston kehittymistä (Pasanen ym. 1993; Pasanen ym. 2007). Esimerkiksi hyvin likaiseen sinkittyyn teräkseen on havaittu kehittyvän mikrobikasvustoa kosteissa olosuhteissa (Chang ym. 1996). Yleisesti ottaen ilmanvaihtokanavan mikrobikasvuston kehittymiseen voivat vaikuttaa ulkoilman partikkelit, ilman suodatuksen tehokkuus, ilman vesisisältö, ravinteet ja kanavassa virtaavan ilman nopeus (Bluyssen ym. 2003). Tutkittaessa kanavapinnan likaisuutta, joka epäsuorasti kuvastaa mikrobien käytettävissä olevien ravinteiden määrää, näytteitä voidaan ottaa pumpulla ja suodattimella, teippimenetelmällä tai pyyhkäisynäytteillä (Holopainen ym. 2002; Holopainen 2004; Pasanen ym. 2007).

Huoneilman numeerisella virtausmallinnuksella (CFD, Computational fluid dynamics) voidaan tuottaa laskennallista tietoa mitatun tiedon tueksi, koska kokeelliset menetelmät ovat monesti kalliita toteuttaa ja ne vievät paljon aikaa (Nielsen ym. 2007; Chen 2009; Li ja Nielsen 2011; Nielsen 2015). Tietokonesimuloinnilla huoneilman virtauskenttää pystytään mallintamaan yksityiskohtaisesti, kun taas mitattuja havaintoja on yleensä vain muutamasta kohdasta huonetilaa. Periaatteena

huonevirtauskentän numeerisessa tietokonemallinnuksessa on se, että aluksi luodaan matemaattinen malli, joka kuvaa annettua fysikaalista virtausilmiötä. Matemaattiseen malliin sisällytetään tärkeimmät tekijät, joten malliin on tehty yksinkertaistuksia verrattuna todellisuuteen. Matemaattinen malli muodostuu yleensä osittaisdifferentiaaliyhtälöistä, jotka kuvaavat eri fysikaalisten suureiden muutosta säilymsyhtälöissä (Pantakar 1980). Näitä yhtälöitä ovat esimerkiksi massan, liikemäärän ja energian säilymsyhtälöt sekä skalaarien kuljetusyhtälöt. Tilojen sisäilmastoa voidaan myös mallintaa monikomponenttivirtauksena, joka sisältää ilman lisäksi esimerkiksi kosteutta ja hiilidioksidia. Virtausdynamikassa ulkoiset voimat ovat olennaisia, koska ne ohjaavat virtauselementtien liikettä (Ferziger ja Peric 2002). Numeerisessa laskennassa matemaattista mallia ratkaistaan likimääräisesti, mutta yksityiskohtaisesti virtauskentän erillisissä pisteissä aika-askelin, jolloin saadaan mallinnettua todennäköinen virtauskenttä annetuilla reuna- ja alkuehdoilla. Tuloksen luotettavuutta pystytään parantamaan, jos reuna- ja alkuehdoissa käytetään mitattua tietoa. Yleisesti ottaen monien validoitujen laskentamenetelmien vahvuudet ja heikkoudet ovat tiedossa, joten niitä voidaan ottaa huomioon tulosten tulkinnassa. Mallinnuksen tulokset ovat kuitenkin yleensä hyvin tapauskohtaisia, joten niiden tarkkuutta tulisi validoida mittauksien avulla.

Tämä tutkimus käynnistyi alun perin kuntien toimesta sisäilmastopajan pohjalta ja toteutettiin kenttämittauksina sekä erillisinä laboratoriomittauksina ja tietokonemallinnuksina. Koekohteiksi valittiin aluksi 15 julkista rakennusta, joissa oli käytössä sekä vakio- että muuttuvilmavirtaisia ilmanvaihtojärjestelmiä. Lisäksi koekohteiden valinnassa otettiin huomioon erilaisia ilmanjakotavat. Kohteiksi valittiin terveitä rakennuksia, joissa ei ollut raportoituja sisäilmaongelmia. Tutkimuksen toteutukseen vaikutti koronapandemia, koska rajoitusten aikana kohteita ei voitu mitata. Näin ollen alkuperäisestä 15 kohteesta pystyttiin mittaamaan vain 11 vuosina 2019-2020.

Lisäksi koekohteissa toteutettiin kyselytutkimus, jolla selvitettiin tilojen käyttäjien tyytyväisyyttä sisäilman laatuun ja lämpöolosuhteisiin (Liite 1). Sisäilmaston mittaukset toteutettiin aikavälillä 1.1.2019-31.12.2020.

2. Menetelmät

2.1 Kenttämittausten toteutus

Kenttämittaukset toteutettiin aikavälillä 4.4.2019 – 7.10.2020. Mittauskohteiksi valittiin 15 julkista rakennusta, joissa oli vakio- tai muuttuvilmavirtaisia ilmanvaihtojärjestelmiä. Kohteiksi valittiin rakennuksia, joissa ei ollut aiemmin raportoituja sisäilmaongelmia. Koronan aiheuttaman poikkeustilanteen takia pystyttiin mittaamaan vain 11 kohdetta.

Sisäilmaston mittauksissa mitattiin ilman laatua, lämpöoloja ja paine-eroja rakennuksen vaipan yli. Mittaukset kestivät 4-6 viikkoa per kohde. Tilakäytön ulkopuoliselle ajanjaksolle annettiin 2 viikon testijakson ajaksi verrattavan ilmanvaihtostrategian ohjausasetukset. Mittauksia tehtiin 1-2 kohteessa samanaikaisesti. Mittaukset alkoivat tutustumiskäynnillä kohteeseen, jolloin sovittiin mitattava tila ja käytännön järjestelyt. Tutustumiskäynnillä oli myös mukana henkilö, joka teki myöhemmin tarvittavat muutokset ilmanvaihdon käyttöön rakennusautomaatiojärjestelmän avulla. Seuraavalla käynnillä mittausryhmä mittasi valitun tilan sisäilmastoa ja asensi yöilmanvaihdon testijaksoja varten määritellyt mittalaitteet. Ilmanvaihtojärjestelmän yöaikaiseen käyttötapaan tehtiin muutoksia 2 viikon välein ja mittalaitteita vaihdettiin 1 viikon välein. Alla on esitetty tehtyjä toimenpiteitä ja selvitettyjä asioita:

Tutustumiskäynti mittauskohteessa:

- Mittausten suunnittelu, valokuvat ja kyselytutkimusjärjestelyt
- Mittareiden sekä näytemaljojen asennuksen ja suojauksen suunnittelu
- IV-järjestelmän ja RAU-järjestelmän toiminta

Selvitettävät asiat:

- IV- ja RAU-järjestelmän suunnitteludokumentit
- Ilmanvaihdon normaalitilanteen käyttöajat
- Ilmavirtojen ohjaustavat ja ilmavirrat
- Tilan käyttöaika arkena ja viikonloppuna
- RAU-järjestelmän asetuserot: huonelämpötila, tuloilman lämpötila ja CO₂-pitoisuus
- Erillispoistojen käyttöajat ja niiden mahdollinen pysäyttäminen
- Kysely- ja/tai haastattelututkimuksesta sopiminen käyttäjäorganisaation vastuuhenkilön kanssa
- Tarvittaessa lupa reiän poraamiseen ikkunapuitteeseen paine-eromittausta varten
- Palohälyttimien kytkeminen pois päältä savukokeiden ajaksi ja uudelleen käynnistäminen
- RAU-järjestelmän mittapistet ja etäluentamahdollisuus
- Pääsy IV-konehuoneeseen sekä oikeudet ottaa kone käsisäätöön tarvittaessa
- Siivouksen ajankohta

Kohdetarpeet:

- Tikkaat
- Yhteys vahtimestariin
- Yhteys henkilöön, jolla on oikeus muuttaa ilmanvaihtojärjestelmän asetusarvoja ja palohälyttimien toimintaa merkisavukokeiden aikana.

2.1.1 Kenttämittauskohteet

Mittaukset toteutuivat 5 päiväkodissa, 5 koulussa ja 1 yliopistokiinteistössä (Taulukko 1). Kohteiden ilmanvaihtojärjestelminä oli 5 vakioilmavirtaista (Vakio) ja 6 muuttuvilmavirtaista (MIV) järjestelmää.

Taulukko 1. Mitatut kohteet ja niiden ilmanvaihtojärjestelmät.

Mittauskohteet	Kohteet määrä	Vakio määrä	MIV määrä
Päiväkoti	5	3	2
Koulu	5	2	3
Yliopistokiinteistö	1	-	1
Yhteensä	11	5	6

Taulukko 2 esittää mittausaikataulun vuodelle 2019 ja vuodelle 2020, johon vaikuttivat COVID-19 pandemian rajoitukset.

Taulukko 2. Mittausaikataulu vuodelle 2019 ja 2020.

Vuosi	2019																									
	Tammikuu					Helmikuu				Maaliskuu				Huhtikuu				Toukokuu				Kesäkuu				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Koekohteiden valinta	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x															
Mittausten valmistelu						x	x	x	x	x	x	x	x													
Yliopisto 1														x	x	x	x	x	x	x	x					
Koulu 1														x	x	x	x	x	x	x	x					
Päiväkoti 1																						x	x	x	x	
Päiväkoti 2																										
Koulu 2																						x	x	x	x	
Koulu 3																										
Päiväkoti 3																										

Vuosi	2019																									
	Heinäkuu				Elokuu				Syyskuu				Lokakuu				Marraskuu				Joulukuu					
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Koekohteiden valinta																										
Mittausten valmistelu																										
Yliopisto 1																										
Koulu 1																										
Päiväkoti 1		x																								
Päiväkoti 2		x	x																							
Koulu 2										x	x	x	x	x												
Koulu 3														x	x	x	x	x	x	x						
Päiväkoti 3																		x	x	x	x	x	x			

Vuosi	2020																									
	Tammikuu					Helmikuu				Maaliskuu				Huhtikuu				Toukokuu				Kesäkuu				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Päiväkoti 4		x	x	x	x	x	x	x	x																	
Koulu 4		x	x	x	x	x	x	x	x	x																
Koulu 5 - keskeytyi (covid rajoitus)										x	x	x														
Päiväkoti 5																										
Koulu 5 uudelleen																										

Vuosi	2020																									
	Heinäkuu				Elokuu				Syyskuu				Lokakuu				Marraskuu				Joulukuu					
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Päiväkoti 4																										
Koulu 4																										
Koulu 5 - keskeytyi (covid rajoitus)																										
Päiväkoti 5										x	x	x	x	x	x	x	x									
Koulu 5 uudelleen										x	x	x	x	x	x	x	x									

2.1.2 Yöilmanvaihdon testitapaukset

Testitapauksissa ilmanvaihtojärjestelmää käytettiin samoilla asetuksilla kahden viikon jaksoissa siten, että vertailutapauksina olivat 1) pysäytetty yöilmanvaihto, 2) jatkuva yöilmanvaihdon käyttö ja 3) jaksottainen yöilmanvaihdon käyttö. Tilojen käyttöaikana oli käytössä normaali ilmanvaihto. Mittausten kokonaisaika yhdessä kohteessa oli 6 viikkoa. Poikkeuksena olivat kohteet, joissa normaali ilmanvaihtostrategia oli ilmanvaihdon jatkuva käyttö. Näissä kohteissa testitapaukset olivat 1) yöilmanvaihdon jatkuva käyttö normaalilla ilmavirralla ja 2) yöilmanvaihdon jatkuva käyttö normaalilla suuremmalla ilmavirralla. Tällöin mittauskohteen kokonaisaika oli 4 viikkoa, koska jaksottaista ilmanvaihdon ohjausta ei pystytty toteuttamaan. Lopullisesti toteutuneet testitapaukset riippuivat paljon ilmanvaihtojärjestelmästä, koska erityisesti uusissa tarpeenmukaisissa järjestelmissä muutosten tekeminen ilmanvaihdon ohjaukseen oli haasteellista.

2.1.3 Mittalaitteet

Taulukko 3 esittää mittauskohteissa käytetyt mittalaitteet ja niiden tarkkuuden. Mittareilla mitattiin ilman laatua, lämpöolosuhteita, paine-eroa rakennuksen ulkovaipan yli sekä paine-eroa tuloilmalaitteen mittarenkaasta tai ilmanvaihtokanavan ja huoneilman välillä.

TVOC-mittauksissa käytettiin ilmanlaadun yleismittaria, joka perustuu puolijohdemenetelmään. Laitteessa on metalli-oksidi-puolijohde (MOS) -anturi, jonka anturointiyksiköt tunnistavat eri VOC-yhdisteitä ja kokoavat niistä normalisoidun TVOC-signaalin. Sen lisäksi laajaa tolueeniekvivalenttia TVOC-molekyylialuetta mitattiin kaasuanalysaattorilla, joka on laboratoriossa käytettävä mittauslaite. Kirjallisuudessa TVOC-pitoisuutta on suositeltu mitattavan monella eri menetelmällä, koska molekyylialue on varsin laaja sisäympäristöissä (Bastuck ym. 2018). TVOC-pitoisuus on approksimaatio ja se soveltuu parhaiten kuvaamaan eri testitapausten välisiä trendejä, jos ilman VOC-koostumus säilyy samanlaisena.

Tolueeniekvivalentin TVOC-pitoisuuden luotettavuus on huonompi kuin yhdisteiden omilla pitoisuuksilla laskettu TVOC-pitoisuus eikä sitä voi verrata minkään todellisen VOC-koostumuksen raja-arvoihin (Leino 2020). Aiemmissä tutkimuksissa IR-kaasumonitorilla (photoacoustic IR gas monitor) onkin saatu hyvin vaihtelevia huoneilman TVOC-pitoisuuksia odotettuun pitoisuuteen verrattuna (Hodgson 1995). Tutkimuksissa on havaittu, että MOS-puolijohdemenetelmä voi olla käyttökelpoinen tolueenin ja TVOC:in mittauksessa (Leidinger ym. 2014; Schultealbert ym. 2017; Schütze ym. 2017). MOS-menetelmän on kuitenkin havaittu tunnistavan paremminkin suhteellisia trendejä kuin määrällisiä pitoisuuksia (Herberger ym. 2010). Tässä raportissa esitetään puolijohdemenetelmällä saatuja tuloksia, koska niissä yöilmanvaihdon muutokset näkyivät paremmin kuin laajalla molekyylialueella mitatuissa tuloksissa, joihin vaikuttivat muun muassa ilman kosteus ja metaanitaso.

Laskeutuneen pölyn näytteitä kerättiin kahdeksalla vierekkäisellä petrimaljalla sisäilmasta ja ulkoilmasta. Näytemaljat olivat hyllykorkeuden perusteella 2,0-2,5 m:n korkeudella sisätilassa ja ulkona yleensä suojaisessa paikassa olevassa avonaisessa muovilaatikossa. Rinnakkaiset 4 maljaa yhdistettiin yhdeksi näytteeksi (jolloin yhdestä tilasta saatiin 2 rinnakkaista näytettä) ja näytteistä eristettiin DNA Chemagic DNA plant –kitillä (Perkin Elmer) käyttäen apuna KingFisher eristysrobotia (ThermoFisher). Näytteistä määritettiin kvantitatiivisella polymeraasiketjureaktiolla (qPCR-menetelmä) sienten kokonaispitoisuus (Unifung) (Haugland ja Vesper 2002), *Penicillium*, *Aspergillus* ja *Paecilomyces variotii* –ryhmä (Pen/Asp) (Haugland ym. 2004) sekä grampositiiviset (Grampos) ja gramnegatiiviset (Gramneg) bakteerit (Kärkkäinen ym. 2010). Näytteet pipetoitiin qPCR-analyysiin Piro-pipetointirobotilla (Dornier) optisille 96-kuoppalevyille ja analysoitiin Stratagene Mx3005P QPCR System (Agilent) laitteistolla. Ulkoilmasta ei raportoitu Grampositiivisiä bakteereja menetelmään liittyvän epävarmuuden vuoksi.

Taulukko 3. Mittauskohteissa käytetyt mittalaitteet.

Mittari	Suure	Tarkkuus	Kohde
Swema 3000	paine-ero	± 0.3 % mittausarvo, minimi ± 0.3 Pa, mittaus 5 min välein (kenttäkohde), mittaus 2 min välein (merkkiaine)	tuloilmalaite, rakennuksen vaippa
Tinytag plus 2 TGP-4500	ilman lämpötila ja kosteus	± 0.5 °C (0 ... +45 °C), ± 3 % RH kun 25 °C, mittaus 5 min välein	tuloilma, sisäilma, ulkoilma
Tinytag CO ₂ logger TGE-0011	CO ₂	± 50 ppm ± 3 % mittausarvo, mittaus 5 min välein	sisäilma
Tarkkuuskosteus-mittari	RH%	± 3 %, kun RH%>25 % ± 5 %, kun RH%<25%	laboratorio-laitteisto
Kaasuanalysaattori Gasera One, jossa filteri BP-3290-145 nm	TVOC	± 5 % tolueeniekvivalentin tarkkuus, mittaus 1 min välein	sisäilma
Testo 435-2 Anturi 1 Anturi 2	ilman nopeus	Anturi 1: ± 0.2 m/s ± 1.5 % mittaus Anturi 2: ± 0.1 m/s ± 1.5 % mittaus	poistoilma
Hiukkaslaskuri Trotec PC220	PM 2.5 PM 10	± 30 %, laskennan tehokkuus 50 % jos hiukkaset 0.3 μ m ja 100 % jos hiukkaset >0.45 μ m mittausjakso 1 min	tuloilma, sisäilma, ulkoilma
Sensirion SDP816-125 Pa	paine-ero	± 0.08 Pa ± 3 % mittaus mittaus ~ 30 min välein	tuloilma, rakennuksen vaippa
Environmental Test Meter AdvancedSense BE	epäorgaaniset kaasut	± 5 %, mittaus 5 min välein	sisäilma
Nuvap sisäilmastomittari	TVOC	TVOC ± 15 % mittaus 3-4 kertaa tunnissa	sisäilma

Ilmavirrat mitattiin koekohteissa tulo- ja poistoilmalaitteista joko anemometriä ja -torvea käyttäen tai epäsuorasti mittayhteistä tai ilmanvaihtokanavasta tehdyn paine-eromittauksen avulla (Kuva 1). Merkkisavukokeilla visualisoitiin ilmanjaon toimintaa.



Kuva 1. Ilmanvaihtojärjestelmän päätelaitteen mittauslaitteita: a) Anemometri ilman nopeuden mittaukseen. b) Ilmanohjaukseen käytettävä torvi, jonka sivussa on reikä mittausanturille. c) Swema 3000 tallentamassa mittausdataa tuloilmakanavasta valaisimen päällä.

PM2.5 ja PM10 hiukaspitoisuuksia mitattiin sisäilmassa, ilmanvaihtokanavassa ja ulkoilmassa kolmella hiukkaslaskurilla, joilla tallennettiin 100 kpl peräkkäisiä 1 minuutin mittausjaksoja (Kuva 2).



Kuva 2. Mittauskohteen PM2,5 ja PM10 hiukkasmittaus.

Sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron sekä päätelaitteen ilmavirran seurantaan käytettiin Sensirionin radiolähettimellä varustettuja pilvipalvelua hyödyntäviä antureita (Kuva 3). Lisäksi ilmavirran seurannassa käytettiin tapauskohtaisesti Swema-painemittaria (Taulukko 3).



Kuva 3. Mittauskohteen ulkovaipan paine-eron mittaus sisätilan ja ulkoilman välillä ikkunakarmin kohdalta.

TVOC-pitoisuutta mitattiin puolijohdemenetelmään perustuvalla Nuvap-sisäilmastomittarilla ja fotoakustisella kaasuanalysaattorilla, johon oli asennettu toluenille kalibroitu VOC-suodatin (Kuva 4).

a)



b)



Kuva 4. TVOC-pitoisuuden mittaus: a) kaasuanalysaattori, b) sisäilmastomittari.

Ilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta seurattiin mittausajanjaksolla Tinytag-loggereilla. Mittausmastoon asennettiin standardin ISO 7726 (CEN 2001b) suosituksen mukaisesti tallentavia mittareita korkeuksille 0,1 m, 0,6 m, 1,1 m ja 1,7 m (Kuva 5a). Hiilidioksidipitoisuutta mitattiin

mittausmastossa 1,1 m korkeudella. Lisäksi lämpötila- ja kosteusantureita asennettiin IV-tuloilmakanavaan. Ilmassa olevia epäorgaanisia kaasuja mitattiin AdvancedSense BE mittarilla, joka asennettiin mittausalkkuun, (Kuva 5b). Mittari tallensi ammoniakkin (NH_3), otsonin (O_3), rikkivedyn (H_2S) ja arsiinin (AsH_3) pitoisuuksia.



Kuva 5. Mittauskohteen mittalaitteet: a) huoneilman lämpötilan ja kosteuden mittausmasto, b) kaasujen mittaus.

2.1.4 Mikrobiologiset näytteet

Mikrobiologiset näytteet kerättiin jokaisen 2 viikon testijakson ajalta kahdeksalle rinnakkaiselle petrimaljalle huonetilasta (Kuva 6) ja ulkoilmasta (Kuva 7).



Kuva 6. Mikrobiologisten analyysien näytemaljat huonetilassa.



Kuva 7. Mikrobiologisten analyysien näytemaljat rakennuksen ulkopuolella.

Mikrobiologisista näytteistä eristettiin DNA, josta analysoitiin kvantitatiivisella polymeerasiketjureaktiolla (quantitative polymerase chain reaction, qPCR) bakteeri- tai sieniryhmien määrää (Haugland ja Vesper 2002; Haugland ym. 2004; Kärkkäinen ym. 2010). Sekvensoinnissa puolestaan määritettiin bakteerien ja sienten lajisto käyttämällä uuden sukupolven sekvenssimenetelmää (Next Generation Sequencing, NGS). NGS-menetelmänä käytettiin amplicon sequencing- sekvensointia, jolla voidaan määrittää tiettyjen geenialueiden avulla näytteessä olevat bakteerit ja sienet suku- tai lajitasolle. Mikrobiologiset näytteet analysoitiin Terveystieteiden ja hyvinvoinnin laitoksella (THL) Ympäristöterveysyksikössä.

2.1.5 Sisäilmaston kyselytutkimus

Koekohteissa toteutettiin sisäilmastokysely, jossa selvitettiin tilojen käyttäjien tyytyväisyyttä huoneilman lämpötilaan, vedontunteeseen, ilman kosteuteen, ilman laatuun ja ilmanvaihdon toimintaan erilaisissa käyttöjakson ulkopuolisen ilmanvaihdon käyttötilanteissa (LITE I). Lisäksi kyselyn lopussa pystyi antamaan vapaamuotoisia kommentteja. Kyselyssä tiedusteltiin myös vastaajan ikää ja sukupuolta, jotta vastauksia voitiin suhteuttaa näiden jakaumiin. Kyselyssä oli 7-kohtainen portaaton asteikko. Huoneilman hajua kysyttiin vastaavalla 6-kohtaisella asteikolla. Sisäilmastokyselyn asteikot perustuvat eurooppalaiseen standardiin EN 15251:2007 (CEN, 2007). Otannan koko vaikuttaa tilastolliseen virheeseen siten, että kun otanta on pieni, on tilastollinen virhe suuri. Tilastoanalyysissä alle 30 kpl:een otantaa voidaan pitää pienenä (Black, 1993).

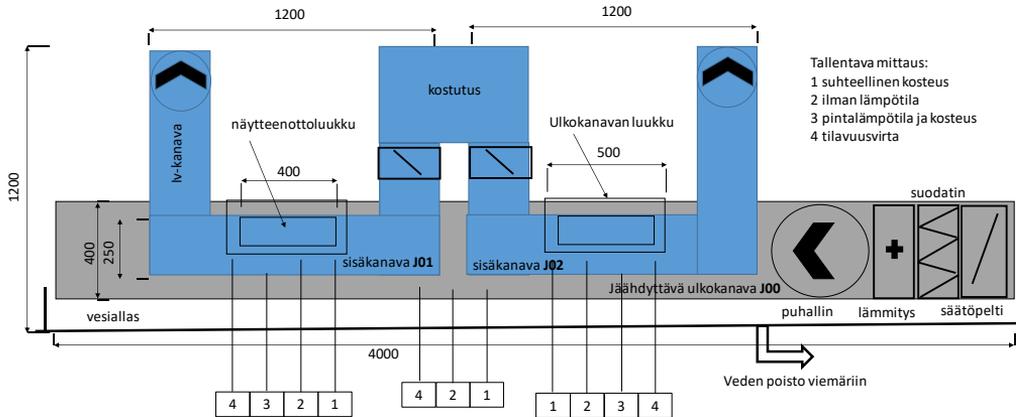
2.2 Ilmanvaihtokanavan mikrobikasvusto

Laboratorio-olosuhteissa tutkittiin ilmanvaihtokanavassa kasvavaa mikrobikasvustoa, kun tuloilmakanavassa oli kondensoivat olosuhteet. Tutkimuksessa verrattiin kahta erilaista ilmanvaihdon käyttötapaa: 1) koneellista ilmanvaihtoa ei käytetty tilakäytön ulkopuolisella ajanjaksolla ja 2) ilmanvaihto oli käyttöjakson ulkopuolisella ajanjaksolla rakentamismääräysten mukainen minimi-ilmavirta $0,15 \text{ L/s, m}^2$. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kasvaako mikrobikasvusto ilmanvaihtokanavassa, kun ilmanvaihto on yöllä pysähdyksissä tai minimi-ilmavirralla. Tiedossa on, että pitkään kosteissa olosuhteissa ollut mikrobikasvusto kehittyy likaisella pinnalla (Pasanen ym. 1993; Bluysen ym. 2003; Pasanen ym. 2007; Sisäilmayhdistys 2019). Sen sijaan ei tiedetä kuinka yöaikainen ilmanvaihto vaikuttaa homekasvuston riskiin ja kuinka nopeasti homekasvusto alkaa kasvaa, kun uudessa puhtaassa kanavistossa on kondensoivat olosuhteet.

Kaksi rinnakkaista ilmanvaihtojärjestelmää sisältävä koelaitteisto rakennettiin LVI-tekniikan laboratorioon. Koelaitteistossa on kaksi laboratoriahalli-ilmaa kierrättävää ilmanvaihtokanavaa, jotka simuloivat tuloilmakanavia (Kuva 8, sisäkanavat). Ilmanvaihtokanavat ovat uusia ilmanvaihtokanavia, jotka on tehty sinkitystä teräslevystä. Laitteistossa tutkittiin samanaikaisesti kahta edellä mainittua yöaikaisen ilmanvaihdon käyttötapaa, joita ohjattiin ilmanvaihtokanavissa J01 ja J02. Tavoitteenmukaisessa koejärjestelyssä ilmapuhallin käy molemmissa ilmanvaihtokanavissa 12 tuntia vuorokaudessa suuruusluokaltaan tilakäytön normaalilla ominaisilmavirralla 3 L/s, m², joka vastaisi 54 L/s:n ilmavirtaa kuvitellussa 18 m²:n tilassa. Tilakäytön ulkopuolella sisäkanavassa J02 oleva puhallin käy pienellä ominaisylläpitoilmavirralla 0,15 L/s, m², joka tarkoittaa vastaavassa kuvitellussa tilassa ilmavirtaa 2,7 L/s. Molemmissa ilmanvaihtokanavissa J01 ja J02 on ilman kostutus ja niitä jäähdytetään 24 tuntia vuorokaudessa ulommassa kanavassa (J00) virtaavalla ulkoilmalla, jota lämmitetään tarvittaessa lämmityspatterilla. Koelaitteistossa mikrobikasvustolle tavoiteltiin ilman 80-90 %:n kosteutta ja 10-15°C:n lämpötilaa, mitä seurattiin jatkuvatoimisilla mittareilla.

Olosuhteita mitattiin ulommassa kanavassa J00 molempien sisäkanavien näyteluukkujen vierestä ja ulomman kanavan pohjalta. Ulkokanavan sisäpinnan lämpötilaa mitattiin pinta-asenteisilla A PT100 luokan lämpötila-antureilla 30 sekunnin välein. Lisäksi yksi Tinytag-mittari mittasi ulomman kanavan jäähdytysilman lämpötilaa koelaitteiston poistokohdasta. Sisäkanavan lämpötila- ja kosteusolosuhteita mitattiin tarkastusluukun kautta kahdella Tinytag-mittarilla per näyteluukku kanavan seinämän lähellä 5 min välein (Taulukko 3). Sisäkanavien J01 ja J02 ulko- ja sisäpintojen lämpötilaa mitattiin A PT100 lämpötila-antureilla. Tarkkuuskosteusmittareilla seurattiin ilmankosteutta (Taulukko 3).

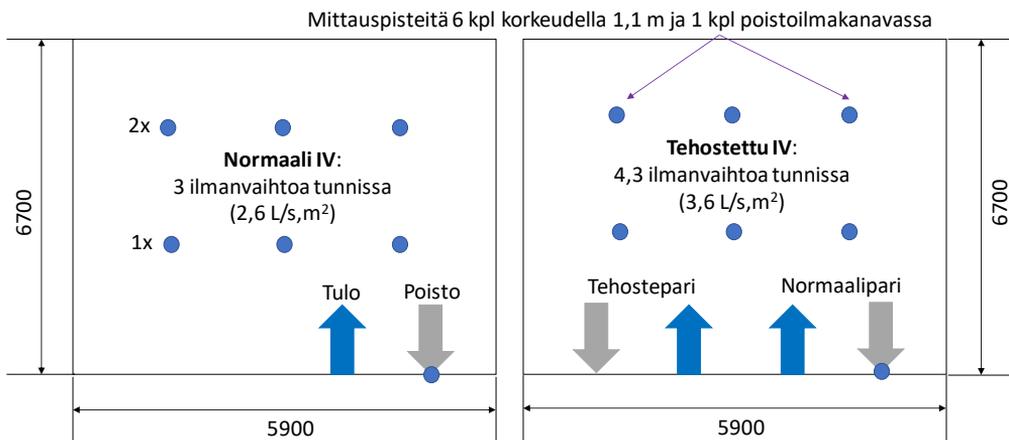
Tutkimuksen alussa ilmanvaihtokanavaan generoitiin tyypillisesti ilmanvaihtokanavissa esiintyvän homeen itiöitä, millä varmistettiin uuden kanavan mikrobikontaminaatio. Ilmanvaihtokanavan mikrobikontaminaatiota seurattiin kuukausittain kolmen kuukauden ajan. Mikrobinäytteet otettiin kanavan sisäpinnalta kontaktinäytteinä (Petrifilmi) kuukauden välein. Kanaviin menevästä ja poistuvasta ilmasta otettiin mikrobien ilmanäytteet Andersen keräimellä kokeen alussa ja lopussa. Ilmanäytteet otettiin kanaviin tehdyistä mittaustulosten avulla. Pintanäytteiden ottopisteet sijaitsivat ilmanvaihtokanavien näyteluukkujen kohdalla (Kuva 8). Sivelynäytteitä otettiin tarkasteluluukusta 10x10 cm² pinta-alalta pumpulipuikolla tai kontaktinäytteet homeille sopivalla Petrifilmillä (homefilmi) analysoinnin tehneen tutkimuslaboratorion ohjeiden mukaisesti (Sisäympäristön ja työhygienian tutkimusryhmä, Itä-Suomen yliopisto). Petrifilminäyte otettiin aina uudesta kohdasta painamalla filmi kanavan pintaan ja poistamalla se varovasti näytepussiin. Sivelynäyte otettiin pumpulipuikolla niin ikään neitseelliseltä pinnalta, jonka jälkeen puikko laitettiin koeputkeen kuljetuksen ajaksi. Mikrobinäytteet toimitettiin laboratorioon, jossa pintanäytteet viljeltiin sieni- ja bakteerialustoille, ja mikrobit tunnistettiin pesäkemorfologian mukaisesti sukutasolle. Tulosten perusteella arvioitiin mikrobikasvun voimakkuutta.



Kuva 8. Periaatekaavio ilmanvaihtokanavan mikrobikasvuston koejärjestelystä.

2.3 Ilmanjaon ja aerosolien vaikutus

Ilmanjaon vaikutusta sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin tarkasteltiin Aalto-yliopiston ryhmätyötilassa. Merkkiaine oli rikkiheksafluoridi, jonka molekyylikaava on SF_6 ja moolimassa 146 g/mol. Vertailutapauksina olivat ilmanvaihdon normaalikäyttö ja ilmanvaihdon tehostettu käyttö. Ilmanvaihdon normaalikäytöllä ryhmätyötilan sisäilman vaihtuvuus oli keskimäärin noin 3 kertaa tunnissa ($2,6 \text{ L/s, m}^2$). Ilmanvaihdon tehostetulla käytöllä sisäilman vaihtuvuus oli vastaavasti keskimäärin 4,3 kertaa tunnissa ($3,6 \text{ L/s, m}^2$).



Kuva 9. Periaatekaavio ilmanjaon vaikutuksen koejärjestelystä ryhmätyötilassa (näköymä ylhäältä). Ilmanjako on asennettu käytäväseinälle, jossa on kaksi tulo-poistoilmalaitteparia ON-OFF pelteineen. Mittauspisteitä on 6 kappaletta oleskeluvyöhykkeellä mittauskorkeudella 1,1 m ja yksi mittauspiste poistoilmakanavassa. Käyttöaineiden mittauspisteet on merkitty 1x ja 2x.

Merkkiainetta päästettiin ilmaan ja sekoitettiin puhaltimella tasaisesti ryhmätyötilaan siten, että SF_6 -pitoisuus kasvoi yli 30 ppm:n. Tämän jälkeen pitoisuuden alenemista mitattiin kaasuanalysointorilla kuudessa eri mittauspisteessä, jotka olivat oleskeluvyöhykkeellä $1,1 \pm 0,05 \text{ m:n}$ korkeudella (Kuva 9).

Lisäksi mitattiin poistoilman pitoisuutta. Mittauksissa tarkasteltiin neljää eri testitapausta: 1) ilmanvaihdon käynnistys normaali-ilmavirralla, jolloin yksi tulo- ja poistoilmalaitepari on käytössä (tehostepellit kiinni), 2) ilmanvaihdon käynnistys suurelle ilmavirralla, jolloin molemmat tulo- ja poistoilmalaiteparit ovat käytössä (tehostepellit auki), 3) pieni ilmavirta, jolloin yksi tulo-poistoilmalaitepari on käytössä ja 4) pieni ilmavirta, jolloin kaksi tulo-poistoilmalaiteparia on käytössä.

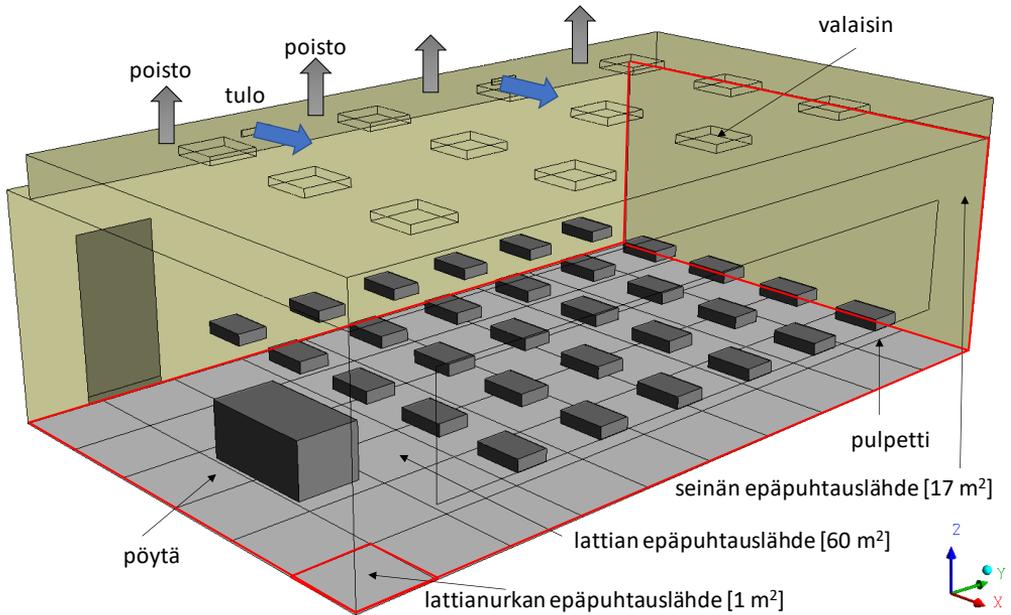
Lisäksi tarkasteltiin aerosoleja ja kemikaaleja sisältävien aineiden vaikutusta ilman laatuun etäisyyden ja ajan funktiona kahdessa oleskeluvyöhykkeen mittauspisteessä (1x ja 2x, Kuva 9). Tarkasteltavia aineita olivat suihkedeodorantti, laitossiivousaine, hiussuihke ja käsidesi. Aineita päästettiin ilmaan 15 minuutin välein ja lähin mittauspiste oli 1 metrin päässä pitoisuuslähteestä. Pitoisuuksia mitattiin kaasuanalyysaattorilla, jossa oli käytössä 2 mittauskanavaa ja tolueeniekvivalentti TVOC-suodatin. Mittausten aikana oli käynnissä normaali ominaisilmavirta (2,6 L/s,m²).

2.4 Yöilmanvaihdon vaikutus epäpuhtauksiin luokkatilassa

Huonevirtauskentän simuloinnin yleisiä periaatteita ja laadun varmistusta on kirjallisuudessa kuvattu useissa lähteissä (Nielsen ym. 2007; Chen, 2009; Li ja Nielsen, 2011; Nielsen, 2015). Näitä periaatteita käytettiin tehdyissä virtaussimuloinneissa. Huonevirtauskentän virtaussimuloinnilla mallinnettiin yöaikaisen minimi-ilmanvaihdon vaikutusta luokkatilan epäpuhtauksiin kolmella samansuuruisella (emissiovirta 12 mg/h) pitoisuuslähteellä, jotka sijaitsivat luokan lattialla (60 m²), luokan seinällä (16,8 m²) ja luokan lattianurkkauksessa (1 m²). Käytetty emissiovirta vastaisi luokkatilan koko lattiapinta-alalle asennettua matalapäästöistä materiaalia, jonka emissiovuo on 0,2 mg/h, m² (Sisäilmastoluokitus 2018; EN15251:2007). Koska alueet olivat erikokoisia, emissiovuo oli suurin huoneen nurkkauksessa ja pienin lattiassa. Tällä mallinnusjärjestelyllä haluttiin demonstroida yöilmanvaihdon vaikutusta huoneen eri kohdissa.

Luokkatilasta tehty CFD-malli perustui aiemmin tehtyihin mittauksiin (Kosonen ja Mustakallio, 2010) ja niiden pohjalta validoituun CFD-malliin (Mustakallio ja Kosonen, 2011). Aiemmin tehtyä CFD-mallia muokattiin geometrian, laskentaverkon, laskentamallien sekä reunaehtojen ja alkuehtojen osalta vastaamaan uusia testitapauksia.

Mallinnetun luokan pituus oli 10 m, leveys 6 m ja korkeus 3,3 m. Alakaton kohdalla korkeus oli 3 m. Mallinnettu ilmanjako oli sekoittava käytäväsäleikköilmanjako, joka oli sijoitettu symmetrisesti käytäväseinälle. Ilmanjaon päätelaitteita olivat 2 tuloilmasäleikköä seinällä ja 4 poistoilmaventtiiliä alakatossa (Kuva 10). Tuloilmasäleikköjen virtaussuunta oli vaakatasosta 15 astetta ylöspäin. Ulkoseinällä oli ikkuna. Luokan geometria oli yksinkertaistettu siten, että mallinnettavan virtausilmion kannalta olennaisimmat piirteet oli huomioitu tilan sisustuksessa.

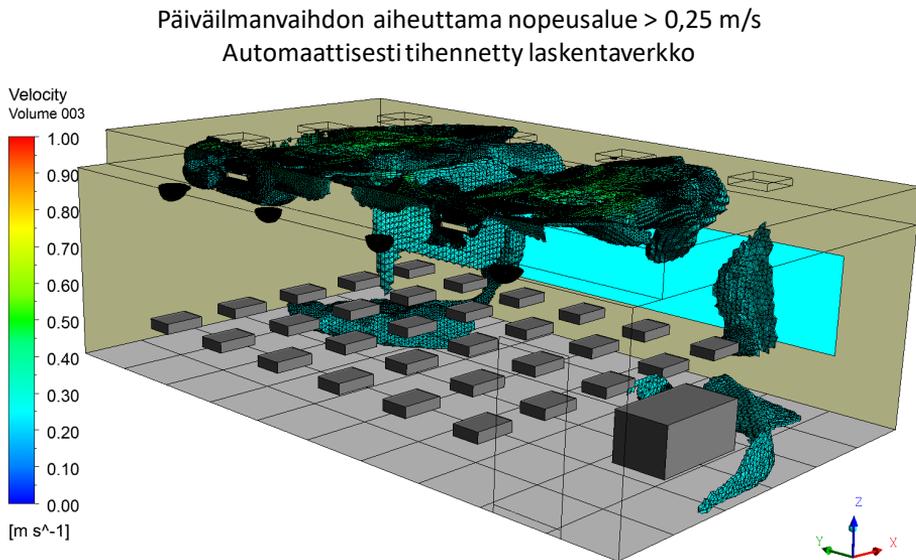


Kuva 10. Periaatekaavio luokkatilan geometriasta ja ilmanjaosta (isometrinen näkymä).

Päivällä ilmavirta oli 6 L/s per henkilö (3 L/s,m²), jolloin molemmat ilmanjaon päätelaitteiden tulo-poisto-osajärjestelmät (2 säleikköä ja 4 venttiiliä) olivat käytössä. Yöilmanvaihdossa käytettiin vain ovenpuolimmaista tulo-poisto-osajärjestelmää (1 säleikkö ja 2 venttiiliä), jolloin toisen osajärjestelmän pelti oli kiinni. Yöilmanvaihdon ensimmäisessä testitapauksessa koneellinen ilmanvaihto oli pysäytetty. Toisessa tapauksessa yöaikainen ilmanvaihto oli Suomen rakentamismääräyskokoelman D2 ja ympäristöministeriön asetuksen 1009/2017 mukainen minimi-ilmavirta 0,15 L/s, m² (Ympäristöministeriö, 2012; Ympäristöministeriö, 2017). Tuloilman päätelaitteissa hyödynnettiin valmistajalta (Halton Oy) saatua nopeusjakaumaa siten, että tuloilman massavirta oli oikea. Päätelaitteen yksinkertaistuksesta johtuvaa nopeustason muutosta korjattiin tuloilmasuihkun liikemäärälähteellä. Poistoilmalaitteen oikea massavirta varmistettiin laskennassa. Käyttöajan ulkopuolinen jakso määriteltiin olevan 12 tuntia. Tuloksissa tarkasteltiin yksityiskohtaisesti huonevirtauskentän pitoisuuksien yöaikaista kehittymistä ja päiväaikaista alenemista. Lisäksi tarkasteltiin tuloilman lämpötilan vaikutusta epäpuhtauspitoisuuksiin eri huonetilan kohdissa.

CFD-simuloinneissa käytettiin ANSYS ICEM CFD-ohjelmistoa (ANSYS, 2019a) luokkatilasta aiemmin tehdyn CFD-mallin geometrian muutoksissa ja laskentaverkon muodostamisessa. Testitapausten laskentamallit ja reunaehdot määritettiin ANSYS CFX-ohjelmistolla (ANSYS, 2019c), jolla myös tehtiin virtauskentän numeerinen laskenta. Tulosten jälkikäsitelyssä käytettiin ANSYS CFD-Post-ohjelmistoa (ANSYS, 2019b). Mallinnuksessa käytettiin ajasta riippumatonta RANS-simulointia (Reynolds-Averaged Navier-Stokes simulation), jossa virtauskenttä aikakeskiarvoistetaan. Lisäksi käytettiin ajasta riippuvaa URANS-simulointia (Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes simulation), jonka yhtälöissä on ajanmuutosta kuvaava termi. Yhtälöiden diskretointi tehtiin toisen kertaluvun menetelmällä sekä paikan että ajan suhteen. Turbulenssia mallinnettiin SST-turbulenssimallilla (Menter, 1994), jossa seinämärakerroksen käsittelyssä oli ns. automaattinen lähestymistapa (the automatic wall treatment). Konvektio-diffusioyhtälöä käytettiin emissioiden kulkeutumisen ja leviämisen laskennassa. CFD-simuloinnissa hyödynnettiin mittausdataa reunaehdoissa ja laskentaverkon automaattista tihentämistä (grid adaptation) laskennan aikana (Kuva 11). Kuvasta nähdään, että

laskentaverkko on tihentynyt tuloilmasuihkujen sekoituskerroksissa, joissa on suuria muutoksia, mikä pienentää diskretoinnista aiheutuvaa virhettä.



Kuva 11. Päiväilmanvaihdon aiheuttamat nopeusalueet > 0,25 m/s ja automaattisesti tihennetty laskentaverkko (grid adaptation).

2.5 Tilastolliset muuttujat

Otoskeskiarvo $\bar{\phi}$ on laskettu kaavalla

$$\bar{\phi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \phi_i, \quad (1)$$

missä ϕ kuvaa yleistä muuttujaa, n on otoksen lukumäärä, Σ on summaa tarkoittava matemaattinen operaattori ja i on kyseessä olevan muuttujan arvon järjestysnumero otoksessa. Otoskeskihajonta s_{n-1} on laskettu kaavalla

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\phi_i - \bar{\phi})^2}{n - 1}}. \quad (2)$$

Otoskeskiarvon keskivirhe on laskettu kaavalla

$$s_{\bar{\phi}} = \frac{s_{n-1}}{\sqrt{n}}. \quad (3)$$

Testitapauksen otoskeskiarvon suhteellinen muutos $\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$ [%] verrattuna normaalitilanteeseen on laskettu kaavalla

$$\frac{\Delta \bar{\phi}}{\bar{\phi}} = \frac{\bar{\phi}_{i+1} - \bar{\phi}_i}{\bar{\phi}_i} \times 100 [\%], \quad (4)$$

jossa Δ viittaa muuttujien väliseen erotukseen, indeksi i viittaa perustapaukseen ja $i + 1$ siihen verrattavaan testitapaukseen. Perustapaus on yleensä pysäytetty yöilmanvaihto.

3. Kenttämittaukset

3.1 Yöilmanvaihdon vaikutus sisäilman laatuun

Mittaukset tehtiin Etelä-Suomessa viidessä päiväkodissa ja kuudessa koulussa. Kuva 12 esittää mitatut päiväkodit.



Kuva 12. Mitatut päiväkodit: a) päiväkodin 1 leikkihuone kesällä, b) päiväkodin 2 leikkihuone kesällä, c) päiväkodin 3 leikkihuone syksyllä, d) päiväkodin 4 leikkihuone talvella, e) päiväkodin 5 leikkihuone syksyllä, f) mittauslaitteita kaapin päällä.

Päiväkoti 1 on rakennettu 2012. Ryhmähuoneen (21 m²) käytäväseinällä oli vakioilmavirtainen sekoittava ilmanjakojärjestelmä (Kuva 12a). Poistoilmaventtiilit olivat käytäväseinällä toisella puolella huonetta. Ilmanvaihtojärjestelmä ylläpiti vakiona kanaviston staattista painetta taajuusmuuttajakäyttöisillä puhaltimilla. Tuloilman lämpötilaa säädettiin kaskadiohjauksella huoneilman lämpötila-antureiden perusteella. Ilmanvaihdon ohjausasetus oli joko nopea (1/1), hidas (1/2) tai pysäytetty. Suunniteltu ilmanvaihto oli 3 L/s,m². Ryhmähuoneessa oli tyypillisesti 5-10 henkilöä.

Päiväkoti 2 on rakennettu 2014. Leikkihuoneen (36 m²) seinällä olevaa muuttuvilmavirtaista ilmanjakojärjestelmää (Kuva 12b) ohjattiin CO₂-, ilman lämpötila- tai läsnäoloantureilla. Poistoilmaventtiilit olivat samalla seinällä kuin tuloilmasäleiköt. Suunniteltu maksimi-ilmavirta oli 100 L/s, joka on 2,8 L/s, m². Leikkihuoneessa oli yleensä 5-10 henkilöä. Minimi-ilmavirta oli noin 50 % maksimi-ilmavirrasta.

Päiväkoti 3 on rakennettu 2013. Päiväkoti oli jatkuvassa käytössä 24 h/vrk. Leikkihuoneessa (34 m²) oli muuttuvilmavirtainen sekoittava ilmanjakojärjestelmä kattopäätelaitteilla (Kuva 12c), jota ohjattiin CO₂-, ilman lämpötila- tai läsnäoloantureilla. Poistoilmasäleikkö oli katossa. Mitattu ilmavirtaus tyhjässä huoneessa oli 50 L/s (1,5 L/s, m²). Leikkihuoneessa oli tyypillisesti 10-15 henkilöä.

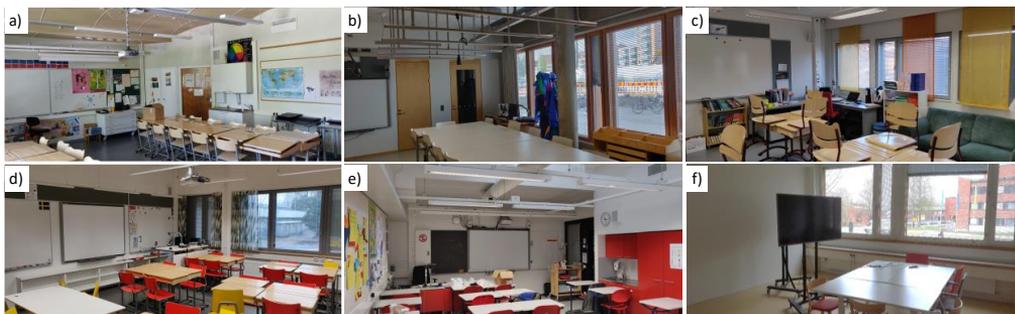
Päiväkoti 4 on rakennettu 2015. Leikkihuoneen (37 m²) käytäväseinällä oli vakioilmavirtainen sekoittava ilmanjakojärjestelmä (Kuva 12d). Tuloilman lämpötilan asetusarvot olivat välillä 22°C - 17°C poistoilman lämpötiloille 20°C-25°C. Suunniteltu tuloilmavirta oli 110 L/s (3 L/s, m²). Huoneessa oli tyypillisesti 10-20 henkilöä.

Päiväkoti 5 on rakennettu 2003. Leikkihuoneen (30 m²) käytäväseinällä oli vakioilmavirtainen sekoittava ilmanjakojärjestelmä (Kuva 12e), jossa oli tuloilman lämpötilan kaskadisäätö poistoilman lämpötilan perusteella. Muiden palvelualueiden ilmastointilaitteiden toiminta-aika oli lyhyempi kuin leikkihuoneessa. Suunniteltu tuloilmavirta oli 105 L/s (3,5 L/s, m²). Huonetilassa oli tyypillisesti 5-15 henkilöä. Taulukko 4 esittää tilojen testitapaukset ja ilmanvaihtojärjestelmän aikaohjelman. Päiväkodeissa 2 ja 3 ei yöllä pysäytettyä ilmanvaihtostrategiaa voitu käyttää, koska normaalistrategiana oli jatkuva toiminen ilmanvaihto.

Taulukko 4. Mitatut päiväkodit: "hlö" on tavanomainen ihmismäärä huoneessa, "lattia" on huoneen lattiapinta-ala, "CAVmax" on maksimi-ilmavirta vakioilmavirtaisessa järjestelmässä, ja "VAVmax" on maksimi-ilmavirta muuttuvailmavirtaisessa järjestelmässä.

Päiväkoti 1, leikkihuone	Ilmanvaihto (CAV)	Viikolla	Viikonloppuna
rakennettu: 2012	pysäytetty	05-18	-
CAVmax: 3 L/s, m ²	jatkuva	00-24	00-24
lattia: 21 m ² , hlö: 5-10	jaksottainen	05-18 + 20-22 + 01-03	02-05 + 10-13 + 18-21
Päiväkoti 2, leikkihuone	Ilmanvaihto (VAV)	Viikolla	Viikonloppuna
2014, 36m ² , 5-10 hlö	jatkuva min	00-24, yöllä min	00-24, min
VAVmax: 2.8 L/s, m ²	jatkuva max	00-24, yöllä max	00-24, max
Päiväkoti 3, leikkihuone	Ilmanvaihto (VAV)	Viikolla	Viikonloppuna
2013, 34m ² , 10-20 hlö	jatkuva	00-24	00-24
ylläpito: 1.5 L/s, m ²	päiväkoti on käytössä 24 h/vrk		
Päiväkoti 4, leikkihuone	Ilmanvaihto (CAV)	Viikolla	Viikonloppuna
rakennettu: 2015	pysäytetty	03:00-17:00	04:00-17:00
CAVmax: 3 L/s, m ²	jatkuva	00-24	00-24
lattia: 37 m ² , hlö: 10-20	jaksottainen	04-20 + 22-01	00-04 + 08-12 + 16-20
Päiväkoti 5, leikkihuone	Ilmanvaihto (CAV)	Viikolla	Viikonloppuna
rakennettu: 2003	pysäytetty	ma 04:30-21:00,	1h per päivä
CAVmax: 3.5 L/s, m ²		ti-pe 05:30-21:00	
lattia: 30 m ²	jatkuva	00-24	00-24
hlö: 5-15	jaksottainen	kuten pysäytetyssä+01-03	02-05+10-13+18-21

Kuva 13 esittää mitatut koulurakennukset.



Kuva 13. Mitatut koulurakennukset: a) ala-asteen luokka keväällä (koulu 1), b) ala-asteen luokka syksyllä (koulu 2), c) ala-asteen luokka syksyllä (koulu 3), d) ala-asteen luokka talvella (koulu 4), e) yläasteen luokka syksyllä, ja f) yliopistorakennuksen ryhmätyötila keväällä.

Koulu 1 on rakennettu vuonna 1953 ja remontoitu 2012. Ala-asteen luokkahuoneen (60 m²) käytäväseinällä oli sekoittava säleikköilmanjakojärjestelmä (Kuva 13a). Poistoilmaventtiilit olivat katossa opettajan pöydän läheisyydessä. Ilmanvaihdon ohjausasetus oli joko nopea (1/1), hidas (1/2) tai pysäytetty. Suunniteltu ilmavirta oli 180 L/s (3 L/s, m²). Luokassa oli yleensä 20-30 henkilöä.

Koulu 2 on rakennettu 2012. Ala-asteen luokkahuoneessa (87,5 m²) oli muuttuvilmavirtainen sekoittava ilmanvaihtojärjestelmä suutinkanavailmanjaolla (Kuva 13b), jota ohjattiin CO₂-, ilman lämpötila- tai läsnäoloantureilla. Poistoilmaventtiilit olivat kattoalueella huoneen toisella puolella. Suunniteltu maksimi-ilmavirta oli 305 L/s (3,5 L/s, m²). Minimi käytönaikainen ilmavirta oli 92 L/s ja ylläpitoilmavirta tyhjässä luokassa oli 44 L/s, mikä oli noin 14 % maksimi-ilmavirrasta. Luokassa oli tyypillisesti 20-30 henkilöä. Tässä kohteessa huonetta lämmitettiin tuloilmalla. Huoneen lämmityksen asetusarvo oli 21°C ja lämmitysilmän lämpötila oli 25-30°C.

Koulu 3 on rakennettu vuonna 2006 ja remontoitu 2012. Mitatussa ala-asteen luokkahuoneessa (65 m²) oli sekoittava vakioilmavirtainen ilmanvaihtojärjestelmä kattopäätelaitteilla (Kuva 13c). Poistoilmasäleiköt olivat myös katossa. Ilmanvaihtojärjestelmässä oli vakio kanavapainesäätö ja taajuusmuuttajakäyttöiset puhallinmoottorit. Tuloilmalle oli lämpötilan kaskadisäätö poistoilman lämpötilan perusteella. Ilmanvaihdon ohjausasetus oli joko nopea (1/1), hidas (1/2) tai pysäytetty. Suunniteltu ilmavirta oli 190 L/s eli noin 3 L/s, m². Huoneessa on tyypillisesti 20-30 henkilöä.

Koulu 4 on rakennettu 2013. Mitatussa ala-asteen luokkahuoneessa (40 m²) oli sekoittava muuttuvilmavirtainen ilmanjakojärjestelmä suutinkanavalla, joka oli pulpettien yläpuolella (Kuva 13d). Poistoilmasäleikkö oli käytäväseinällä. Tilan ylläpitoilanteessa ilmanvaihto toimi osateholla, jolloin tuloilmavirta oli luokkaa 85 L/s, kun taas maksimi-ilmavirta oli 120 L/s. Huoneessa oli tyypillisesti 10-20 henkilöä. Sisäilman lämpötilatavoite oli 21°C ja ilmanvaihtojärjestelmän CO₂-rajat olivat 700 ppm ja 900 ppm, jolloin ilmanvaihtoa säädettiin vaihteittain minimistä (700 ppm) maksimiin (900 ppm).

Yläaste on rakennettu vuonna 1975 ja remontoitu vuonna 2014. Luokkahuoneessa (42 m²) oli rei'itetty muuttuvilmavirtainen suutinkanavajärjestelmä (Kuva 13e). Poistoilmasäleikkö oli käytäväseinällä huoneen keskellä. Ilmanvaihtojärjestelmässä oli ilman lämpötila- ja CO₂ -säätö. Huoneilman tavoite-minimilämpötila oli 21°C. Hiilidioksidipitoisuuden raja-arvo oli 650 ppm, jonka jälkeen ilmanvaihto kasvoi asteittain 20 prosentista 100 prosenttiin. Suunniteltu maksimi-ilmavirta oli 150 L/s (3,6 L/s, m²). Luokassa oli yleensä 20-25 henkilöä.

Yliopistorakennus on rakennettu vuonna 1964 ja remontoitu vuonna 2015. Ryhmätyötilassa (39,5 m²) oli sekoittava muuttuvilmavirtainen ilmanjakojärjestelmä käytäväseinällä, jossa olivat myös poistoilmasäleiköt (Kuva 13f). Järjestelmässä oli kanaviston staattisen paineen säätö ja ilmanvaihdon tehostus erillisellä tulo/poisto-pääte-laiteparilla, johon oli liitetty auki tai kiinni oleva säätöpelti. Ilmanvaihdon ohjausparametrit olivat ilman lämpötila, CO₂-pitoisuus ja seinämäpainike ilmanvaihdon tehostukselle. Ilmanvaihdon normaali ilmavirta oli 80 L/s, joka on noin 2 L/s, m². Tehostetun ilmanvaihdon ilmavirta oli vastaavasti 160 L/s. Huoneessa oli tyypillisesti 3-5 henkilöä.

Taulukko 5 esittää mitattujen koulutilojen testitapaukset. Koulussa 2 ei voitu käyttää yöllä pysäytettyä olevaa ilmanvaihtoa, koska normaalikäytössä oli jatkuva ilmanvaihto.

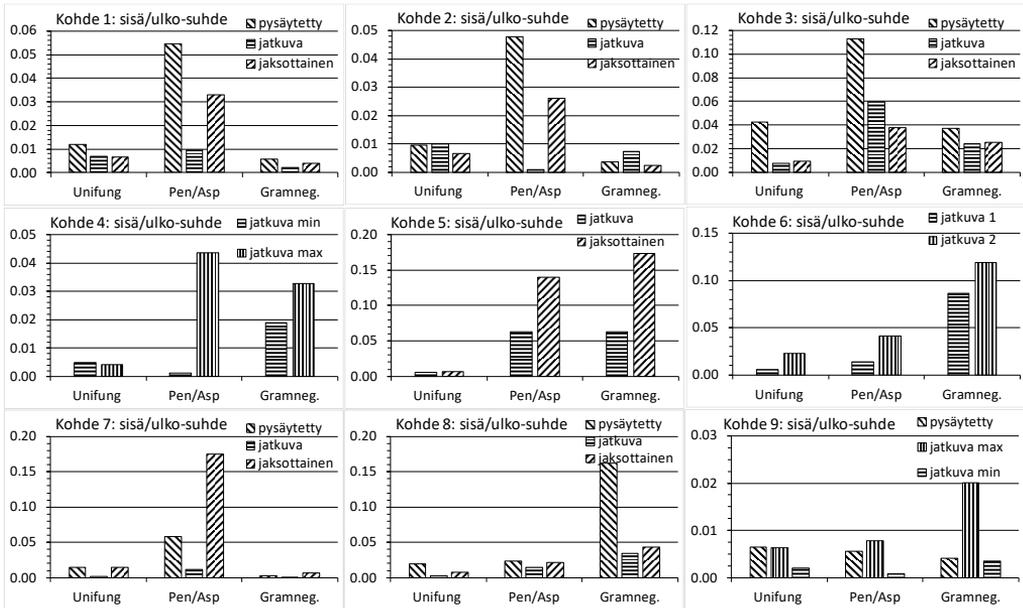
Taulukko 5. Mitatut koulurakennukset: "hlö" on tavanomainen ihmismäärä huoneessa, "lattia" on huoneen lattiapinta-ala, "CAVmax" on maksimi-ilmavirta vakioilmavirtaisessa järjestelmässä, ja "VAVmax" on vastaava maksimi-ilmavirta muuttuvilmavirtaisessa järjestelmässä.

Koulu 1, luokka	Ilmanvaihto (CAV)	Viikolla	Viikonloppuna
rak: 1953, rem: 2012	pysäytetty	ma-ti 05:30-20:00	06:00-18:00
CAVmax: 3 L/s,m ²		ke-pe 05:30-18:00	
lattia: 60 m ²	jatkuva max	00-24	00-24
hlö: 20-30	jatkuva min	kuten pys.+ yö ½-teho	kuten pys.+ yö ½-teho
Koulu 2, luokka	Ilmanvaihto (VAV)	Viikolla	Viikonloppuna
rakennettu: 2012	jatkuva	00-24	00-24
VAVmax: 3.5 L/s,m ²	jaksottainen	05-18 + 20-22 + 01-03,	02-05 + 10-13 + 18-21,
lattia: 87.5 m ² , hlö: 20-30		muu aika minimillä	muu aika minimillä
Koulu 3, luokka	Ilmanvaihto (CAV)	Viikolla	Viikonloppuna
rak: 2006, rem: 2012	pysäytetty	ma 05-18,	14-15
CAVmax.: 3 L/s,m ²		ti-pe 06-18	
lattia: 65 m ²	jatkuva	00-24	00-24
hlö: 20-30	jaksottainen	kuten pys.+20-22+01-03	02-05+10-13+18-21
Koulu 4, luokka	Ilmanvaihto (VAV)	Viikolla	Viikonloppuna
rakennettu: 2013	pysäytetty	ma 04-18, ti-pe 05-18	1h per d
VAVmax.: 3 L/s,m ²	jatkuva	00-24	00-24
lattia: 40 m ² , hlö: 10-20	jaksottainen	kuten pys. +20-22+00-02	02-05+10-13+18-21
Ylä-aste, luokka	Ilmanvaihto (VAV)	Viikolla	Viikonloppuna
rak: 1975, rem: 2014,	pysäytetty	ma 05-17 ti-pe 06-17	-
VAVmax: 3.6 L/s,m ²	jatkuva max	00-24, yöllä max	00-24, max
lattia: 42 m ² , hlö: 20-25	jatkuva min	00-24, yöllä min	00-24, min
Yliopisto, ryhmätyötila	Ilmanvaihto (VAV)	Viikolla	Viikonloppuna
rak: 1964, rem: 2015	pysäytetty	06-17	-
VAVmax: 4 L/s,m ²	jatkuva	00-24	00-24
lattia: 39.5 m ² , hlö: 3-5	jaksottainen	06-17 + 19-21 + 02-04	02-05 + 10-13 + 18-21

3.1.1 Mikrobiologinen analyysi

Kuva 14 esittää mikrobiologisista analyyseistä (qPCR) saatuja mikrobiryhmien tuloksia. Kuvaajissa laskeutuneen pölyn tuloksista on laskettu sisäilma/ulkoilma-suhde kullekin ilmanvaihdon käyttötavalle eri kohteissa. Useimmissa tapauksissa sisä/ulko-suhde oli vain muutaman prosentin luokkaa eli ulkonäytteiden pitoisuudet olivat huomattavasti suurempia kuin sisänäytteiden pitoisuudet. Mitatussa sisävyöhykkeen tilassa oli keskimäärin pienimmät sisä/ulko-suhteet. Suhde kasvoi muutamissa kohteissa yli 10 %:n, johon voi vaikuttaa mm. sisätilojen käyttö, ilmanvaihdon suodattimien kunto,

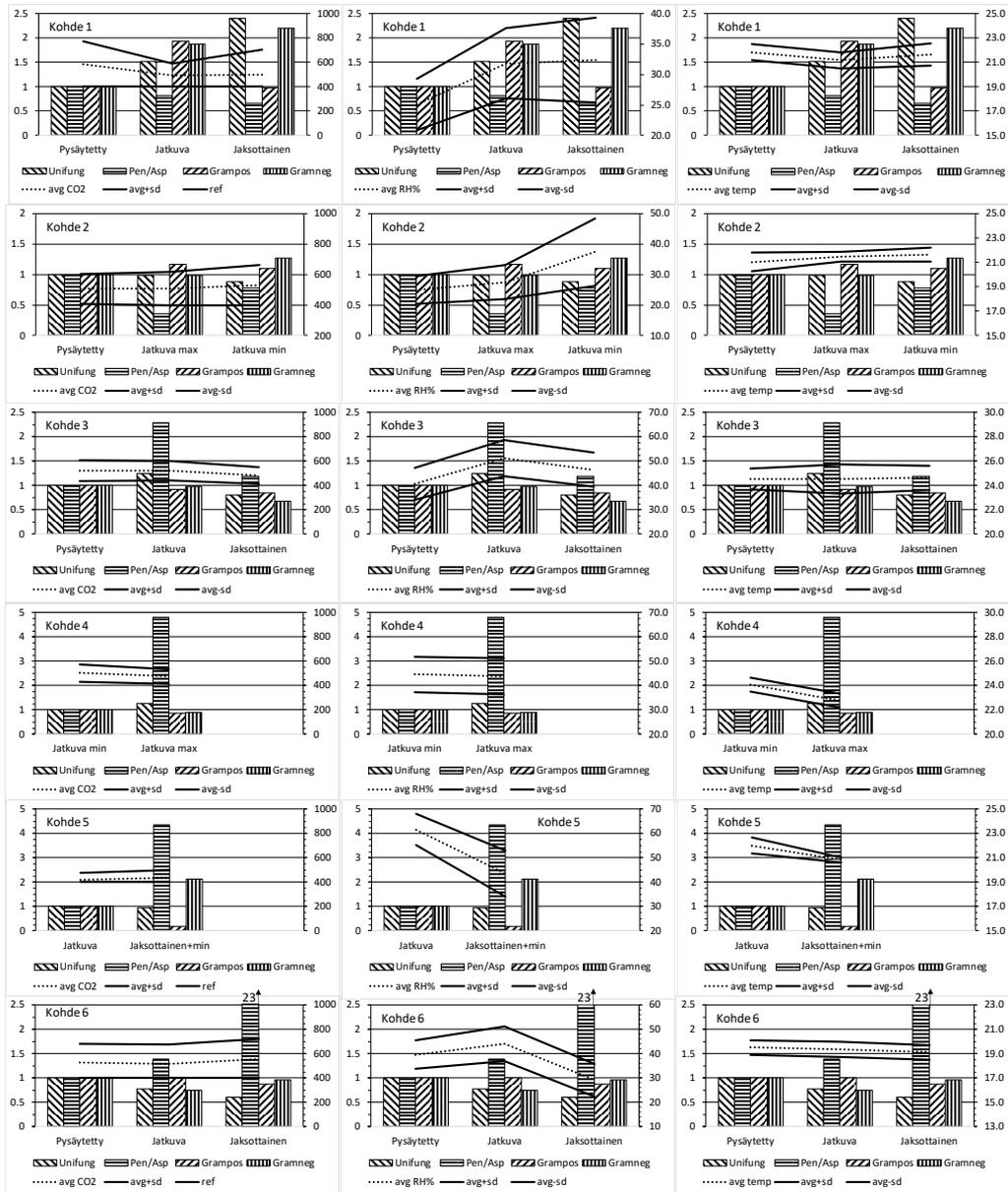
sisustusmateriaalit tai ikkunatuuletus rakennuksen ulkovyöhykkeellä. Rakennusten mikrobipitoisuuksien sisä/ulko –suhteet vaihtelivat todennäköisesti merkittävästi ulko- ja sisäolosuhteiden vaihtelun vuoksi, vaikka päivittäinen aktiivisuus on normaalilla tasolla mittausten aikana. Ulkoilman mikrobitasot vaihtelevat vuodenaikojen mukaan siten, että talvella pitoisuus on pienempi lumipeitteen takia. Sienien pääasiallisena lähteenä on normaalitilanteessa terveessä rakennuksessa ulkoilma, kun taas bakteerien normaalilähteenä ovat yleensä ihmiset ja ihmisten toiminta. Eri kohteiden mittauksissa sisä/ulko-suhteet olivat normaaleilla tasoilla, eikä systemaattisia vaikutuksia havaittu eri yöilmanvaihtostrategioiden välillä.



Kuva 14. Laskeutuneen pölyn mikrobianalyysistä saatu sisäilma/ulkoilma-suhde Kohde 1: yliopistorakennuksen ryhmätötila keväällä. Kohde 2: luokkatila keväällä (koulu 1). Kohde 3: leikkihuone kesällä (päiväkoti 1). Kohde 4: leikkihuone kesällä (päiväkoti 2). Kohde 5: luokkatila syksyllä (koulu 2). Kohde 6: leikkihuone syksyllä (päiväkoti 3), jossa molemmat testitapaukset ovat samanlaisia (mittaussuureiden luonnollisen vaihtelun tarkastelu). Kohde 7: luokkatila talvella (koulu 4). Kohde 8: leikkihuone syksyllä (päiväkoti 5). Kohde 9: luokkahuone syksyllä (yläaste, sisävyöhykkeen tila).

Kuva 15 esittää sisätilojen dimensiotonta mikrobipitoisuutta verrattuna keskimääräiseen CO₂-pitoisuuteen (keskiarvo ± sd), suhteelliseen kosteuteen ja ilman lämpötilaan, jotka on mitattu 1,1 metrin korkeudesta. Mikrobitulokset on normalisoitu yöllä pysäytetyn ilmanvaihdon tulosten suhteen, jotta muutosta eri testitapausten välillä saataisiin esille. Tulosten perusteella näillä parametreilla ei ollut systemaattista vaikutusta sisäilman mikrobipitoisuuden muutoksiin.

Kohteessa 6 jaksottaisen ilmanvaihdon Pen/Asp-sieniryhmän pitoisuus oli jopa 23-kertainen pysäytetyn ilmanvaihdon vastaavaan pitoisuuteen verrattuna, vaikka muissa ryhmissä oli havaittavissa vain maltillista muutosta. Yleisesti ottaen Pen/Asp-ryhmässä oli näissä kohteissa suurimmat yksittäiset muutokset. Tällöin esimerkiksi kohteissa 3 - 6 ilmanvaihdon jatkuva tai jaksottainen käyttö yleensä kasvattivat Pen/Asp-sienipitoisuutta. Näihin ei kuitenkaan sisäilman suhteellisen kosteuden tai lämpötilan keskimääräisillä muutoksilla näyttänyt olevan vaikutusta.



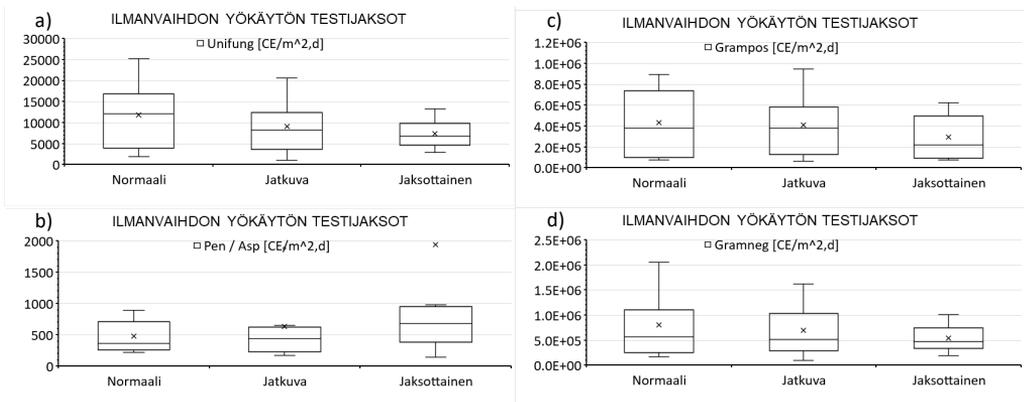
Kuva 15. Sisäilman dimensioton mikrobipitoisuus [-] suhteessa keskimääräiseen CO₂-pitoisuuteen [ppm], suhteelliseen kosteuteen [%] ja sisäilman lämpötilaan [°C] kahden viikon tarkastelujaksolla. Kohde 1 on yliopistorakennuksen ryhmätyötila keväällä, kohde 2 on luokkatila keväällä (koulu 1), kohde 3 on päiväkodin leikkihuone kesällä (päiväkoti 1), kohde 4 on päiväkodin leikkihuone kesällä (päiväkoti 2), kohde 5 on luokkatila syksyllä (koulu 2) ja kohde 6 on luokkatila syksyllä (koulu 3). "RH%" on suhteellinen kosteus (keskiarvo ± sd), "temp" on sisäilman lämpötila mitattuna 1,1 m:n korkeudelta ja "CO₂" on hiilidioksidipitoisuus arkipäivänä klo 8-16 mitattuna 1,1 m:n korkeudelta. Vasen pysty akseli on skaalattu mikrobipitoisuus ja oikea pysty akseli on verrattu mittaussuure. "ref" on hiilidioksidin taustapitoisuus (400 ppm).

Kuva 16 esittää laatikko-jana-kuviot kohteiden vertailukelpoisesta otannasta (n=6). Otokseen kuuluvat päiväkodit 1, 4 - 5 ja koulut 3 - 4 sekä yliopistorakennus. Kokonaissienipitoisuutta kuvaavassa "Unifung"-ryhmässä keskimääräinen pitoisuus laski 23 % ja keskihajonta 21 % jatkuvalla ilmanvaihdolla verrattuna pysäytettyyn ilmanvaihtoon. Lisäksi jaksottainen ilmanvaihto laski keskimääräistä Unifung-pitoisuutta 37 % ja keskihajontaa 57 % verrattuna pysäytettyyn ilmanvaihtoon. Tässä ryhmässä pysäytetty ilmanvaihto lisäsi sienten kokonaispitoisuutta verrattuna ilmanvaihdon jatkuvaan ja jaksottaiseen ilmanvaihdon käyttöön.

Sen sijaan Pen/Asp-homesieniryhmässä pienin keskimääräinen pitoisuus havaittiin, kun ilmanvaihtoa ei käytetty yöllä. Jatkuva ilmanvaihto lisäsi keskimääräistä Pen/Asp-pitoisuutta 31 % ja jaksottainen ilmanvaihto jopa moninkertaisti keskimääräisen pitoisuuden verrattuna pysäytettyyn ilmanvaihtoon, mutta tulokseen vaikutti yksi poikkeuksellisen suuri näyte. Tässä keskihajonta oli suunnilleen kaksi kertaa suurempi jatkuvalla ilmanvaihdolla kuin pysäytetyllä yöilmanvaihdolla. Pen/Asp-ryhmässä, pysäytetty ilmanvaihto puolestaan vähensi sienipitoisuutta verrattuna jatkuvaan tai jaksottaiseen ilmanvaihdon yökäyttöön.

Grampositiivisten bakteerien ryhmässä keskimääräinen pitoisuus laski 5 % ja keskihajonta 9 % jatkuvalla ilmanvaihdolla verrattuna yöllä pysäytettynä olevaan ilmanvaihtoon. Jaksottainen ilmanvaihdon käyttö laski keskimääräistä pitoisuutta 31 % ja keskihajontaa vastaavasti 35 %. Siten pysäytetty ilmanvaihto lisäsi hiukan bakteeripitoisuutta jatkuvaan ilmanvaihtoon verrattuna ja jopa huomattavasti jaksottaiseen yöilmanvaihtoon verrattuna. Gramnegatiivisten bakteerien ryhmän keskimääräinen pitoisuus laski 13 % ja keskihajonta 20 % jatkuvalla ilmanvaihdolla, verrattuna pysäytettyyn ilmanvaihtoon. Jaksottainen ilmanvaihto laski vastaavaa pitoisuutta 32 % ja keskihajontaa 57 %. Siten Gramneg-bakteerien tulokset korreloivat vastaavia Grampos-bakteerien tuloksia.

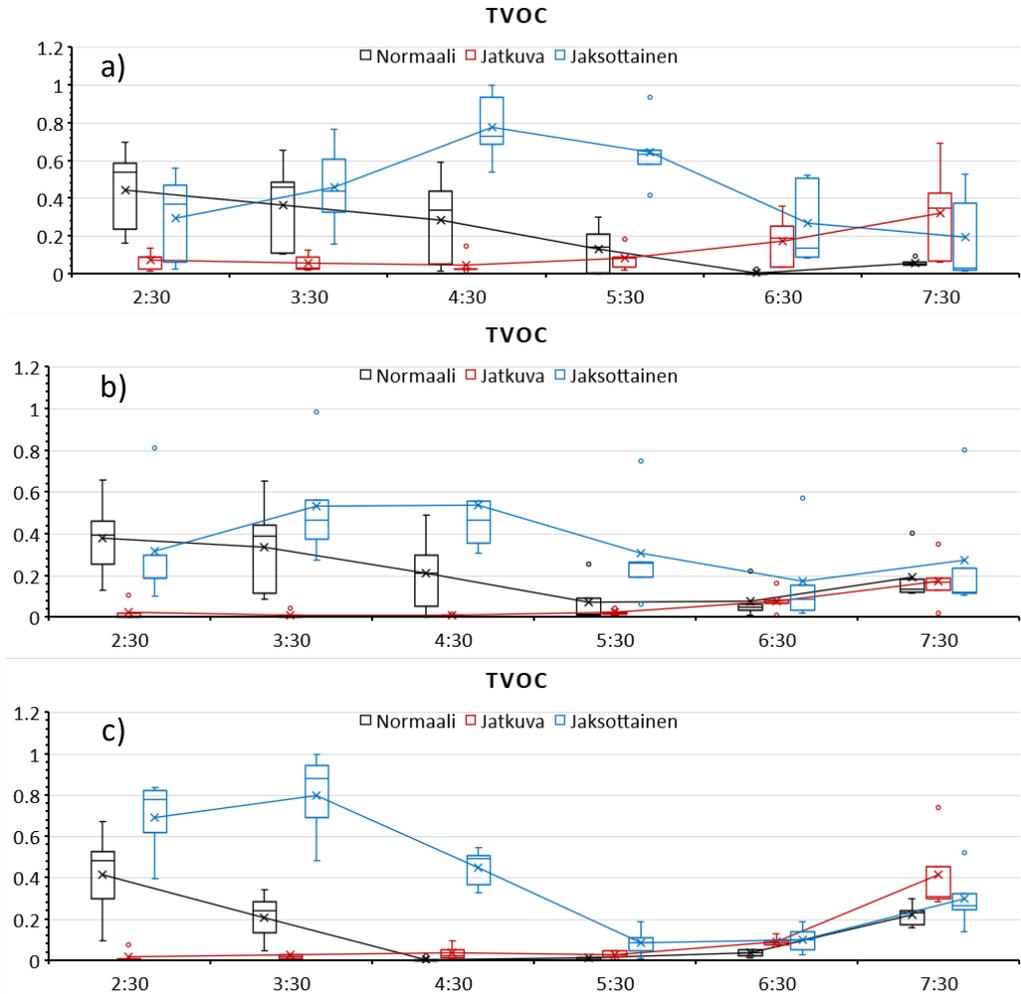
Tuloksissa ei ollut tilastollisesti merkittävää eroa. Yöilmanvaihdon jatkuva ja jaksottainen käyttö pienensi keskimääräistä bakteri- ja kokonaissienipitoisuutta sisäilmassa. Pen/Asp -ryhmässä pienin keskimääräinen pitoisuus havaittiin, kun ilmanvaihto oli yöllä pysäytettynä.



Kuva 16. Laskeutuneen pölyn näytteiden mikrobianalyysin qPCR-tulokset: a) kokonaissienipitoisuus, b) Penicillium/Aspergillus/Paecilomyces variotii -ryhmä, c) Grampositiiviset ja d) Gramnegatiiviset bakteerit. [CE/m²,d] on soluekvivalenttia neliometrille päivässä. Laatikko-janakuviot on laskettu Excelin quartile.inc funktiolla, jossa arvosarja jaetaan neljänneksiin. Poikkeavat arvot näkyvät yksittäisinä pisteinä ja keskiarvoa merkitään symbolilla x.

3.1.2 TVOC-pitoisuus

Kuva 17 esittää päiväkodin leikkihuoneen (syksy), koulun luokahuoneen (talvi) ja päiväkodin leikkihuoneen (talvi) TVOC-tuloksia arkaamuisin. Tulosten mukaan yöaikaisen ilmanvaihdon käytötavalla ei ole merkitystä aamutuntien ilman laatuun.



Kuva 17. Dimensioton TVOC-pitoisuus arkena aamuyöllä ennen tilojen käyttöä: a) päiväkotiki 5 syksyllä, b) koulu 4 talvella, c) päiväkotiki 4 talvella. "Normaali" = ilmanvaihto on pysäytetty yöksi. "Jatkuva" = ilmanvaihto on jatkuvasti käynnissä. "Jaksottainen" = ilmanvaihto on jaksottaisesti käynnissä. Laatikko-janakuviot on laskettu Excelin quartile.inc funktiolla. Viivakuvaaja yhdistää keskiarvoja, jotka on merkitty kuvaajaan symbolilla x.

Päiväkodissa (Kuva 17a) TVOC-pitoisuus oli aamulla klo 6-8 pienimmillään kun ilmanvaihto oli käynnistetty normaalisti 2 tuntia ennen tilojen käyttöä. Ilmanvaihdon jatkuvalla käytöllä TVOC-pitoisuus kasvoi suurimmaksi ja ilmanvaihdon jaksottaisella käytöllä taas TVOC-pitoisuuden vaihtelu oli suurinta. Koulussa (Kuva 17b) vastaava TVOC-pitoisuus oli pienimmillään, kun ilmanvaihtoa pidettiin jatkuvasti käynnissä. Tällöin myös TVOC-pitoisuuden vaihtelu oli pienintä. Suurin keskimääräinen TVOC-pitoisuus ja pitoisuuden vaihtelu oli ilmanvaihdon jaksottaisella käytöllä. Toisessa päiväkodissa (Kuva 17c) TVOC-pitoisuus oli vastaavasti pienimmillään ilmanvaihdon käynnistyttyä ennen tilojen

käyttöä. Tällöin myös TVOC-pitoisuuden vaihtelu oli pienintä. Suurin keskimääräinen TVOC-pitoisuus ja pitoisuuden vaihtelu muodostui tässä tapauksessa ilmanvaihdon jatkuvalla käytöllä. Tulosten perusteella päiväaikaisella tilassa tapahtuvalla toiminnalla oli suurin vaikutus sisäilman laatuun. Taulukko 6 esittää TVOC-pitoisuuksia eri tarkastelujaksoilta.

Taulukko 6. TVOC-pitoisuuksia. KA on keskiarvo ja SD on keskihajonta.

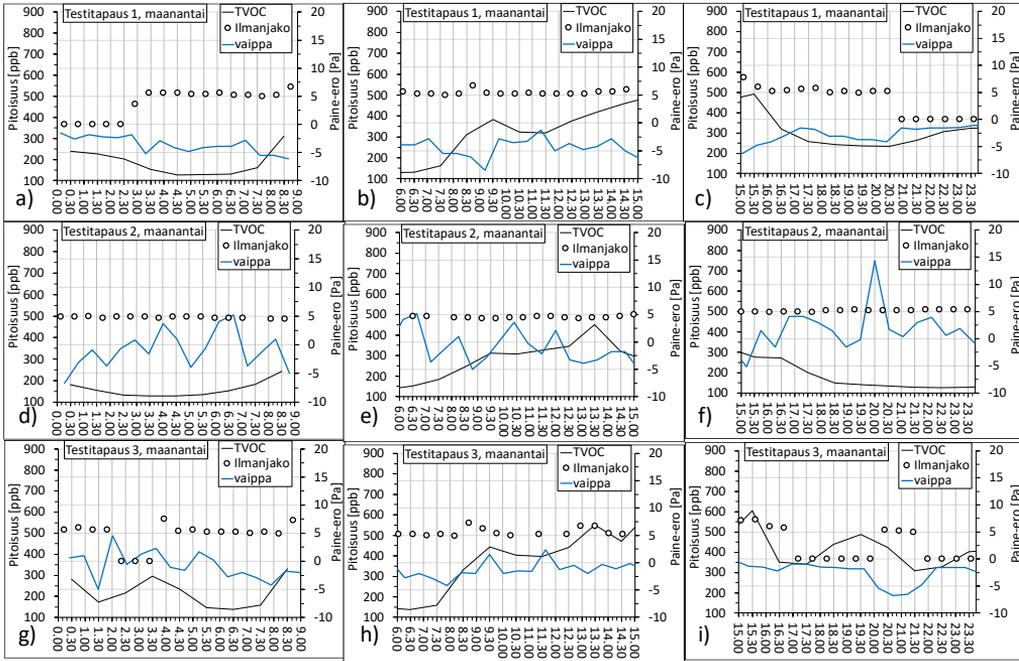
TVOC [ppb]	1 viikko (168 h)		arkipäivä klo 8-16		arkipäivä klo 6-8	
	KA	SD	KA	SD	KA	SD
Päiväkodin leikkihuone syksyllä (Kuva 17a)						
Pysäytetty	186	62	263	15	130	2,1
Jatkuva	180	87	317	70	154	23
Jaksottainen	212	92	311	53	153	27
Koulun luokkahuone talvella (Kuva 17b)						
Pysäytetty	238	85	330	96	167	31
Jatkuva	210	87	325	23	165	26
Jaksottainen	287	129	398	154	195	79
Päiväkodin leikkihuone talvella (Kuva 17c)						
Pysäytetty	223	75	222	14	177	12
Jatkuva	191	95	341	40	226	42
Jaksottainen	276	112	278	94	205	39

Jaksottaisella ilmanvaihdolla oli korkeammat yöajan TVOC-pitoisuudet kuin muilla käyttötavoilla, mutta ne kuitenkin pienivät aamulla samalle tasolle kuin muissa testitapauksissa. Jaksottaisen yöilmanvaihdon muita tapauksia suuremmat TVOC-pitoisuudet johtuvat todennäköisesti eri ilmanvaihtokoneiden palvelualueiden paine-eroista, joiden seurauksena epäpuhtauksia voi siirtyä tiloista toiseen. Ilmanvaihdon jatkuvalla käytöllä TVOC-pitoisuudet olivat yöllä pienimmällä tasolla, mutta pitoisuus kasvoi aamulla muiden testitapausten tavoin tilojen käytön alkaessa.

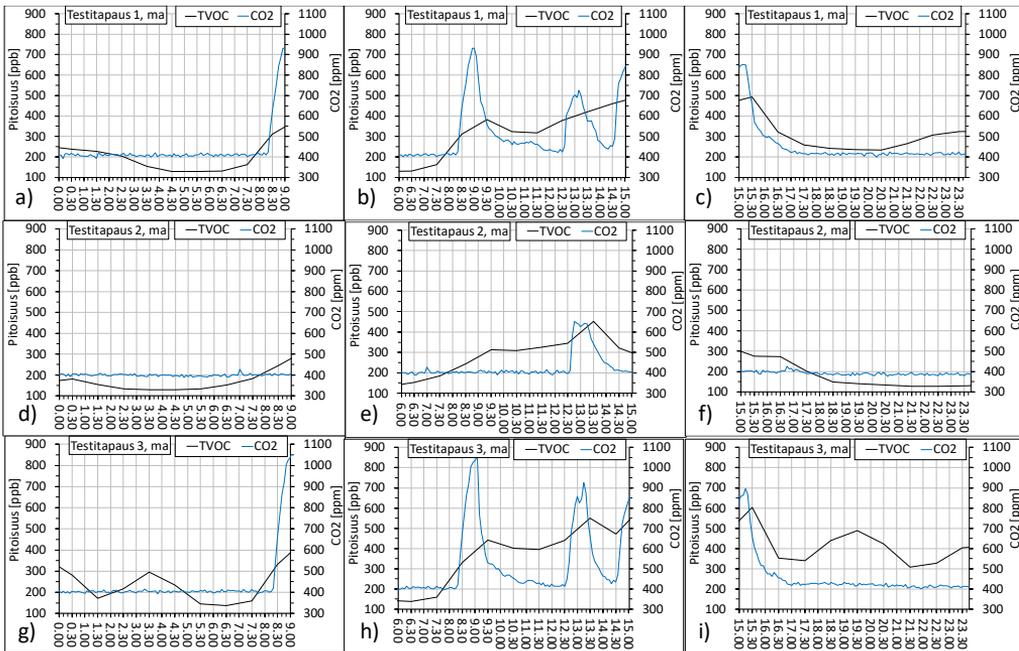
Tuloksissa on havaittavissa, että noin kahden tunnin ilmanvaihdon käyttö on riittävä pienentämään sisäilman TVOC-pitoisuudet kohdekohtaiselle minimitasolle ennen tilojen käyttöjakson alkua ja käyttöjaksojen jälkeen (Kuva 18). Tällöin yöaikaisella jatkuvalla ilmanvaihdolla ei saavuteta merkittävää hyötyä epäpuhtauksien poiston kannalta. Kohdekohtaiseen minimitasoon vaikuttaa moni tekijä, kuten rakennuksen sijainti, valitut rakennusmateriaalit sekä sääolosuhteet ja ilmanvaihdon palvelualueiden yhteistoiminta. Ilmanvaihdon ohjauksen tavoitteena on välttää suuria tilojen välisiä ja ulkovaipan paine-eroja, jotka saattavat aiheuttaa epäpuhtauksien leviämistä huoneilmaan.

3.1.3 Yhteenvedo yöilmanvaihdon vaikutuksesta

Johtopäätöksenä on, että yöilmanvaihtostrategian valinnalla ei ollut merkitystä arki-aamun TVOC-pitoisuuteen ja mikrobipitoisuuteen, jos ilmanvaihto oli käynnistetty nykysuosituksen mukaisesti 2 tuntia ennen tilojen käyttöä. Tarkasteltujen fyysikaalisten suureiden erot olivat yöilmanvaihdon normaalissa, jaksottaisessa ja jatkuvassa käytössä yleensä pienempiä kuin suureiden luonnollinen vaihtelu normaalin päiväkäytön aikana. Suurin vaikutus sisäilman laatuun oli päiväaikaisella tilojen käytöllä, joka nähdään tuloksissa siitä, että TVOC-pitoisuudet olivat keskimäärin suurempia päivällä kuin aamulla (Taulukko 6) ja siitä, että hiilidioksidipitoisuuden ja TVOC-pitoisuuden paikalliset ääriarvot olivat päivällä suurempia ja huippujen ajankohdat olivat samaan aikaan (Kuva 19).



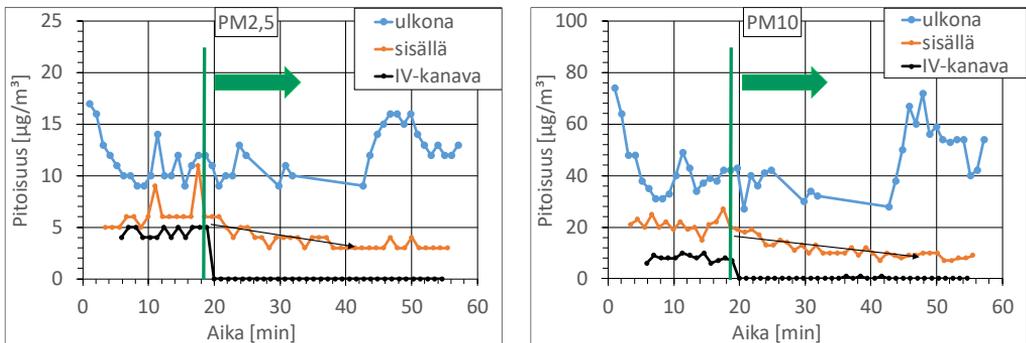
Kuva 18. TVOC-pitoisuus, ilmanjako ja rakennuksen vaippa-paine-ero maanantaina aamuyöllä, päivällä ja illalla (koulu 4, tammi-helmikuu): a)-c) ilmanvaihdon normaalikäyttö, d)-f) ilmanvaihdon jatkuva käyttö, g)-i) ilmanvaihdon jaksottainen käyttö.



Kuva 19. TVOC- ja hiilidioksidipitoisuus maanantaina aamuyöllä, päivällä ja illalla (koulu 4, tammi-helmikuu): a)-c) ilmanvaihdon normaalikäyttö, d)-f) ilmanvaihdon jatkuva käyttö, g)-i) ilmanvaihdon jaksottainen käyttö.

3.2 Ilmanvaihdon käynnistyksen vaikutus PM-pitoisuuteen

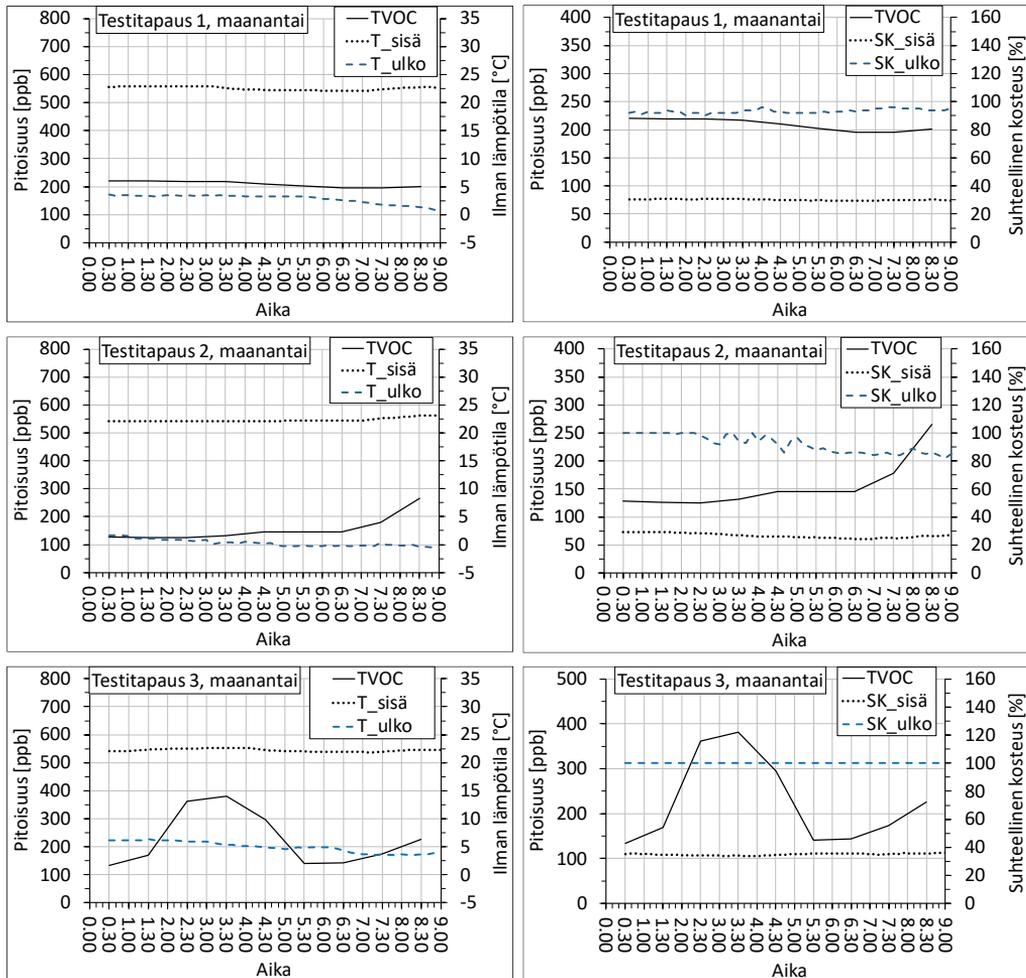
Mittaus tehtiin yhdessä kohteessa kartoittamaan ilmanvaihdon käynnistymisen vaikutusta sisäilman hiukkaspitoisuuteen. Olettamus oli, että ilmanvaihdon käynnistys aiheuttaa paineen nousun, joka voi siirtää kanavistosta hiukkasia huoneilmaan. Hiukkasmittauksessa havaittiin, että ilmanvaihdon käynnistyessä, kanavasta mitattu hiukkaspitoisuus lähestyi nopeasti nollaa ja huoneillassa mitattu PM10-pitoisuus pieneni puolessa tunnissa noin 20:stä $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 10:een $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ja PM2,5 vastaavasti 6:sta $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 3:een $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Kuva 20). Näin ollen mitatut pitoisuustasot laskivat PM10:llä ja PM2,5:llä keskimäärin 49 % ja 61 %. Hiukkasten pitoisuus oli pienempi sisätiloissa kuin ulkoilmassa, jolloin vastaavat sisäilma/ulkoilma-suhteet olivat 0,3 ja 0,2. Tulokset viittaavat siihen, ettei käynnistykseen aiheuttamaa hiukkaspölylähdystä ollut mittareissa havaittavissa ja tuloilman hiukkaspitoisuus laski varsin nopeasti ilmanvaihtokoneen käynnistyttyä.



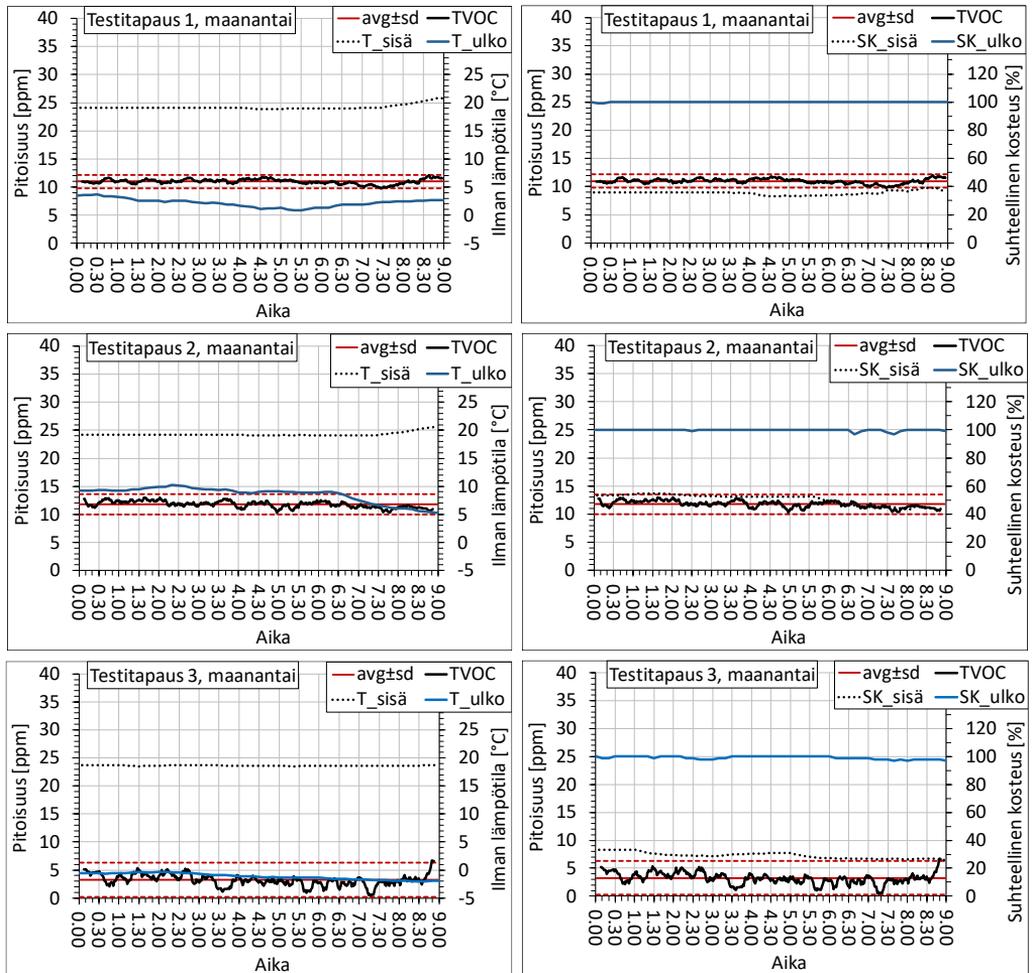
Kuva 20. Yliopistorakennuksen ryhmätyötilan hiukkaspitoisuus ilmanvaihtokoneen käynnistyessä. Pystyviiva ja nuoli osoittaa ilmanvaihdon käynnistystilanteen.

3.3 Yöilmanvaihdon vaikutus kosteusolosuhteisiin

Tässä luvussa huoneilman kosteusolosuhteiden vaihtelua esitetään kohteissa, jotka edustavat tehtyjen mittausten yleistä trendiä. Kosteusolosuhteita mitattiin kaikissa 11 kohteessa, josta tähän on valittu havainnolliset kuvaajat. Kuva 21 esittää aamutilannetta päiväkodissa 4 (tammi-helmikuu). Kuvaajista nähdään, että huoneilman lämpötila ja suhteellinen kosteus pysyvät melko tasaisina aamuyön tunteina. Vastaavat havainnot voidaan tehdä koululuokan 3 (loka-marraskuu) olosuhteista (Kuva 22).

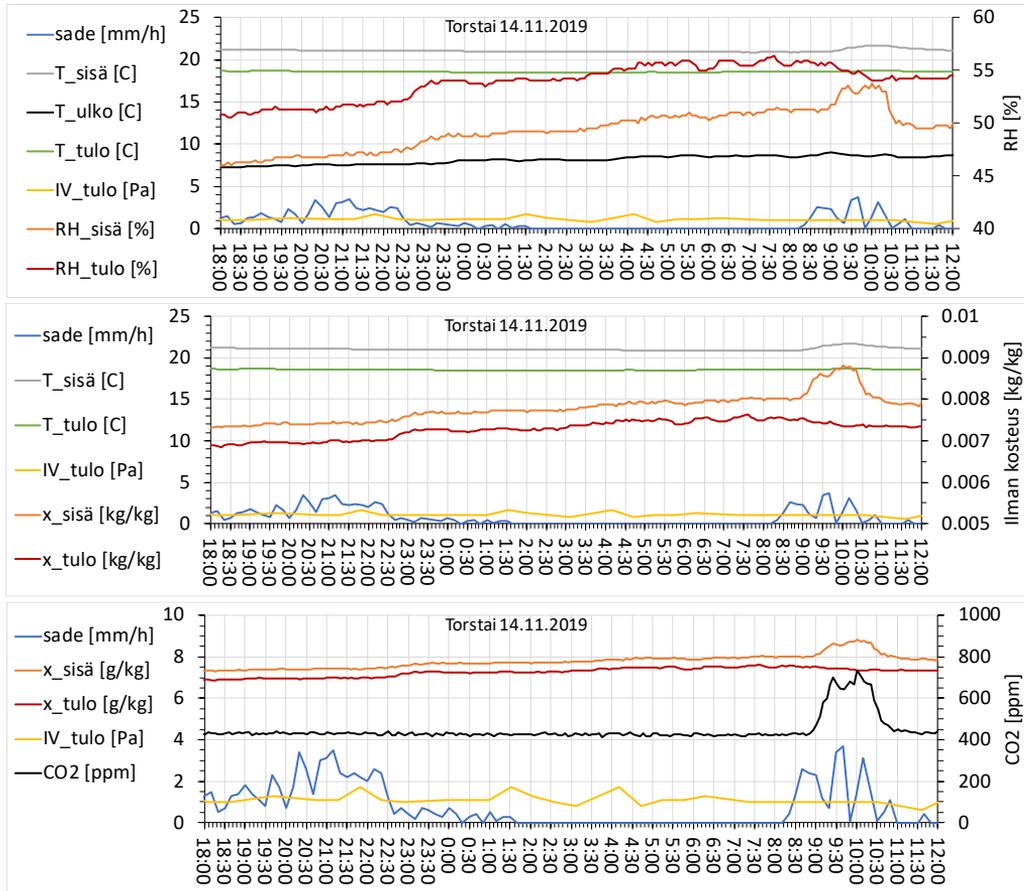


Kuva 21. Päiväkodin sisäilman ja ulkoilman kosteus eri testijaksolla (päiväkoti 4, tammi-helmikuu). T_{sisä} on sisäilman lämpötila, T_{ulko} on ulkoilman lämpötila, SK_{sisä} on sisäilman suhteellinen kosteus, SK_{ulko} on ulkoilman suhteellinen kosteus (Ilmatieteen laitos). TVOC on tolueeniekvivalentin TVOC-pitoisuuden muutos huonetilassa.

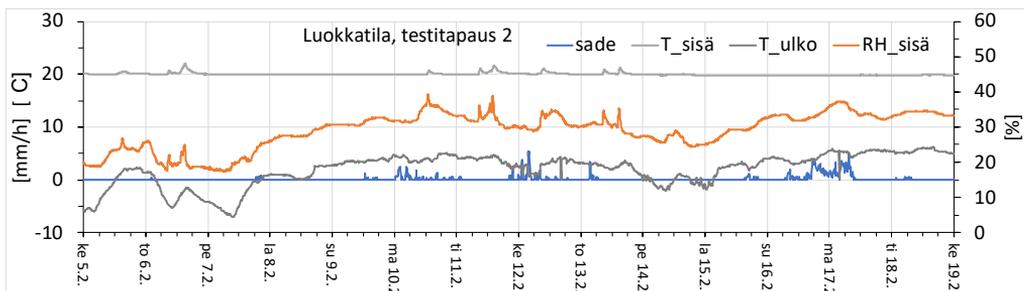


Kuva 22. Koulun sisäilman ja ulkoilman kosteus eri testijaksoilla (Koulu 3, loka-marraskuu). T_sisä on sisäilman lämpötila, T_ulko on ulkoilman lämpötila, SK_sisä on sisäilman suhteellinen kosteus, SK_ulko on ulkoilman suhteellinen kosteus (Ilmatieteen laitos). TVOC on tolueeniekvivalentin TVOC-pitoisuuden muutos huonetilassa.

Kuva 23 esittää sadejakson vaikutusta huonetilassa (päiväkoti 3, marraskuu). Illalla sateen jälkeen huonetilan kosteus ei nouse, mutta aamulla kosteus nousee hetkellisesti. Tämä johtuu mitä todennäköisimmin tilojen käyttäjien kosteustuotosta eikä edellisen päivän aikana tulleesta ulkoilman kosteudesta. Tilakäyttäjät näkyvät kuvaajassa CO₂-pitoisuutena [ppm]. Mittauksien aikana suhteellinen kosteus noudattelee ulkoilman lämpötilan trendiä, koska sisätilan lämpötila pysyy vakaana ja tilojen käyttö ei nosta merkittävästi kosteustasoja (Kuva 24).

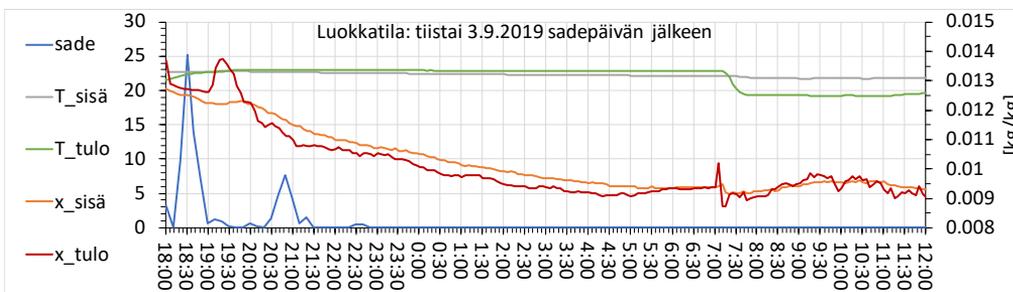


Kuva 23. Sadejakson vaikutus huoneilmaan (päiväkoti 3, marraskuu): sade on sateen intensiteetti (ilmatieteen laitos), T_sisä [°C] on sisäilman lämpötila, T_ulko [°C] on ulkoilman lämpötila, T_tulo [°C] on tuloilman lämpötila, IV_tulo [Pa] on ilmanjaon päätelaitteen toiminta, RH_sisä [%] on sisäilman suhteellinen kosteus, RH_tulo [%] on tuloilman suhteellinen kosteus, x_sisä [kg/kg] on sisäilman kosteussisältö ja x_tulo [kg/kg] on tuloilman kosteussisältö. Vasemmalla pystyakselilla on kaikki muut suureet paitsi oikealla pystyakselilla oleva suure. Vaakasuuralla akselilla on kellonaika.



Kuva 24. Ulkolämpötila ja sisäilman suhteellinen kosteus: sade on sateen intensiteetti (ilmatieteen laitos), T_sisä [°C] on sisäilman lämpötila, T_ulko [°C] on ulkoilman lämpötila ja RH_sisä [%] on sisäilman suhteellinen kosteus (Koulu 4).

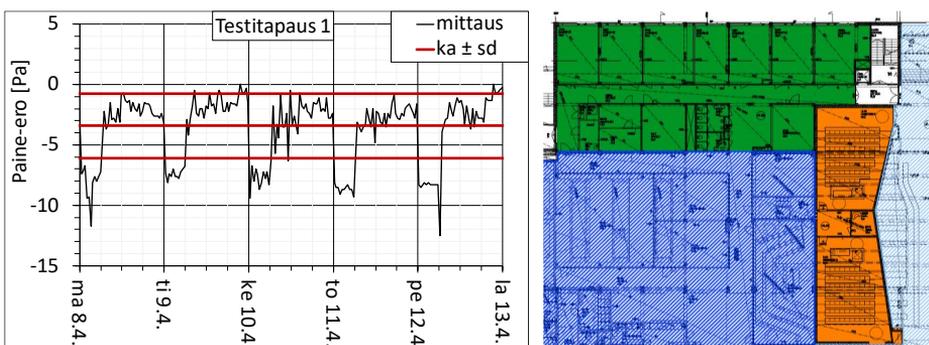
Kuva 25 esittää sadepäivän jälkeistä tilannetta luokkatilassa (Koulu 2, elo-syyskuu). Kuvaajasta nähdään, että sateen jälkeen tuloilman kosteus nousee hetkellisesti. Huoneilman kosteus ei kuitenkaan nouse vaan laskee yön aikana tuloilman kosteuden mukaisesti. Kun ilmanvaihto käynnistyy aamulla, tuloilman kosteudessa on hetkellinen piikki, jolla ei ole merkittävää vaikutusta sisäilman kosteusolosuhteisiin. Tulokset viittaavat siihen, että sadejakson vaikutus on vähäinen mitatuissa huonetiloissa ja kosteusolosuhteet vaihtelevat normaalisti.



Kuva 25. Ulkolämpötila ja sisäilman suhteellinen kosteus. Yöaikainen ylläpitoilmavirran asetus oli noin 14% päiväaikaisesta maksimi-ilmavirrasta (Koulu 2, elo-syyskuu). Vasemmalla pystyakselilla on kaikki muut suureet paitsi oikealla pystyakselilla oleva suure (ilman kosteus). Vaakasuoralla akselilla on kellonaika.

3.4 Ilmanvaihdon käyntiajan vaikutus vaipan paine-eroon

Kuva 26 esittää ilmanvaihtolaitteen pysäytyksen vaikutusta sisäilman ja ulkoilman väliseen paine-eroon rakennuksen ulkovaipan yli. Kuvasta nähdään systemaattinen muutos paine-erossa, kun ilmanvaihtokone pysäytetään. Tähän on todennäköisesti synnä jonkin toisen palvelualueen ilmavirtojen tasapainoon liittyvä vaikutus tai sitten WC-poistot, jotka ovat toiminnassa 24 h/vrk. Päivällä paine-ero oli maltillinen (alle 5 Pa), mutta ilmanvaihtokoneen pysähtyessä paine-ero kasvoi hetkellisesti yli 10 Pascalin. Yleisesti ottaen kaikissa mitatuissa kohteissa paine-erot olivat maltillisia ja pysyttelivät pääsääntöisesti alle 10 Pascalin.



Kuva 26. Rakennuksen ulkovaipan paine-ero ja erilaiset palvelualueet. Mitattu tila on ulkovyöhykkeen palvelualueella kuvassa ylhäällä. Kuvaajan pystyakselilla on paine-ero [Pa] ja vaaka-akselilla on mittauksen ajankohta.

4. Lämpöolojen ja ilman laadun sisäilmastokysely

Sisäilmaston kyselylomake on esitetty Liitteessä I. Sisäilmastokyselyn kysymyksissä oli pääsääntöisesti 7-kohtainen portaaton asteikko, joka oli numeroitu vaihteluvälillä -3...3. Huoneilman hajun voimakkuutta havainnoiva 5-kohtain portaaton asteikko oli numeroitu vaihteluvälillä 0...5 ja ilman laadun hyväksyttävyyttä kartoitettiin 8-kohtaisella portaattomalla asteikolla, jonka vaihteluväli oli -3...-0.01 ja 0.01...3. Lopuksi kysyttiin, halusiko tilakäyttäjä lisätä ilmanvaihtoa, jossa vaihtoehdot olivat kyllä tai ei, sekä kommenttikenttä vastauksen perustelulle. Sisäilmastokyselyn asteikot perustuivat soveltuvin osin eurooppalaiseen standardiin EN 15251:2007 (CEN, 2007).

4.1 Yliopistorakennuksen ryhmätyötilat

Kysely tehtiin yliopistorakennuksen ulkovyöhykkeen ryhmätyötiloissa 4.4.2019-16.5.2019. Kyselyyn vastaajia oli yhteensä 51 kpl ja näistä 47 % oli naisia ja 53 % miehiä, ikäjakauman ollessa 19-49 vuotta. Vastaajat olivat satunnaisesti tilassa olevia henkilöitä, jotka vastasivat paperilla oleviin kysymyksiin. Testijaksojen aikana mitattiin yhden ryhmätyötilan ilman laatua ja lämpöolosuhteita.

4.1.1 Huoneen lämpöolot

Huoneen lämpöoloja kartoittavia kysymyksiä olivat:

K1. Miten arvioisit huoneen lämpötilaa? (7-kohtainen kylmästä kuumaan muuttuva asteikko vaihteluvälillä -3...3).

K2. Pitäisikö huoneen lämpötilaa laskea tai nostaa? (7-kohtainen laskea tai nostaa asteikko vaihteluvälillä -3...3).

K3. Aistitko ilman liikkeen miellyttävänä vai epämiellyttävänä vedon tunteena? (7-kohtainen asteikko epämiellyttävästä miellyttävään vaihteluvälillä -3...3).

K6. Onko huoneilma kuivaa vai kosteaa? (7-kohtainen asteikko kuivasta kosteaan tuntemukseen vaihteluvälillä -3...3).

Lämpöoloihin liittyvät vapaamuotoiset kommentit

Taulukko 7 esittää ryhmätyötilojen lämpöoloja kartoittaneiden kysymysten tulokset ilmanvaihdon normaalikäytöllä, jolloin yöilmanvaihto oli pysäytetty.

Taulukko 7. Yliopistorakennuksen ulkovyöhykkeen ryhmätyötilojen käyttöajan lämpöoloja kartoittaneet kysymykset, kun yöilmanvaihto on pysäytetty. Mittaustuloksia kuvaajassa (Kuva 15, Kohde 1).

Pysäytetty yöilmanvaihto	K1 (lämpötila)	K2 (muutos)	K3 (ilman liike)	K6 (kosteus)
	[-3...3]	[-3...3]	[-3...3]	[-3...3]
keskiarvo	0,4	-0,3	0,0	-0,7
min.	-2,5	-3,0	-3,0	-3,0
max.	3,0	2,0	3,0	3,0
keskihajonta	1,3	1,2	1,2	1,2

Kysymys 1 (K1) käsitteli huonelämpötilan tuntemusta. 42 % vastaajista piti huonelämpötilaa lämpimänä ja 33 % viileänä. 24 % prosenttia vastaajista tunsu huonelämpötilan neutraalina. Tulosten perusteella tilakäyttäjien keskimääräinen lämpötuntemus oli kvantitatiivisesti $0,4 \pm 1,3$ (ka±sd), joka tarkoittaa sitä, että huonelämpötila oli keskimäärin vain hiukan lämmin. Tulos viittaa siihen, että lämpötila koettiin kohtuullisen hyvänä.

Kysymys 2 kartoitti tilakäyttäjän tarvetta nostaa tai laskea huoneen lämpötilaa. 27 % vastaajista olisi halunnut nostaa huonelämpötilaa ja 42 % laskea. 30 % vastaajista piti sen hetkistä huonelämpötilaa sopivana. Tulosten perusteella tilakäyttäjien keskimääräinen tuntemus oli $-0,3 \pm 1,2$ mikä korreloi loogisesti edellistä kysymystä siinä, että huonelämpötilaa haluttiin hiukan laskea. Vapaamuotoisessa kommenttikentässä viitattiin yhdessä vastauksessa siihen, että huoneessa voisi olla myös lämpötilan säätömahdollisuus.

Kysymys 3 käsitteli ilman liikkeen vaikutusta lämpötuntemukseen. 33 % vastaajista piti ilman liikettä miellyttävänä tunteena ja 48 % epämiellyttävänä vedon tunteena. 18 % vastaajista piti ilman liikkeen sen hetkistä vaikutusta neutraalina. Tulosten perusteella tilakäyttäjien keskimääräinen ilman liikkeen tuntemus oli neutraali keskihajonnalla $1,2$ ($0,0 \pm 1,2$). Noin puolet vastaajista kuitenkin koki huoneessa vedon tunnetta, joka voi johtua esimerkiksi sekoittavan ilmanjaon ilmasuihkujen vaikutuksesta.

Kysymys 6 kartoitti huoneilman kosteuden tunnetta. 10 % vastaajista piti huoneilmaa kosteana ja 72 % kuivana. 17 % piti huoneilman kosteutta neutraalina. Tulosten perusteella tilakäyttäjien keskimääräinen kvantitatiivinen kosteuden tunne oli $-0,7 \pm 1,2$, joten tulokset viittaavat siihen, että huoneilma oli vähän kuivaa. Sisäilman suhteellinen kosteus muuttuu ylläpitotilanteessa ulkoilman lämpötilan ja kosteuden muuttuessa ja ilmanvaihdon tehokkuudella saadaan poistettua tilakäytön aiheuttama ylimääräinen kosteuskuorma.

Merkittävää vastauksissa oli, että jopa 80 % kyselyyn vastanneista olisi halunnut lisätä ilmanvaihtoa normaalisti käytössä olevalla ilmanvaihtostrategialla. Näistä huoneilman lämpötilaan viittasi noin 40 % kommenttikenttään vastanneista ja ilman laatuun noin 95 % vastanneista, joten osa vastaajista viittasi näihin molempiin tekijöihin.

Taulukko 8 esittää ryhmätyötilojen lämpöoloja kartoittaneiden kysymysten tulokset jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla.

Taulukko 8. Yliopistorakennuksen ulkovyöhykkeen ryhmätyötilojen lämpöoloja kartoittaneet kysymykset jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Mittaustuloksia kuvaajassa (Kuva 15, Kohde 1).

Jaksottainen yöilmanvaihto	K1 (lämpötila)	K2 (muutos)	K3 (ilman liike)	K6 (kosteus)
	[-3...3]	[-3...3]	[-3...3]	[-3...3]
keskiarvo	-0,4	0,2	0,7	-0,1
min.	-2,3	-1,0	-1,0	-1,0
max.	1,0	2,1	2,1	1,0
keskihajonta	0,8	0,8	1,0	0,5

Kysymyksen 1 vastaajista 13 % piti huonelämpötilaa lämpimänä ja 47 % viileänä. 40 % prosenttia vastaajista koki huonelämpötilan neutraalina. Näin ollen jaksottaisella ilmanvaihdolla suurempi osa koki huonelämpötilan neutraalina ja pienempi osa lämpimänä kuin pysäytetyn yöilmanvaihdon tapauksessa. Tähän ei löytynyt selittävää syytä. Sisäilman ja ulkoilman lämpöolot olivat kuitenkin keskimäärin samalla tasolla molemmilla yöilmanvaihdon käyttötavoilla. Kysymyksessä 1 tilakäyttäjien keskimääräinen lämpötuntemus oli kvantitatiivisesti jaksottaisella testijaksolla $-0,4 \pm 0,8$ (ka±sd), joka oli samaa suuruusluokkaa, mutta vastakkaismerkkinen kuin pysäytetyllä yöilmanvaihdolla. Tulosten perusteella huonelämpötilaa voisi jonkin verran nostaa, mutta toisaalta suuri osa vastaajista piti lämpötuntemusta neutraalina.

Kysymyksen 2 vastaajista 27 % olisi halunnut nostaa huonelämpötilaa ja 27 % laskea. Siten 46 % vastaajista koki sen hetkisen huonelämpötilan sopivana. Tuloksissa tilakäyttäjien keskimääräinen tuntemus oli $0,2 \pm 0,8$ mikä korreloi edellistä kysymystä siinä, että huonelämpötilaa voisi vähän nostaa. Tulosten perusteella suurempi osa vastaajista tunsu huonelämpötilan sopivana jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla kuin pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla.

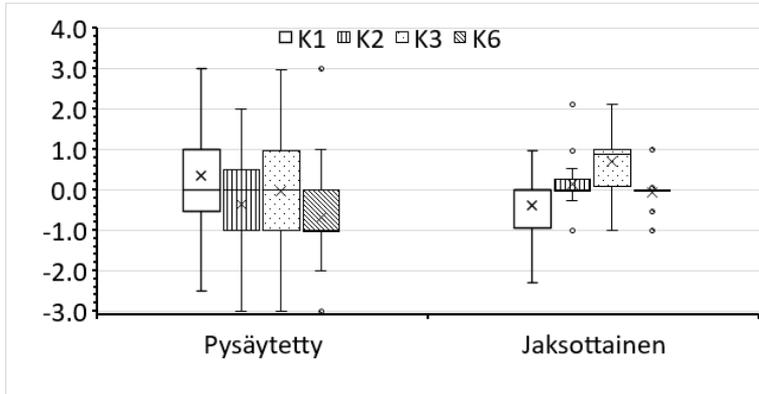
Kysymyksen 3 vastaajista 73 % piti ilman liikettä miellyttävänä ja vain 13 % epämiellyttävänä vedon tunteena. 13 % vastaajista koki sen hetkisen ilman liikkeen neutraalina tai ei tuntenut ilman liikettä. Tilakäyttäjien keskimääräinen tuntemus oli $0,7 \pm 1,0$, jolloin tulokset viittaavat siihen, että tilakäyttäjät kokivat ilman liikkeen vähän miellyttävänä tuntemuksena. Tulosten perusteella jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla suurempi osa vastaajista koki ilman liikkeen miellyttävänä kuin pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla. Tähän ei kuitenkaan todennäköisesti vaikuta yöilmanvaihto, koska huoneilma vaihtuu tilan käyttöilmanvaihdolla monta kertaa tunnissa. Siten tuloksissa näkyvät mitä todennäköisimmin tilakäyttäjien yksilölliset lämpötuntemukset.

Kysymyksen 6 vastaajista 20 % piti huoneilmaa kosteana ja 30 % kuivana, ja jopa 50 % piti huoneilman kosteutta neutraalina. Tilakäyttäjien mielestä keskimääräinen ilman kosteuden tunne oli $-0,1 \pm 0,5$, joten huoneilma oli tilakäyttäjien mielestä neutraalimpaa yöilmanvaihdon jaksottaisen käytön testijaksolla kuin pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla, jossa huoneilma koettiin vähän kuivaksi. Kyselyn tulos on looginen verrattuna huoneilman kosteuden mittauksiin, sillä mitatun huoneilman suhteellinen kosteus oli korkeammalla tasolla yöilmanvaihdon jaksottaisen käytön testijaksolla kuin pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla.

Merkittävää jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksossa oli, että 73 % vastanneista piti ilmanvaihtoa sopivana, kun taas pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla jopa 80 % olisi halunnut lisää ilmanvaihtoa. Kaiken kaikkiaan ryhmätyötilojen lämpöolot olivat testijaksolla keskimäärin hyvällä tasolla, mutta melko suuri osa vastaajista olisi halunnut lisää ilmanvaihtoa. Vastauksiin voi vaikuttaa tilakäyttäjien toiminta ja ulkoilman sääolosuhteet, sekä se mitä tilakäyttäjät ovat tehneet ja kokeneet ennen kysymyksiin vastaamista. Vastauksiin saattaa vaikuttaa myös vastaajien yksilöllinen käsitys kysymyksistä ja niiden merkityksestä verrattuna omaan tuntemukseen. Tuloksiin voi vaikuttaa myös

jonkin verran se, että ihmiset saattaisivat ehkä mieluummin käyttää aikaa kyselylomakkeeseen, jos olosuhteissa on jotain valittamista.

Kuva 27 esittää kootusti lämpöoloihin liittyvien kysymyksiä kvantitatiiviset tulokset pysäytetyllä ja jaksottaisella yöilmanvaihdolla. Tuloksista nähdään, että vastaajia ja hajontaa oli enemmän pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla (vasen) kuin jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla (oikea). Tulosten perusteella lämpöolot olivat keskimäärin normaalilla tasolla (-1...1).



Kuva 27. Yliopistorakennuksen ryhmätyötilojen sisäilmastokyselyn lämpöoloihin liittyvät tulokset pysäytetyn ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Kysymysjärjestys K1...K6 on kuvaajassa vasemmalta oikealle.

Jatkuvan ilmanvaihdon testijaksolla vastausten määrä oli vain 3, joista kaksi piti huonelämpötilaa viileänä, haluten nostaa huonelämpötilaa. Yksi vastaajista piti huoneilmaa lämpimänä, mutta ei kuitenkaan halunnut laskea huonelämpötilaa. Yksi vastaaja piti huoneilman liikettä miellyttävänä, yksi epämiellyttävänä ja yksi tunsu ilman liikkeen neutraalina tuntemuksena. Vastaajista kaksi tunsu huoneilman kuivana ja yksi neutraalina.

4.1.2 Huoneilman laatu

Huoneilman laatua kartoittavia kysymyksiä olivat:

K4. Tuntuuko huoneilma tunkkaiselta vai raikkaalta? (7-kohtainen tunkkaisesta raikkaaseen muuttuva asteikko vaihteluvälillä -3...3).

K5. Onko huoneilma hajutonta? (6-kohtainen hajun voimakkuutta kuvaava asteikko vaihteluvälillä 0...5).

K7. Tuntuuko huoneilma puhtaalta hengittää? (7-kohtainen asteikko vaihteluvälillä -3...3, jossa vastaavat ääriarvojen vastineet olivat "voimakas ei" ja "voimakas kyllä").

K8. Onko huoneilman laatu tällä hetkellä mielestäsi hyväksyttävä? (8-kohtainen asteikko vaihteluvälillä -3...-0.01 ja 0.01...3, joiden vastaavat sanalliset vastineet olivat negatiivisessa koordinaatistossa "selvästi ei hyväksyttävä" ja "ei ihan hyväksyttävä" ja positiivisessa koordinaatistossa "juuri hyväksyttävä" ja "selvästi hyväksyttävä").

K9. Tekeekö mielesi tehostaa ilmanvaihtoa? (kyllä tai ei, sekä perustelu miksi)

Huoneilman laatuun liittyvät vapaamuotoiset kommentit

Taulukko 9 esittää ryhmätyötilojen huoneilman laatua kartoittaneet kysymykset pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla.

Taulukko 9. Yliopistorakennuksen ulkovyöhykkeen ryhmätyötilojen huoneilman laatua kartoittaneet kysymykset pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla. Mittaustuloksia kuvaajassa (Kuva 15, Kohde 1).

Pysäytetty yöilmanvaihto	K4 (raikkaus)	K5 (haju)	K7 (puhtaus)	K8 (hyväksyttävyyys)
	[-3...3]	[0...5]	[-3...3]	[-3...-0,01; 0,01...3]
keskiarvo	-0,8	1,1	0,0	0,3
min.	-3,0	0,0	-3,0	-3,0
max.	3,0	5,0	3,0	3,0
keskihajonta	1,7	1,3	1,7	1,8

Kysymys 4 käsitteli huoneilman tunkkaisuutta ja raikkautta. Vastaajista 24 % piti huoneilmaa raikkaana ja 67 % tunkkaisena. 9 % prosenttia vastaajista koki, että huoneilma oli neutraali. Tilakäyttäjien keskimääräinen tuntemus oli kvantitatiivisesti $-0,8 \pm 1,7$ ($ka \pm sd$), joten tilakäyttäjien mielestä huoneilma oli keskimäärin hieman tunkkainen. Tulos voi johtua tilakäytön aiheuttamista epäpuhtauspitoisuuksista huoneilmassa. Ryhmätyötilan mittaustuloksissa olosuhteet ovat testijaksolla normaalilla vaihteluvälillä (Kuva 15, Kohde 1).

Kysymys 5 kartoitti huoneilmassa olevan hajun voimakkuutta. Vastaajista 67 % koki, että haju oli mieto ja kohtuullista ja 15 % vastasi, että huoneessa oli kohtuullista voimakkaampi haju. 18 % vastaajista piti sen hetkistä huoneilmaa hajuttomana. Tilakäyttäjien keskimääräinen kvantitatiivinen vastaus oli $1,1 \pm 1,3$, vaihteluvälillä 0...5, joten tilakäyttäjien mielestä huoneilmassa oli vähän hajua. Yleisiä hajun lähteitä ovat tilakäyttäjien bioemissiot, erilaiset tilakäyttöön liittyvät tuotteet ja kosmetiikka sekä uudet sisustusmateriaalit.

Kysymys 7 kartoitti hengitysilman puhtautta. 45 % vastaajista piti hengitysilmaa puhtaana ja 52 % likaisena. Vastaajista 3 % ei pitänyt hengitysilmaa puhtaana eikä likaisena (neutraali). Tulosten perusteella tilakäyttäjien keskimääräinen tuntemus oli $0,0 \pm 1,7$ mikä viittaa siihen, että huoneilma ei tilakäyttäjien mielestä olisi ollut puhdasta eikä likaista. Kuitenkin puolet vastaajista koki hengitysilman ainakin hieman likaisena. Tulos viittaa siihen, että ilmanvaihdon tehostaminen on ollut tarpeellista.

Kysymys 8 käsitteli huoneilman laadun hyväksyttävyyttä. 55 % vastaajista piti huoneilman laatua hyväksyttävänä ja 45 % ei hyväksyttävänä. Tilakäyttäjien keskimääräinen tuntemus oli kvantitatiivisesti $0,3 \pm 1,8$ mikä viittaa siihen, että huoneilma olisi ollut keskimäärin hyväksyttävää. Kuitenkin suuri osuus vastaajista piti huoneilman laatua ei hyväksyttävänä. Tulos viittaa siihen, että tilan käyttöilmanvaihdoilla voidaan saavuttaa keskimäärin juuri hyväksyttävät olosuhteet, mutta edellä mainittujen kysymysten mukaisesti ilmanvaihdon tehostuksen mahdollisuutta olisi ehkä hyvä painottaa ohjeistuksessa.

Taulukko 10 esittää ryhmätyötilojen huoneilman laatua kartoittaneet kysymykset jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla.

Taulukko 10. Yliopistorakennuksen ulkovyöhykkeen ryhmätyötilojen huoneilman laatua kartoittaneet kysymykset jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Mittaustuloksia kuvaajassa (Kuva 15, Kohde 1).

Jaksottainen yöilmanvaihto	K4 (raikkaus) [-3...3]	K5 (haju) [0...5]	K7 (puhtaus) [-3...3]	K8 (hyväksyttävyyys) [-3...-0,01; 0,01...3]
keskiarvo	0,4	0,4	1,5	1,6
min.	-1,3	0,0	0,0	0,01
max.	2,1	1,0	3,0	3,0
keskihajonta	1,2	0,4	1,0	1,1

Jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla kysymyksen 4 vastaajista jopa 60 % piti huoneilmaa raikkaana ja 33 % tunkkaisena. 7 % prosenttia vastaajista koki, ettei huoneilma ollut tunkkainen eikä raikas (neutraali). Tilakäyttäjien keskimääräinen vastaus oli kvantitatiivisesti $0,4 \pm 1,2$ ($ka \pm sd$), joten vastaajien mielestä huoneilma oli keskimäärin hieman raikas. Tulosten perusteella jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla suurempi osa vastaajista piti huoneilmaa raikkaana kuin pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla. Tulos voi johtua vastaajien yksilöllisistä tuntemuksista, mahdollisista tilakäytön eroista ja jaksottaisen käytön pienemmästä otannasta.

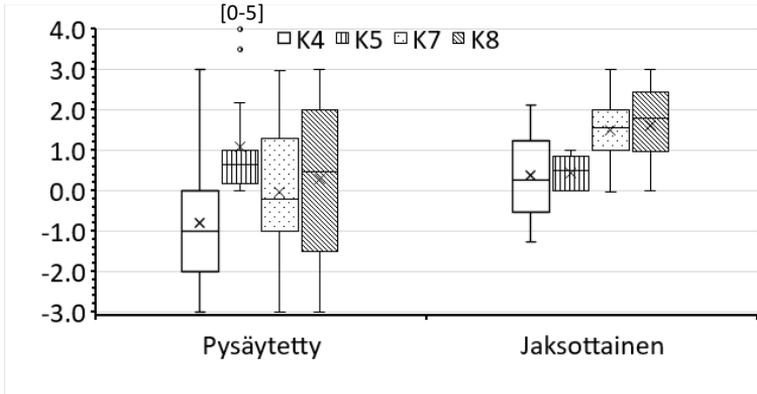
Kysymyksen 5 vastaajista 60 % koki, että huoneessa oleva haju oli miedompaa kuin kohtuullista ja 40 % piti sen hetkistä huoneilmaa hajuttomana. Tilakäyttäjien keskimääräinen vastaus oli $0,4 \pm 0,4$, mikä tarkoittaa, että huoneilmassa oli keskimäärin vain hiukan hajua. Siten yöilmanvaihdon jaksottaisella käytöllä suurempi osuus vastaajista piti huoneilmaa hajuttomana kuin pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla. Tähän voi vaikuttaa esimerkiksi se, että ihmisiä saattoi olla vähemmän ryhmätyötiloissa toukokuussa jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla kuin huhtikuussa normaalikäytön testijaksolla. Toisaalta suurempi ilmanvaihtomäärä jaksottaisella yöilmanvaihdolla saattaisi poistaa edellisen illan hajuja tehokkaammin yöaikaan kuin ilmanvaihdon normaalikäyttö.

Jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla kysymyksen 7 vastaajista jopa 82 % piti hengitysilmaa puhtaana ja vain 9 % epäpuhtaana. Vastaajista 9 % ei pitänyt hengitysilmaa puhtaana eikä epäpuhtaana (neutraali). Tulosten perusteella tilakäyttäjien keskimääräinen kokemus oli $1,5 \pm 1,0$ mikä viittaa siihen, että tilakäyttäjien mielestä huoneilma on ollut keskimäärin vähän tai kohtuullisesti puhdasta. Näin ollen jaksottaisen ilmanvaihdon testijaksolla selvästi suurempi osuus vastaajista tunsu hengitysilman puhtaana kuin pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla. Todennäköistä on, että pienempi otanta ja mahdollisesti vähäisempi tilakäyttö on voinut vaikuttaa tähän tulokseen, vaikka yöaikainen hajujen poisto tehostuisikin ilmanvaihdon jaksottaisella käytöllä.

Jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla kaikki kysymykseen 8 vastanneet pitivät huoneilman laatua hyväksyttävänä. Tilakäyttäjien keskimääräinen kokemus oli $1,6 \pm 1,1$ mikä tarkoittaa, että vastaajien mielestä huoneilman laatu oli keskimäärin selvästi hyväksyttävällä tasolla. Siten vastaajista huomattavasti suurempi osuus piti huoneilmaa hyväksyttävänä yöilmanvaihdon jaksottaisella testijaksolla kuin pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla. Tämä korreloi vastaavasti muita ilman laatuun liittyviä kysymyksiä. Merkittävää jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla oli myös se, että vain 27 % vastanneista olisi halunnut lisätä ilmanvaihtoa, kun taas pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla vastaava osuus oli jopa 80 %.

Kuva 28 esittää kootusti huoneilman laatuun liittyvien kysymyksen kvantitatiiviset tulokset pysäytetyn ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Tuloksista nähdään, että vastaajia ja hajontaa oli enemmän pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla (vasen) kuin jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla (oikea). Tulosten perusteella ilman laatu oli keskimäärin normaalilla tasolla ja

hyväksyttävämpi jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla kuin pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla.



Kuva 28. Yliopistorakennuksen ryhmätyötilojen sisäilmastokyselyn huoneilman laatuun liittyvät tulokset pysäytetyn ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Kysymysjärjestys K4...K8 on kuvaajassa vasemmalta oikealle.

Jatkuvalla ilmanvaihdolla vastausten määrä oli vain 3, joista kaksi piti huoneilmaa raikkaana ja yksi neutraalina. Yhden mielestä huoneessa ei ollut hajua ja kahden mielestä kohtuullinen tai voimakas haju. Kaksi vastaaja piti hengitysilmaa puhtaana ja yksi epäpuhtaana. Lisäksi yksi vastaaja piti huoneilman laatua hyväksyttävänä ja kaksi vastaajaa ei vastannut tähän kysymyksen mitta-asteikon edellyttämällä tavalla.

4.2 Muut kohteet

Muissa kohteissa tulokset esittävät lähinnä yksittäisiä tuntemuksia sisäilmastosta testijaksojen ajalta.

4.2.1 Huoneen lämpöolot

Päiväkodissa 1 lämpöolot poikkesivat tilakäyttäjän mielestä vain vähän neutraalista (Taulukko 11, Kuva 29). Suurin poikkeama oli ilman kosteuden tuntemuksessa. Mittaukset tehtiin toukoheinäkuussa. Lämpötuntemus oli melkein neutraali, mutta lämpötilaa olisi haluttu vielä ihan vähän laskea. Mittauksissa huoneilman keskimääräinen lämpötila oli pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla $24,5 \pm 0,8^\circ\text{C}$ (ka \pm sd), jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla $24,5 \pm 1,2^\circ\text{C}$ ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla $24,6 \pm 1,0^\circ\text{C}$, joten huonelämpötila oli keskimäärin samalla tasolla. Näin ollen mittaukset korreloivat koettuja oloja. Huoneilman liike koettiin melkein neutraalina. Huoneilma koettiin vähän kosteaksi pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla, kun taas jatkuvalla ja jaksottaisella yöilmanvaihdolla tuntemus oli lähempänä neutraalia. Mittauksissa huoneilman keskimääräinen suhteellinen kosteus oli pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla $41 \pm 7\%$, kun se jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla oli $51 \pm 8\%$ ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla oli $46 \pm 7\%$. Kyselyn yksittäisissä vastauksissa tähän tulokseen vaikutti lähinnä huonetilan hetkelliset olosuhteet.

Päiväkoti 3 oli toiminnassa 24 h/vrk, joten testijaksoja ei voitu tehdä. Mittaukset olivat marraskuussa. Tuloksissa tarkasteltiin ilmanvaihdon normaalia käyttöä. Kuuden vastaajan mielestä

lämpöolot poikkesivat keskimäärin vain vähän neutraalista. Suurin poikkeama oli huoneilman kosteustaso, joka koettiin vähän kuivaksi. Mittauksissa huonelämpötila oli testijaksolla keskimäärin $21,1\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ ($ka\pm sd$) ja huoneilman suhteellinen kosteus oli $34\pm 9\%$. Vastaajien kommentoissa ilman lämpötila oli yleensä melko sopiva.

Päiväkodissa 4 pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla oli yksittäisellä vastaushetkellä lämmin, kun taas jatkuvan ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla useamman vastaajan mielestä lämpöolot olivat keskimäärin lähempänä neutraalia. Mittaukset tehtiin tammi-helmikuussa. Vastauksissa huoneilman lämpötilaa haluttiin loogisesti laskea vastaavasti. Mittauksissa huoneilman lämpötila oli pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla $22,7\pm 0,3^{\circ}\text{C}$, jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla $22,5\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla $22,3\pm 0,4^{\circ}\text{C}$, joten huoneilman keskimääräinen lämpötila oli samalla tasolla. Huoneilma koettiin kuitenkin vähän kuivaksi. Mittauksissa huoneilman kosteus oli keskimäärin hieman suurempi pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla ($30\pm 4\%$) kuin jatkuvan ($27\pm 5\%$) ja jaksottaisen ($28\pm 4\%$) yöilmanvaihdon testijaksolla.

Päiväkodissa 5 lämpöolot poikkesivat tilakäyttäjien mielestä keskimäärin vähän neutraalista. Mittaukset olivat elo-syyskuussa. Suurin poikkeama oli ilman liikkeen vaikutuksella. Vastaajat pitivät lämpöoloja keskimäärin vähän lämpimänä pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla, kun taas jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla vastaajat pitivät lämpöoloja vähän viileänä. Huoneen lämpötilaa ei kuitenkaan keskimäärin haluttu nostaa. Tilakäyttäjien lämpötuntemus oli lähimpänä neutraalia jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla, mutta huonetilan lämpötilaa haluttiin kuitenkin ihan vähän nostaa. Mittauksissa keskimääräinen huoneilman lämpötila oli pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla $22,3\pm 1,1^{\circ}\text{C}$, jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla $21,6\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla $21,5\pm 0,4^{\circ}\text{C}$, joten suurin huoneilman lämpötilan vaihtelu oli pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla. Ilman liike koettiin epämiellyttävimpänä pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla, vaikka huoneen lämpötila koettiin keskimäärin vähän lämpimänä ja huoneilman lämpötilaa haluttiin siten laskea. Tämä saattaa johtua esimerkiksi huoneilmaa viileämmästä tuloilmasta tai ilman nopeudesta, joka voi kasvattaa tilakäyttäjän tuntemaa vectoriskiä. Savukokeissa ilmasuihkut virtasivat normaalisti oleskeluvyöhykkeelle, jossa sekoittuivat huoneilmaan. Huoneilman kosteustaso koettiin melkein neutraalina pysäytetyn ja jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla, ja vähän kuivana jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Mittauksissa huoneilman keskimääräinen suhteellinen kosteus oli kuitenkin samalla tasolla sekä pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla $50\pm 5\%$ ($ka\pm sd$), että jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla $52\pm 7\%$ sekä myös jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla $51\pm 7\%$, mutta kosteuden vaihtelu oli keskimäärin vähän suurempaa jatkuvan ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla kuin pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla. Näin ollen esimerkiksi jaksottaisen yöilmanvaihdon vastauksissa saattaa näkyä ilmakehän kosteuden kuiva vaihe pienen otannan vuoksi. Päiväkodissa ei ollut tuloilman jäähdystystä.

Koulussa 1 luokan lämpöolot poikkesivat tilakäyttäjien mielestä vähän neutraalista. Mittaukset olivat huhti-toukokuussa. Suurin poikkeama havaittiin ilman kosteuden tuntemuksessa. Tilakäyttäjien lämpötuntemus oli keskimäärin hiukan lämmin pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla, kun vastaava lämpötuntemus oli vähän viileä jatkuvan yöilmanvaihdon maksimiteholla (T2, Taulukko 11) ja hiukan viileä jatkuvan yöilmanvaihdon minimiteholla (T3, Taulukko 11). Vastauksissa haluttiin loogisesti nostaa tai laskea huoneilman lämpötilaa vastaavasti. Mittauksissa huoneilman lämpötila oli pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla $21,1\pm 0,8^{\circ}\text{C}$ ($ka\pm sd$), kun se yöilmanvaihdon maksimiteholla oli $21,5\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ ja yöilmanvaihdon minimiteholla $21,6\pm 0,6^{\circ}\text{C}$. Ilman liikkeen miellyttävyys oli keskimäärin neutraali. Savukokeissa sekoittavan ilmanjaon ilmasuihkut virtasivat kattovyöhykkeellä huoneen vastakkaiseen pätyyn, josta tuloilma sekoittui huonetilaan. Tilakäyttäjien mielestä huoneilma koettiin vähän kuivalta pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla ja neutraalilta jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla.

Mittauksissa huoneilman keskimääräinen suhteellinen kosteus oli pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla $25\pm 5\%$, kun se yöilmanvaihdon maksimiteholla oli $28\pm 6\%$ ja yöilmanvaihdon minimiteholla $37\pm 11\%$. Näin ollen keskimääräinen huoneilman suhteellinen kosteus ja sen vaihtelu suurenivat selvästi minimiteholla olevan jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolle (T3). Tämä ei kuitenkaan näkynyt annetuissa vastauksissa.

Koulussa 3 lämpöolot poikkesivat tilakäyttäjien mielestä vain hiukan neutraalista. Mittaus oli lokamarraskuussa. Suurin poikkeama havaittiin ilman kosteuden tuntemuksessa. Tilakäyttäjien lämpötuntemus oli keskimäärin hiukan viileä pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla, kun vastaava lämpötuntemus oli hiukan lämmin jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla ja melkein neutraali jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Vastauksissa ei haluttu nostaa tai laskea huonelämpötilaa. Mittauksissa huoneilman lämpötila oli pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla $19,5\pm 0,6^{\circ}\text{C}$ ($ka\pm sd$), jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla $19,4\pm 0,6^{\circ}\text{C}$ ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla $19,1\pm 0,6^{\circ}\text{C}$, joten huoneilman keskilämpötila jäi alle 20°C :n. Ilman liikkeen miellyttävyyttä koettiin keskimäärin neutraalina. Savukokeissa sekoittavan ilmanjaon ilmasuihkut virtasivat kattohajottajista oleskeluvyöhykkeelle, jossa ne sekoittuivat huonetilaan. Vastauksissa huoneilma koettiin vähän kuivalta pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla ja neutraalilta jatkuvan ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Mittauksissa huoneilman keskimääräinen suhteellinen kosteus oli pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla $40\pm 6\%$, kun se jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla oli $44\pm 7\%$ ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla oli $29\pm 7\%$. Näin ollen keskimääräinen huoneilman suhteellinen kosteus pieneni selvästi jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolle. Tulos ei kuitenkaan näkynyt annetuissa vastauksissa.

Koulussa 4 luokan lämpöolot poikkesivat tilakäyttäjien mielestä vähän neutraalista. Mittaus oli tammi-maaliskuussa. Tilakäyttäjien lämpötuntemus oli neutraali pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla, kun vastaava lämpötuntemus oli vähän viileä jatkuvan ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Vastauksissa haluttiin nostaa huonelämpötilaa. Kommenttikentässä viitattiin viileään sisäilmaan. Mittauksissa huoneilman lämpötila oli pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla $20,5\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ ($ka\pm sd$), jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla $20,0\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla $20,2\pm 0,4^{\circ}\text{C}$, joten huoneilman lämpötilan vaihtelu oli varsin maltillisella tasolla. Ilman liike koettiin vähän epämiellyttävänä. Savukokeissa sekoittavan tuloilman suutinkanavan ilmasuihkut virtasivat oleskeluvyöhykkeelle, jossa tuloilma sekoittui huoneilmaan. Huoneilma koettiin vähän kuivaksi pysäytetyn ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla ja neutraaliksi jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla. Mittauksissa huoneilman keskimääräinen suhteellinen kosteus oli pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla $29\pm 4\%$ ($ka\pm sd$), kun se jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla oli $29\pm 5\%$ ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla oli $26\pm 5\%$. Näin ollen keskimääräinen huoneilman suhteellinen kosteus laski jonkin verran jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolle.

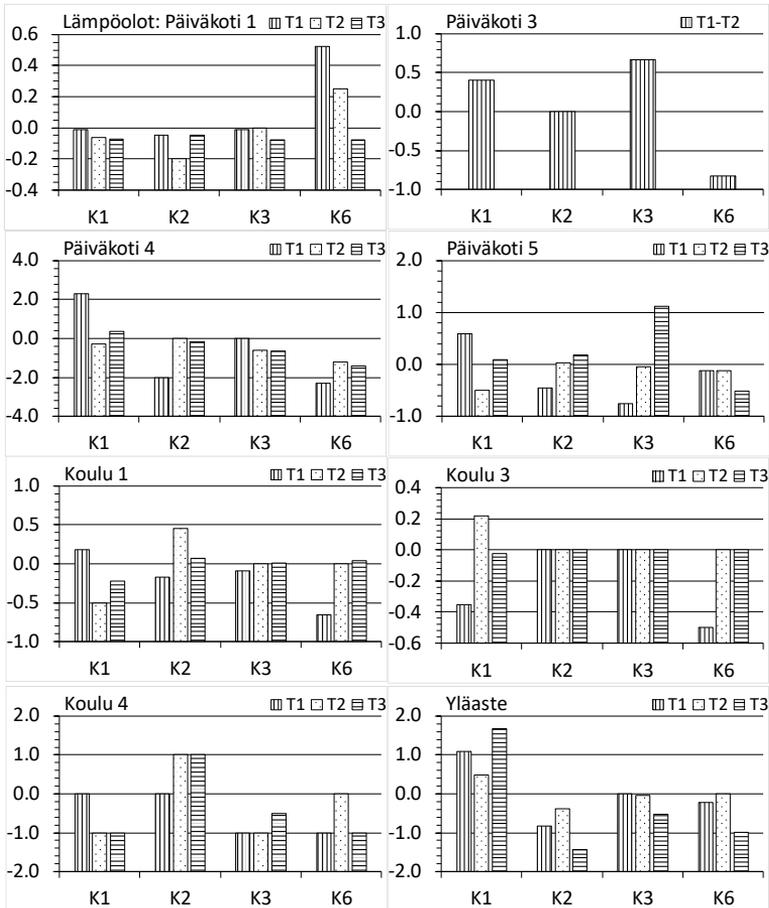
Yläasteen sisävyöhykkeen luokkatilassa lämpöolot poikkesivat tilakäyttäjien mielestä neutraalista. Mittaus oli elo-lokakuussa. Tilakäyttäjien keskimääräinen lämpötuntemus oli vähän lämmin pysäytetyn yöilmanvaihdon (Taulukko 11, T1) ja jatkuvan maksimitehoisen yöilmanvaihdon testijaksolla (Taulukko 11, T2), ja vastaavasti lämmin jatkuvan minimitehoisen yöilmanvaihdon testijaksolla (Taulukko 11, T3). Vastauksissa haluttiin laskea huonelämpötilaa keskimäärin sitä enemmän mitä lämpimämmäksi huone oli koettu. Mittauksissa huoneilman lämpötila oli pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla $22,9\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ ($ka\pm sd$), jatkuvan maksimitehoisen yöilmanvaihdon testijaksolla $21,7\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ ja jatkuvan minimitehoisen yöilmanvaihdon testijaksolla $22,1\pm 0,3^{\circ}\text{C}$. Näin ollen mitattu huoneilman lämpötila oli keskimäärin matalammalla tasolla sillä testijaksolla, jolla lämpöolot koettiin lähimmäksi neutraalia. Ilman liike koettiin neutraalina tai vähän epämiellyttävänä.

Savukokeissa sekoittavan suutinkanavan ilmasuihkut virtasivat oleskeluvyöhykkeelle, jossa tuloilma sekoittui huoneilmaan. Huoneilma koettiin melko neutraalina pysäytetyn ja maksimitehoisen yöilmanvaihdon testijaksolla, ja vähän kuivana minimitehoisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Mittauksissa huoneilman keskimääräinen suhteellinen kosteus oli pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla $52 \pm 7\%$ ($ka \pm sd$), kun se jatkuvalla maksimitehoisella testijaksolla oli $50 \pm 8\%$ ja minimitehoisella testijaksolla $56 \pm 4\%$. Näin ollen keskimääräinen huoneilman suhteellinen kosteus suureni jonkin verran minimitehoisen yöilmanvaihdon testijaksolle, vaikka tilakäyttäjien mielestä huoneilma koettiin kuivemmaksi kuin muilla testijaksolla. Moni vastaaja kommentoi, että luokassa on kuuma, mutta vastauksien mukaan poikkeamat neutraalista olivat keskimäärin kohtuullisia.

Taulukko 11. Tilojen lämpöoloja kartoittaneet kysymykset. T1 on pysäytetty yöilmanvaihto, T2 on jatkuva ilmanvaihto ja T3 on jaksottainen ilmanvaihto.

Lämpöolot ($ka \pm sd$)	K1 (lämpötila)	K2 (muutos)	K3 (ilman liike)	K6 (kosteus)
	[-3...3]	[-3...3]	[-3...3]	[-3...3]
Päiväkoti 1 – T1 (n=2)	$0,0 \pm 0,0$	$-0,1 \pm 0,0$	$0,0 \pm 0,0$	$0,5 \pm 0,1$
Päiväkoti 1 – T2 (n=2)	$-0,1 \pm 0,0$	$-0,2 \pm 0,2$	$0,0 \pm 0,0$	$0,3 \pm 0,4$
Päiväkoti 1 – T3 (n=1)	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Päiväkoti 3 – T1-T2 (n=6) ¹	$0,4 \pm 1,0$	$0,0 \pm 0,6$	$0,7 \pm 1,0$	$-0,8 \pm 1,1$
Päiväkoti 4 – T1 (n=1)	2,3	-2,0	0,0	-2,3
Päiväkoti 4 – T2 (n=5)	$-0,3 \pm 1,9$	$0,0 \pm 1,4$	$-0,6 \pm 0,5$	$-1,2 \pm 0,6$
Päiväkoti 4 – T3 (n=6)	$0,4 \pm 1,0$	$-0,2 \pm 1,1$	$-0,6 \pm 0,8$	$-1,4 \pm 0,4$
Päiväkoti 5 – T1 (n=9)	$0,6 \pm 0,5$	$-0,5 \pm 0,5$	$-0,8 \pm 0,8$	$-0,1 \pm 0,3$
Päiväkoti 5 – T2 (n=2)	$-0,5 \pm 0,7$	$0,0 \pm 0,0$	$-0,1 \pm 0,1$	$-0,1 \pm 0,2$
Päiväkoti 5 – T3 (n=4)	$0,1 \pm 0,9$	$0,2 \pm 0,4$	$1,1 \pm 1,3$	$-0,5 \pm 0,5$
Koulu 1 – T1 (n=3)	$0,2 \pm 0,7$	$-0,2 \pm 0,8$	$-0,1 \pm 0,2$	$-0,7 \pm 0,6$
Koulu 1 – T2 (n=2) ²	$-0,5 \pm 0,7$	$0,5 \pm 0,6$	$0,0 \pm 0,0$	$0,0 \pm 0,0$
Koulu 1 – T3 (n=2) ³	$-0,2 \pm 0,3$	$0,1 \pm 0,1$	$0,0 \pm 0,0$	$0,0 \pm 0,1$
Koulu 3 – T1 (n=2)	$-0,4 \pm 0,5$	$0,0 \pm 0,0$	$0,0 \pm 0,0$	$-0,5 \pm 0,7$
Koulu 3 – T2 (n=1)	0,2	0,0	0,0	0,0
Koulu 3 – T3 (n=2)	$0,0 \pm 0,0$	$0,0 \pm 0,0$	$0,0 \pm 0,0$	$0,0$ (n=1)
Koulu 4 – T1 (n=1)	0,0	0,0	-1,0	-1,0
Koulu 4 – T2 (n=1)	-1,0	1,0	-1,0	0,0
Koulu 4 – T3 (n=2)	$-1,0 \pm 0,0$	$1,0 \pm 0,0$	$-0,5 \pm 0,7$	$-1,0 \pm 0,0$
Yläaste – T1 (n=6)	$1,1 \pm 1,3$	$-0,8 \pm 0,8$	$0,0 \pm 0,0$	$-0,2 \pm 0,4$ (n=5)
Yläaste – T2 (n=4) ²	$0,5 \pm 1,0$	$-0,4 \pm 0,8$	$-0,1 \pm 0,0$	$0,0 \pm 0,0$
Yläaste – T3 (n=3) ³	$1,7 \pm 0,6$	$-1,4 \pm 1,0$	$-0,5 \pm 0,9$	$-1,0 \pm 1,0$

¹T1 ja T2 ovat samanlaisia testijaksosia. ²jatkuva yöilmanvaihto maksimiteholla. ³jatkuva yöilmanvaihto minimiteholla.



Kuva 29. Rakennusten sisäilmastokyselyn huoneilman lämpöolojen keskimääräiset tulokset. K1 Miten arvioisit huoneen lämpötilaa [-3...3]? K2 Pitäisikö huoneen lämpötilaa laskea tai nostaa [-3...3]? K3 Aistitko ilman liikkeen miellyttävänä vai epämiellyttävänä vedon tunteena [-3...3]? K6 Onko huoneilma kuivaa vai kosteaa [-3...3]? T1 on pysäytetty yöilmanvaihto, T2 on jatkuva yöilmanvaihto ja T3 on jaksottainen yöilmanvaihto. Päiväkodissa 3 testijaksot T1 ja T2 olivat samanlaisilla asetuksilla. Koulussa 1 ja Yläasteella T2 oli jatkuva yöilmanvaihto maksimiteholla ja T3 oli jatkuva yöilmanvaihto minimiteholla. Testijaksojen T1-T3 järjestys kuvaajassa on vasemmalta oikealle.

4.2.2 Huoneilman laatu

Päiväkodissa 1 huoneilma koettiin kohtuullisen tunkkaiseksi pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla (Taulukko 12, Kuva 30). Ilman tunkkaisuus oli kuitenkin lähellä neutraalia jatkuvan yöilmanvaihdon ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Huoneessa oli vähän hajua pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla, ja kohtuullisesti hajua jatkuvan ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Huoneilma koettiin vähän epäpuhtaana hengittää pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla, mutta hengitysilman puhtauden tunne oli lähempänä neutraalia jatkuvan ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Huoneilman laatu oli tilakäyttäjän mielestä juuri hyväksyttävällä tasolla jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla ja ei hyväksyttävää pysäytetyn ja jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla.

Päiväkodissa 3 huoneilma koettiin kohtuullisen tunkkaisena. Huoneessa oli myös vähän hajua. Huoneilma koettiin myös vähän epäpuhtaalta hengittää. Lisäksi huoneilman laatu oli tilakäyttäjien mielestä ei hyväksyttävällä tasolla. Kommenttikentässä viitattiin usein tunkkaiseen ilmaan.

Päiväkodissa 4 huoneilma koettiin kohtuullisen tunkkaiseksi pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla, kun se jatkuvan ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla koettiin vähän tunkkaiselta. Huoneessa oli myös vähän hajua näillä testijaksolla. Huoneilma koettiin vähän epäpuhtaana hengittää näillä jokaisella testijaksolla. Huoneilman laatu oli tilakäyttäjän mielestä vähän ei hyväksyttävällä tasolla pysäytetyn ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla, ja juuri hyväksyttävä jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Kommenttikentässä viitattiin monesti tunkkaiseen ilmaan. Kaiken kaikkiaan suurimmat poikkeamat neutraalista oli tilakäyttäjien mielestä huoneilman tunkkaisuudessa.

Päiväkodissa 5 huoneilma koettiin vähän tunkkaiseksi pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla, kun se jatkuvan ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla oli neutraalia. Huoneessa oli vähän hajua pysäytetyn ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla, mutta jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla hajua ei tuntunut. Huoneilma koettiin kuitenkin vähän epäpuhtaaksi hengittää jatkuvan ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla, kun se oli lähellä neutraalia pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla. Huoneilman laatu oli tilakäyttäjän mielestä hyväksyttävällä tasolla, erityisesti jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Kommenttikentässä viitattiin tunkkaiseen ilmaan. Moni halusi myös lisätä ilmanvaihtoa.

Koulussa 1 huoneilma koettiin kohtuullisen raikkaaksi pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla, kun se jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla oli vähän tunkkaista. Jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla huoneilma koettiin puolestaan vähän raikkaalta. Huoneessa oli myös vähän hajua pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla, mutta vain ihan vähän hajua jatkuvan ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Huoneilma koettiin vähän puhtaana hengittää pysäytetyn ja jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla, ja kohtuullisen puhtaalta hengittää jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Huoneilman laatu oli tilakäyttäjän mielestä hyväksyttävällä tasolla testijaksolla. Kommenttikentässä viitattiin tunkkaiseen ilmaan ja ilmanvaihtoa haluttiin myös lisätä.

Koulussa 3 huoneilma koettiin vähän tunkkaiselta pysäytetyn ja jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla, ja hiukan raikkaaksi jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Huoneessa ei kuitenkaan havaittu olevan hajua testijaksolla. Huoneilma koettiin vähän epäpuhtaaksi hengittää pysäytetyn ja jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla, ja melkein neutraaliksi jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Huoneilman laatu oli tilakäyttäjän mielestä hyväksyttävällä tasolla pysäytetyn ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla, ja jopa selvästi hyväksyttävä jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla. Ilmanvaihtoa haluttiin lisätä jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla tunkkaisen ilman vuoksi.

Koulussa 4 huoneilma koettiin vähän tunkkaiseksi pysäytetyn ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla, kun se jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla koettiin neutraaliksi. Huoneessa havaittiin vähän hajua jaksottaisella testijaksolla. Huoneilma koettiin hengityksessä vähän epäpuhtaaksi pysäytetyn ja jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla, mutta neutraalina jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Huoneilman laatu oli tilakäyttäjän mielestä hyväksyttävällä tasolla pysäytetyn ja jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla, ja jopa selvästi hyväksyttävä jatkuvan yöilmanvaihdon testijaksolla. Ilmanvaihtoa haluttiin lisätä pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla tunkkaisen ilman vuoksi. Muutoin viitattiin siihen, että huoneilma oli viileää.

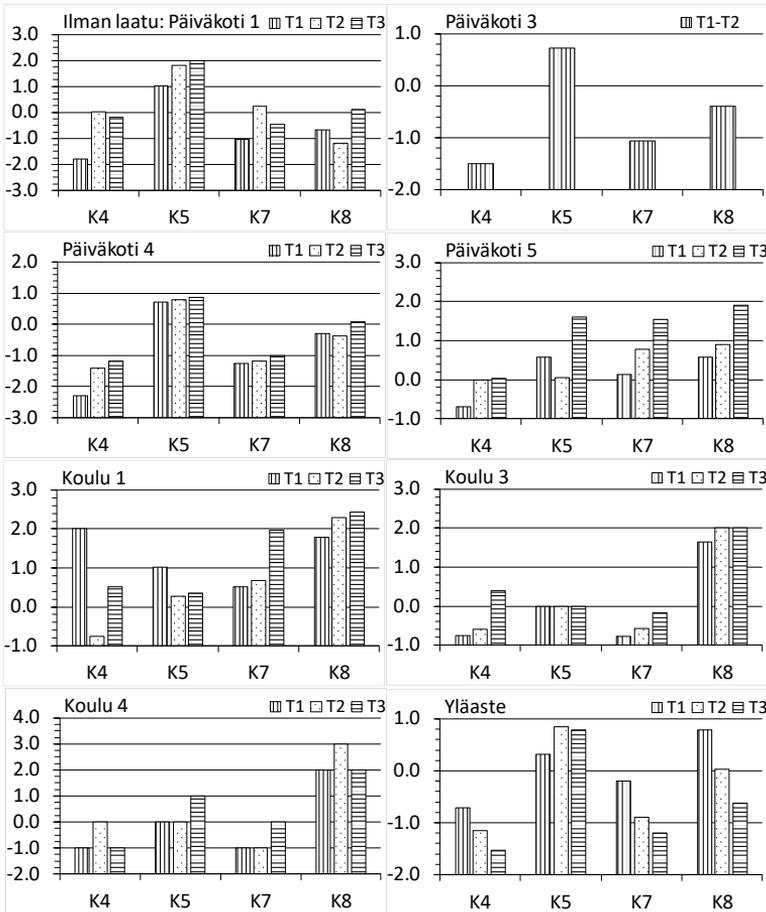
Yläasteen luokassa huoneilma koettiin vähän tunkkaiseksi pysäytetyn ja jatkuvan maksimitehoisen yöilmanvaihdon testijaksolla, kun se jatkuvan minimitehoisen yöilmanvaihdon testijaksolla oli lähempänä kohtuullisen tunkkaista. Huoneessa oli kuitenkin vain hiukan hajua pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla, ja vähän hajua maksimitehoisen ja minimitehoisen yöilmanvaihdon

testijaksoilla. Tässä tapauksessa huoneilma koettiin melkein neutraalina hengittää pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla, ja vähän epäpuhtaana maksimitehoisen ja minimitehoisen yöilmanvaihdon testijaksoilla. Huoneilman laatu oli tilakäyttäjien mielestä hyväksyttävällä tasolla pysäytetyn yöilmanvaihdon testijaksolla, ja juuri hyväksyttävällä tasolla (0,03) maksimitehoisen yöilmanvaihdon testijaksolla, sekä ei hyväksyttävällä tasolla minimitehoisen yöilmanvaihdon testijaksolla. Kaikki muut paitsi yksi vastaaja halusivat kuitenkin lisätä ilmanvaihtoa. Kommenttikentässä viitattiin luokan ilman tunkkaisuuteen ja korkeaan lämpötilaan sekä hajuun.

Taulukko 12. Tilojen huoneilman laatua kartoittaneet kysymykset. T1 on pysäytetty yöilmanvaihto, T2 on jatkuva ilmanvaihto ja T3 on jaksottainen ilmanvaihto.

Huoneilman laatu (ka±sd)	K4 (raikkaus)	K5 (haju)	K7 (puhtaus)	K8 (hyväksyttävyyys)
	[-3...3]	[0...5]	[-3...3]	[-3...-0,01; 0,01...3]
Päiväkoti 1 – T1 (n=2)	-1,8 ± 0,3	1,0 ± 0,0	-1,0 ± 0,0	-0,7 ± 0,8
Päiväkoti 1 – T2 (n=2)	0,0 ± 0,7	1,8 ± 1,2	0,2 ± 0,4	-1,2 ± 1,7
Päiväkoti 1 – T3 (n=1)	-0,2	2,0	-0,5	0,1
Päiväkoti 3 – T1-T2 (n=6) ¹	-1,5 ± 1,0	0,7 ± 1,1	-1,1 ± 1,1	-0,4 ± 1,7
Päiväkoti 4 – T1 (n=1)	-2,3	0,7	-1,3	-0,3
Päiväkoti 4 – T2 (n=5)	-1,4 ± 1,1	0,8 ± 0,9	-1,2 ± 1,2	-0,4 ± 1,7
Päiväkoti 4 – T3 (n=6)	-1,2 ± 1,0	0,9 ± 0,7	-1,0 ± 0,7	0,1 ± 1,6
Päiväkoti 5 – T1 (n=9)	-0,7 ± 0,5	0,6 ± 0,9	0,1 ± 1,1	0,6 ± 1,2
Päiväkoti 5 – T2 (n=2)	0,0 ± 0,0	0,1 ± 0,1	0,8 ± 1,2	0,9 ± 1,3
Päiväkoti 5 – T3 (n=4)	0,0 ± 1,6	1,6 ± 0,6	1,5 ± 1,2	1,9 ± 0,5
Koulu 1 – T1 (n=3)	2,0 ± 3,1	1,0 ± 1,7	0,5 ± 1,5	1,8 ± 1,5
Koulu 1 – T2 (n=2)	-0,8 ± 0,4	0,3 ± 0,4	0,7 ± 1,3	2,3 ± 0,4
Koulu 1 – T3 (n=2)	0,5 ± 0,7	0,4 ± 0,2	2,0 ± 0,0	2,4 ± 0,6
Koulu 3 – T1 (n=2)	-0,8 ± 0,4	0,0 ± 0,0	-0,8 ± 0,3	1,7 ± 0,3
Koulu 3 – T2 (n=1)	-0,6	0,0	-0,6	2,0
Koulu 3 – T3 (n=2)	0,4 ± 0,8	0,0 ± 0,0	-0,2 (n=1)	2,0 (n=1)
Koulu 4 – T1 (n=1)	-1,0	0,0	-1,0	2,0
Koulu 4 – T2 (n=1)	0,0	0,0	-1,0	3,0
Koulu 4 – T3 (n=2)	-1,0 ± 0,0	1,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	2,0 ± 0,0
Yläaste – T1 (n=6)	-0,7 ± 0,9	0,3 ± 0,5	-0,2 ± 1,3	0,8 ± 3,1
Yläaste – T2 (n=4) ²	-1,2 ± 0,6	0,9 ± 0,9	-0,9 ± 0,2	0,0 ± 1,6
Yläaste – T3 (n=3) ³	-1,5 ± 0,5	0,8 ± 0,4	-1,2 ± 0,3	-0,6 ± 1,8

¹T1 ja T2 ovat samanlaisia testijaksoja. ²jatkuva yöilmanvaihto maksimiteholla. ³jatkuva yöilmanvaihto minimiteholla.



Kuva 30. Rakennusten sisäilmastokyselyn huoneilman laadun keskimääräiset tulokset. K4 Tuntuuko huoneilma tunkkaiselta vai raikkaalta [-3...3]? K5 Onko huoneilma hajutonta [0...5]? K7 Tuntuuko huoneilma puhtaalta hengittää [-3...3]? K8 Onko huoneilman laatu tällä hetkellä mielestäsi hyväksyttävä [-3...-0,01; 0,01...3]?. T1 on pysäytetty yöilmanvaihto, T2 on jatkuva yöilmanvaihto ja T3 on jaksottainen yöilmanvaihto. Päiväkodissa 3 testijaksot T1 ja T2 olivat samanlaisilla asetuksilla. Koulussa 1 ja Yläasteella T2 oli jatkuva yöilmanvaihto maksimiteholla ja T3 oli jatkuva yöilmanvaihto minimiteholla. Testijaksojen T1-T3 järjestys kuvaajassa on vasemmalta oikealle.

5. Ilmanvaihtokanavan mikrobikasvusto

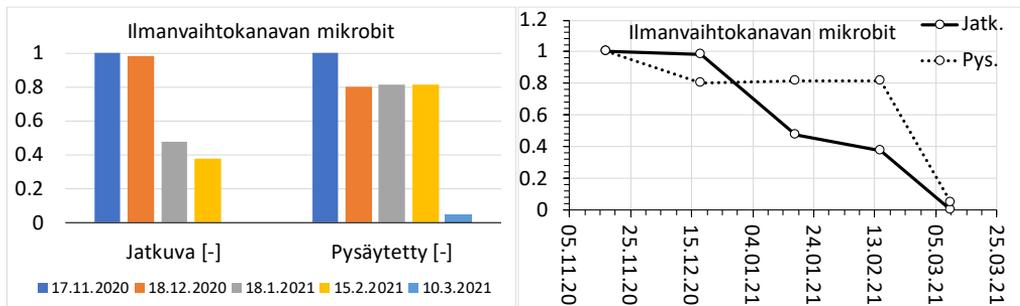
Laboratorion koejärjestelyssä verrattiin pysäytettyä ja jatkuvaa yöilmanvaihdon käyttöä. Koejärjestelyssä pysäytetyllä yöilmanvaihdolla koelaitteiston ilmanvaihto oli käynnissä 12 tuntia tilakäyttöilmavirralla ja pysäytettynä 12 tuntia. Seurantajakson ensimmäisellä viikolla pysäytetyn yöilmanvaihdon kanavassa mitattu ilmavirta oli keskimäärin $54,9 \pm 3,0$ L/s (ka \pm sd). Keskimääräinen ilmavirta vastasi siten ominaisilmavirtaa $3,1$ L/s, m² lattiapinta-alaltaan 18 m²:n huoneessa. Tällöin mitatusta ilmamäärästä laskettu keskimääräinen nopeus ilmanvaihtokanavan (250 mm) poikkileikkauksessa oli luokkaa $1,1$ m/s. Ilman lämpötila oli tilakäyttöilmavirralla (12 h) keskimäärin $13,3 \pm 1,9$ °C ja suhteellinen kosteus 68 ± 15 % ja pysäytyksen aikana (12 h) vastaavasti $12,6 \pm 0,8$ °C ja 48 ± 12 %, joten tavoitteena ollutta korkeampaa suhteellista kosteutta ei saavutettu, vaikka ilman kostutin kävi täydellä teholla. Tilakäyttöilmavirran kastepiste oli luokkaa $6,8 \pm 4,0$ °C ja pysäytyksen aikana $1,3 \pm 4,3$ °C.

Jatkuvan ilmanvaihdon koelaitteistossa ilmanvaihto oli käynnissä 12 tuntia tilakäyttöilmavirralla ja 12 tuntia pienellä ilmavirralla (yöilmanvaihto). Seurantajakson ensimmäisellä viikolla jatkuvan ilmanvaihdon kanavassa mitattu tilakäyttöilmavirta oli keskimäärin $53,7 \pm 1,2$ L/s. Keskimääräinen ilmavirta vastasi siten ominaisilmavirtaa $3,0$ L/s, m² lattiapinta-alaltaan 18 m²:n huoneessa ja ilmamäärästä laskettu keskinopeus oli luokkaa $1,1$ m/s, samoin kuin pysäytetyn yöilmanvaihdon tapauksessa. Pienellä yöilmanvaihdolla mitattu ilmavirta oli seurantajakson aikana keskimäärin $5,2 \pm 0,7$ L/s, joten keskimääräinen ilmavirta oli suurempi kuin tavoitteenmukainen $2,7$ L/s. Koejärjestelyssä keskimääräinen ilmavirta vastasi ominaisilmavirtaa $0,29$ L/s, m² lattiapinta-alaltaan 18 m²:n huoneessa, joten yöilmavirta oli vain 10 % tilakäyttöilmavirrasta. Mittausepävarmuus kasvoi pienillä ilmavirroilla ja suhteellinen vaihtelu (sd/ka) oli suurempaa (14 %) kuin suuremmilla ilmavirroilla (2-5 %). Pienellä ilmavirralla ilmanvaihtokanavassa (250 mm) virtaavan ilman keskimääräinen nopeus oli luokkaa $0,11$ m/s, mutta nopeusprofiili ei ole tasainen, joten tarkkaa jakaumaa näytteenottokohdassa ei pystytty todentamaan.

Jatkuvan yöilmanvaihdon kanavassa ilman lämpötila oli tilakäyttöilmavirralla keskimäärin $13,3 \pm 1,5$ °C, joten ilman lämpötila oli samalla tasolla pysäytetyn yöilmanvaihdon kanavan kanssa. Ilman suhteellinen kosteus oli 72 ± 13 %, joten suhteellisessa kosteudessa jäätin tavoitteesta, vaikka ilman kostutin toimi täydellä teholla. Pienellä yöilmavirralla ilman lämpötila oli vastaavasti $12,4 \pm 0,8$ °C ja suhteellinen kosteus 75 ± 14 %. Tilakäyttöilmavirran kastepiste oli keskimäärin $8,0 \pm 3,6$ °C ja pienellä yöilmavirralla $7,7 \pm 4,0$ °C. Ilmanvaihtokanavien sisäpinnan pintalämpötilat olivat noin asteen matalampia kuin kanavan sisällä mitattu ilman lämpötila.

5.1 Kontaktinäytteet

Kontaktinäytteet (Petrifilmi homeille) otettiin ilmanvaihtokanavasta yhden kuukauden välein painamalla näytteenottimen kasvatusalusta kanavan pintaan ja poistamalla se varovasti pinnasta minigrip-pussiin siten, että jokainen näyte otettiin aina uudesta kohdasta kanavan pintaa. Tulosten perusteella ilmanvaihtokanavan mikrobitasot pienenevät tarkastelujakson aikana, eikä kasvua ollut havaittavissa (Kuva 31 ja Taulukko 13). Yleisesti ottaen mikrobipitoisuudet olivat pieniä. Jatkuvalle yöilmanvaihdon käytöllä mikrobipitoisuus pysyi aluksi samalla tasolla, mutta pieneni sitten kohti mittausjakson loppua siten että viimeisen kuukauden näyte oli nolla. Pysäytetyllä yöilmanvaihdolla mikrobipitoisuus laski ensimmäisen kuukauden jälkeen, jonka jälkeen mikrobipitoisuus pysyi vakiona, kunnes pitoisuus oli pienentynyt selvästi viimeisen kuukauden aikana. Tähän voi olla monia syitä, mutta luultavasti jatkuva ilmanvaihto laski mikrobien elinkykyisyyttä enemmän kuin pysäytetyn yöilmanvaihdon ohjaustapa. Tulosten perusteella kummassakaan testitapauksessa ei voitu osoittaa mikrobien kasvua ilmanvaihtokanavan pinnalla, vaan analysoidut mikrobit olivat asettuneet pinnalle ilmavirrasta.



Kuva 31. Ilmanvaihtokanavan mikrobikasvuston dimensioton muutos jatkuvalla (Jatk.) ja pysäytetyllä (Pys.) yöilmanvaihdon käytöllä.

Taulukko 13. Ilmanvaihtokanaviston mikrobien [pmy] yöilmanvaihdon pysäytetyllä ja jatkuvalla käytöllä. [pmy] on pesäkkeen muodostava yksikkö.

Kontaktinäyte:	17.11.2020	18.12.2020	18.1.2021	15.2.2021	10.3.2021
Pysäytetty [pmy]:	175	140	143	142	8,5
Jatkuva [pmy]:	80	79	38	30	0

5.2 Sivelynäytteet

Sivelynäytteet otettiin pumpulipuikolla 10x10 cm² pinta-alalta, jonka jälkeen puikko laitettiin näyteputkiloon. Sivelynäytteillä saatiin eroteltua bakteerit ja homeet, kun Petrifilminäytteillä saatiin kartoitettua vain homeet. Lisäksi sivelynäytteet varmistivat filminäytteillä saatuja tuloksia. Sivelynäytteiden perusteella molempien testitapausten mikrobimäärä aleni pinnoilla tarkastelujakson aikana. Ilmanvaihdon ollessa yöllä pysäytettynä, bakteerien muutossuhde alkutilanteen ja lopputilanteen välillä oli 0,41 kun taas jatkuvalla ilmanvaihdon käytöllä muutossuhde oli 0,46 (Taulukko 14). Homeilla muutossuhteet olivat 0,27 ja 0,08 vastaavasti. Sivelynäytteiden perusteella homeitiöiden suhteellinen alenema oli jatkuvalla ilmanvaihdon käytöllä suurempi kuin pysäytetyllä yöilmanvaihdolla.

kun taas bakteerien suhteellinen alenema oli samaa suuruusluokkaa molemmilla ilmanvaihdon käyttötavoilla.

Taulukko 14. Ilmanvaihtokanaviston mikrobit yöilmanvaihdon pysäytetyllä ja jatkuvalla käytöllä tarkastelujakson alussa ja lopussa. [pmy] on pesäkkeen muodostava yksikkö.

Sivelynäytteet	bakteerit [pmy]			homeet [pmy]		
	alku	loppu	muutossuhde	alku	loppu	muutossuhde
tarkastelujakso						
pysäytetty	693	284	0,41	756	203	0,27
jatkuva	531	243	0,46	531	41	0,08

5.3 Ilmanäytteet

Ilmanäytteet otettiin ilmanvaihtokanavan läpiviennistä mittausten alussa ja lopussa. Ilmanäytteillä kartoitettiin kanavassa virtaavan ilman sisältäviä bakteeri- ja homeitä, kun Petrifilmi- ja sivelynäytteillä mitattiin kanavan pinnan mikrobimääriä. Taulukko 15 ja Taulukko 16 esittävät ilmanäytteiden tulokset tarkastelujakson alussa (12.11.2020) ja lopussa (10.3.2021). Näytteet otettiin kanavan alkuosasta ja loppuosasta. Bakteereissa (Taulukko 15) muutossuhde oli pysäytetyllä yöilmanvaihdon käyttötavalla kanavan lopussa 0,33 ja jatkuvalla ilmanvaihdon käytöllä 0,20. Homeissa (Taulukko 16) muutossuhteet olivat pysäytetyllä yöilmanvaihdon käytöllä 0,18 ja jatkuvalla käytöllä 0,67. Kanavan alkuosassa muutossuhde oli tarkastelujakson jälkeen pieni, koska mikrobimäärät olivat generoinnin jälkeen useimmiten suurempia kanavan alkuosassa. Kanavan loppuosassa homeiden muutossuhde jäi ilmanvaihdon jatkuvalla käytöllä korkeammalle tasolle kuin pysäytetyllä yöilmanvaihdon avulla ennen tuloilman virtaamista huonetilaan. Tähän ei löytynyt selittävää syytä. Ilmanäytteet tukevat Petrifilmi- ja sivelynäytteiden tuloksia, joiden perusteella mikrobimäärä ilmanvaihtokanavassa ei kasvanut yöilmanvaihdon pysäytetyllä tai jatkuvalla käyttötavalla.

Taulukko 15. Ilmanäytteiden bakteerit yöilmanvaihdon pysäytetyllä ja jatkuvalla käytöllä ilmanvaihtokanavan alku- ja loppupäässä seurantajakson alku- ja lopputilanteessa. [pmy] on pesäkkeen muodostava yksikkö.

Alkutilanne	Jatkuva	Jatkuva	Pysäytetty	Pysäytetty
bakteerit [pmy]	kanavan alku	kanavan loppu	kanavan alku	kanavan loppu
yhteensä	34	10	58	12
Lopputilanne	Jatkuva	Jatkuva	Pysäytetty	Pysäytetty
bakteerit [pmy]	kanavan alku	kanavan loppu	kanavan alku	kanavan loppu
yhteensä	3	2	3	4
muutossuhde	0,09	0,20	0,05	0,33

Taulukko 16. Ilmanäytteiden homeet yöilmanvaihdon pysäytetyllä ja jatkuvalla käytöllä ilmanvaihtokanavan alku- ja loppupäässä seurantajakson alku- ja lopputilanteessa. [pmy] on pesäkkeen muodostava yksikkö.

Alkutilanne	Jatkuva	Jatkuva	Pysäytetty	Pysäytetty
homeet [pmy]	kanavan alku	kanavan loppu	kanavan alku	kanavan loppu
yhteensä	5	18	22	17
Lopputilanne				
Lopputilanne	Jatkuva	Jatkuva	Pysäytetty	Pysäytetty
homeet [pmy]	kanavan alku	kanavan loppu	kanavan alku	kanavan loppu
yhteensä	0	12	2	3
muutossuhde	0,00	0,67	0,09	0,18

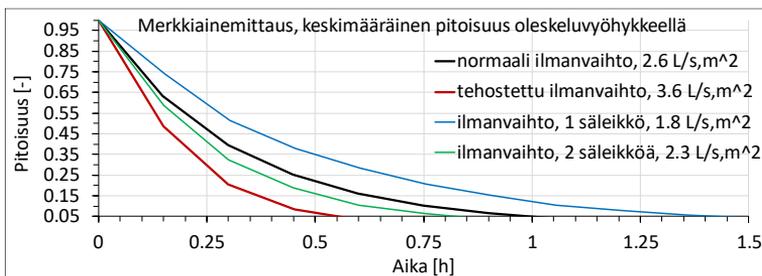
Ilmanäytteiden tulosten perusteella ilmanvaihtokanavissa ei ollut mikrobikasvua. Siten tulokset viittaavat siihen, että mikrobit eivät kasva helposti uusissa ilmanvaihtokanavissa, jos kanavat on puhdistettu suositusten mukaisesti (Pasanen ym. 2007). On huomattava, että tässä tutkimuksessa ei saavutettu mikrobikasvulle suotuisia kosteusolosuhteita (RH yli 85%), minkä perusteella ei voida tehdä johtopäätöksiä, etteikö kanavan pinnalla esiintyisi ilmanvaihtokoneen pysäytyksen mikrobikasvua korkeassa suhteellisessa kosteudessa.

6. Ilmanjaon ja aerosolien vaikutus

Tässä luvussa tarkastellaan yliopistorakennuksen ryhmätyötilassa tehdyn koejärjestelyn tuloksia. Mittauksen tarkoituksena oli selvittää ilmanvaihdon käynnistyksen vaikutusta huoneilman epäpuhtauspitoisuuksiin, jota koejärjestelyssä jäljitteli merkkiaine SF₆.

6.1 Ilmanvaihdon käynnistyksen vaikutus

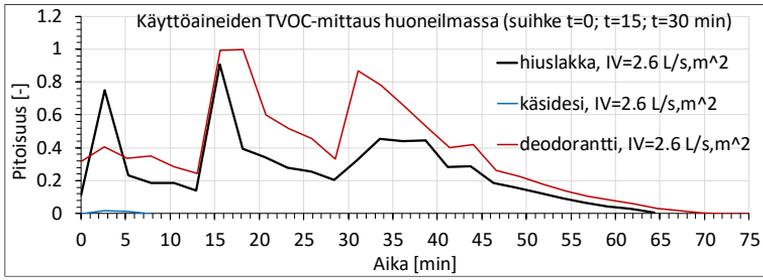
Kuva 32 esittää merkkiainepitoisuuden alenemista huoneillassa ilmanvaihdon käynnistyksen jälkeen. Tuloksista voidaan havaita, että normaalilla ilmanvaihdolla (1 tulo- ja poistoilmalaittepari) huoneilman merkkiainepitoisuus pieneni lähtötilanteesta (100 %) 5 %:iin noin 1 tunnissa. Tehostetulla ilmanvaihdolla (2 tulo- ja poistoilmalaitteparia) merkkiainepitoisuus pieneni vastaavasti 5 %:iin jo noin 35 minuutissa. Lisäksi kahdella tulo- ja poistoilmalaitteparilla ilmanvaihto oli tehokkaampaa kuin yhdellä tulo- ja poistoilmalaitteparilla, johtuen siitä todennäköisimmin huoneilman paremmasta sekoittumisesta ja tasaisemmasta poistosta, kun käytössä on kaksi poistoilmasäleikköä.



Kuva 32. Keskimääräinen dimensioton merkkiainepitoisuus [-] ajan funktiona oleskeluvyöhykkeellä erilaisilla ilmanvaihtotavoilla.

6.2 Käyttöaineiden vaikutus TVOC-pitoisuuteen

Kuva 33 esittää käyttöaineiden TVOC-pitoisuutta huoneilmassa, kun käyttöainetta on vapautettu huoneilmaan 15 minuutin välein ajankohdassa 0 min, 15 min ja 30 min. Tulosten perusteella hiuslakka ja suihkedeodorantti näkyivät TVOC-anturissa selvästi, mutta ammattikäyttöön tarkoitettu siivousaine ei sen sijaan näkynyt. Käsidesin vaikutusta ei mittauksissa ollut juurikaan havaittavissa, koska sitä vapautettiin vain pieni annosmäärä huoneeseen.



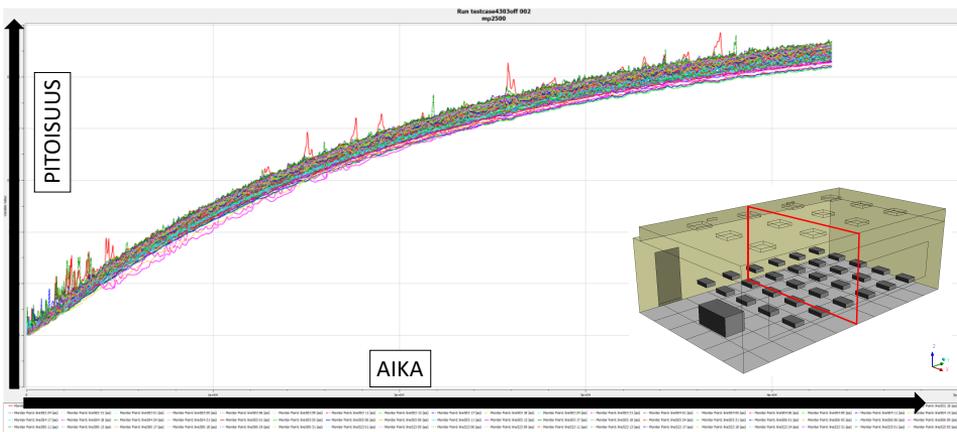
Kuva 33. Käyttöaineiden dimensioton TVOC-pitoisuus [-] huoneilmassa ajan funktiona.

7. Yöilmanvaihdon vaikutus epäpuhtauksiin luokkatilassa

Tässä luvussa esitetään CFD-simulointien tuloksia, joissa tutkittiin yöilmanvaihdon ja päiväilmanvaihdon vaikutusta oleskeluvyöhykkeen epäpuhtauspitoisuuksiin luokkatilassa.

7.1 Yöaikainen minimi-ilmanvaihto

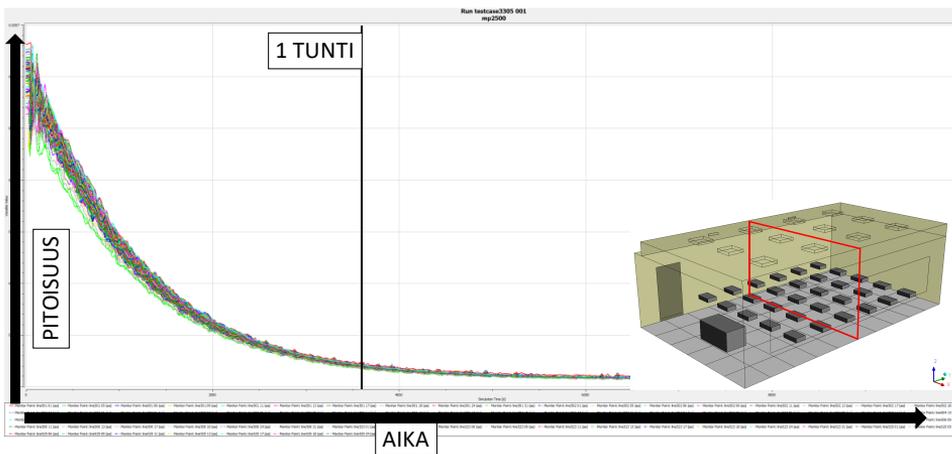
Yöaikana ilmanvaihdon ollessa pientä rakennusmateriaaleista tulevat epäpuhtaudet voivat lisääntyä huoneilmassa. Yöaikainen minimi-ilmanvaihto $0,15 \text{ L/s, m}^2$ kuitenkin osaltaan poistaa ja laimentaa pitoisuuksia. Tällöin pitoisuuden kasvu ei ole lineaarinen, vaan kuvaajat kaareutuvat lähestyessään luokan ilmanvaihduvuuden mukaista tasapainotilaa (Kuva 34). Tietokonemallinnuksen tuloksissa pitoisuudet kasvavat 12 tunnin aikana lähestyessään tasapainotilannetta. Kuvaajassa pitoisuus alkaa nollopitoisuudesta ja epäpuhtauslähteenä on koko lattia. Teoreettisesti eri kohtien pitoisuuksien vaihteluväli jää huoneessa melko pieneksi, joka nähdään käyrien välisenä etäisyytenä pystyakselilla. Huoneilman tilavuuteen ja tuloilmamäärään pohjautuvan nimellisaikavakion (nominal time constant = V/qv) perusteella huoneilma vaihtuu ideaalitalanteessa (mäntäilmanvaihto, ideal piston flow) kerran kuudessa tunnissa minimi-ilmavirralla. Tällöin huoneilman vaihtuvuus (Air exchange rate = qv/V) on luokkaa $0,16 \text{ 1/h}$.



Kuva 34. Pitoisuuksien kasvaminen minimi-ilmanvaihdolla oleskeluvyöhykkeen poikkileikkauksessa (nelikulmio huoneen keskellä) koko lattia kattavalta epäpuhtauslähteeltä 12 tunnin aikana. Alkutilanteessa on nollopitoisuus.

7.2 Päiväaikainen ilmanvaihto

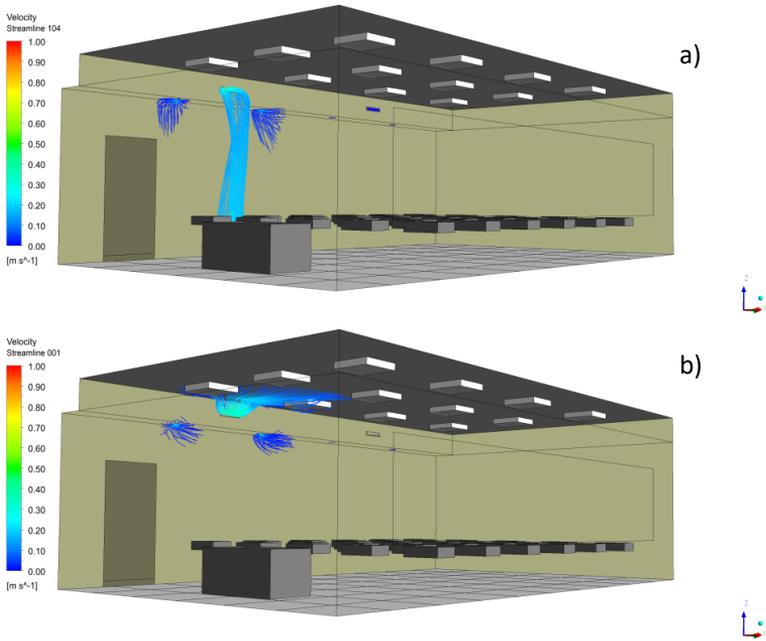
Päiväilmanvaihdolla 3 L/s, m^2 ($5,8 \text{ L/s, hlö}$) nimellisaikavakio on luokkaa $0,3 \text{ h}$, jolloin huoneilman vaihtuvuus koneellisella ilmanvaihdolla on $3,3$ kertaa tunnissa. Päiväilmanvaihdon käynnistyessä 12 tunnin yöilmanvaihdon jälkeen, huoneilman dimensioton pitoisuus ($0...1$) pieneni alle 10 prosenttiin yhden tunnin aikana (Kuva 35). Pitoisuserot myös tasoittuivat vastaavasti ajan funktiona. Alkutilanteessa yönaikainen ilmanvaihto on ollut pysäytettyä 12 tuntia.



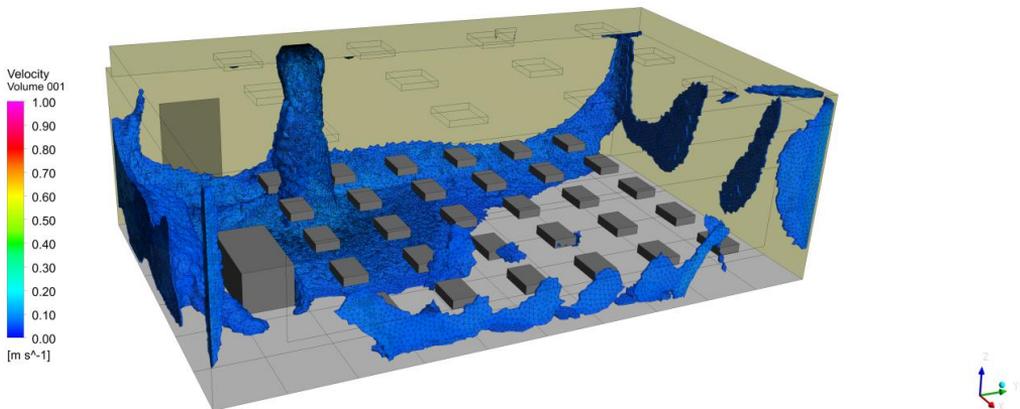
Kuva 35. Pitoisuuksien aleneminen päiväaikaisen ilmanvaihdon käynnistyttyä oleskeluvyöhykkeen poikkileikkauksessa (nelikulmio huoneen keskellä) koko lattian kattavalta epäpuhtauslähteeltä. Pystysuuntainen koordinaattiakseli on pitoisuus ja vaakasuuntainen akseli on aika. Pystysuora viiva osoittaa vaak-akselilla kohtaa, jossa ilmanvaihto on ollut käynnissä 1 tunnin. Alkutilanteessa yöilmanvaihto on ollut pysäytettyä 12 tuntia.

7.3 Tuloilman lämpötila

Minimiyöilmanvaihdolla ($0,15 \text{ L/s, m}^2$) tuloilman lämpötilan vaikutusta tarkasteltiin alilämpöisellä (-4°C = huonelämpötila miinus 4°C), isothermisellä ja yllilämpöisellä (4°C = huonelämpötila plus 4°C) tuloilman lämpötilalla (Kuva 36). Tuloilman lämpötila vaikutti tuloksiin, koska painovoima kiihdyttää alilämpöistä tuloilmasuihkua lattiavyöhykkeelle ja yllilämpöistä tuloilmasuihkua ylöspäin kattovyöhykkeelle. Tuloilmasäleikön puhallus oli suunnattu 15 astetta yläviistoon, jolloin Coanda (painehäviö) pitää suihkun normaali-ilmavirralla kattopinnassa. Minimi-ilmavirtaa käytettäessä alilämpöisellä suihkulla on taipumus pudota suoraan oleskeluvyöhykkeelle. Alilämpöinen tuloilmasuihku virtaa siten lattialle ja leviää lattiapintaa pitkin oleskeluvyöhykkeellä laimentaen pitoisuuksia (Kuva 37).

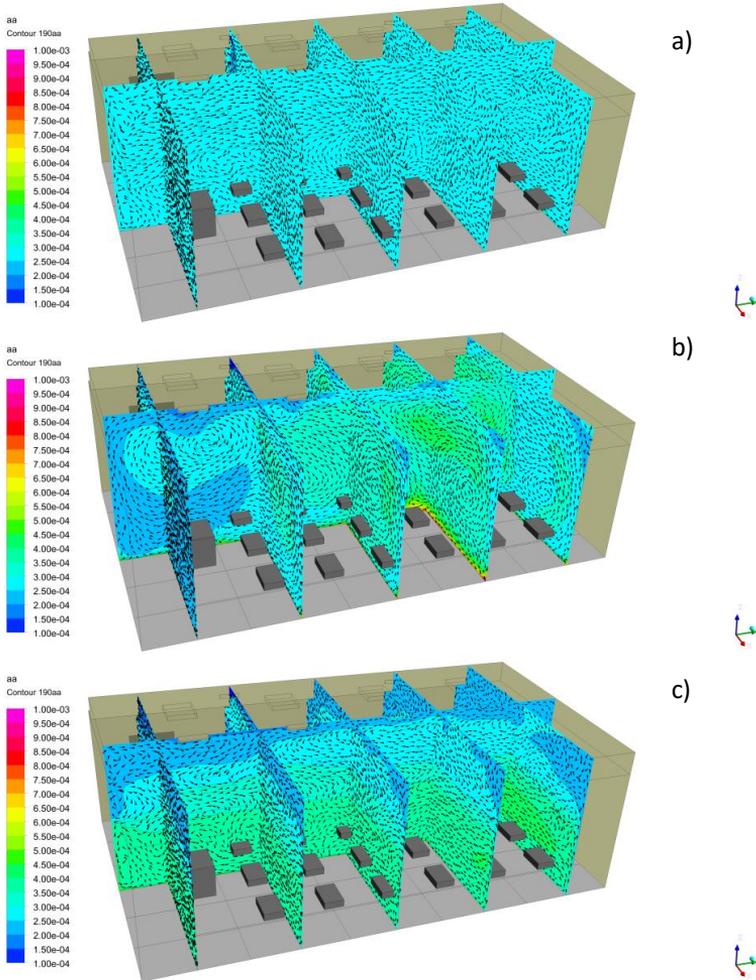


Kuva 36. Yöilmanvaihdon tuloilma- ja poistoilman virtaus: a) alilämpöinen tuloilma (-4°C), b) ylälämpöinen tuloilma (4°C) verrattuna huoneilman keskimääräiseen lämpötilaan laskennan alkutilanteessa.



Kuva 37. Ilman nopeusolosuhteet alilämpöisellä minimiyöilmanvaihdolla. Kuvassa on alueet, joissa ilman nopeus on suurempi kuin $0,05\text{ m/s}$.

Tällöin oleskeluvyöhykkeen epäpuhtauspitoisuudet muodostuvat pienemmiksi alilämpöisellä tuloilmalla kuin saman lämpöisellä tai ylälämpöisellä tuloilmalla (Kuva 38).



Kuva 38. Lattiaemission aiheuttamat pitoisuudet huoneilmassa: a) alilämpöinen tuloilma (-4°C), b) isoterminen huoneilma, c) yllilämpöinen tuloilma (4°C).

Alilämpöisellä tuloilmalla epäpuhtauspitoisuudet, ja myös ilman ikä, ovat keskimäärin pienempiä oleskeluvyöhykkeellä kuin isoteremisellä tai yllilämpöisellä tuloilmalla (Kuva 38a). Tiheän pitoisuuden alueita muodostuu ainoastaan luokan takaosan vastakkaiseen kulmaukseen tuloilmasäleikköön nähden.

Isoteremisellä huoneilmalla pitoisuuden vaihteluväli on suurempaa ja tiheän epäpuhtauspitoisuuden alueita muodostuu tuloilmasuihkun vaikutusalueen ulkopuolelle toiselle puolelle huonetilaa (Kuva 38b), kun taas tuloilmasuihkun vaikutusalueella pitoisuus on pienempää, jossa myös ilman ikä on matalalla tasolla. Tämä johtuu siitä että, saman lämpöinen tuloilma aiheuttaa koko huoneen mittakaavassa pyörivän virtauskentän tuloilmalaitteelta vastakkaiselle seinälle, jolloin pienten pitoisuuksien alue painottuu samalle puolelle huonetta kuin tuloilmasuihku.

Yllilämpöisellä tuloilmalla suurin epäpuhtauspitoisuus on oleskeluvyöhykkeellä, koska lämmin tuloilma virtaa kattopintaa pitkin eikä sekoitu hyvin huoneilmaan (Kuva 38c). Tällöin pyörivää virtauskenttää ei muodostu vaan lämmin ilma jää pelkästään kattovyöhykkeelle. Tällöin

oleskeluvyöhykkeelle muodostuu tiheän pitoisuuden alue, joka painottuu tilan kulmiin. Suurin pitoisuuksien vaihteluväli on ylälämpöisellä tuloilmalla, kun se on pienintä alilämpöisellä tuloilmalla hyvän sekoittumisen takia.

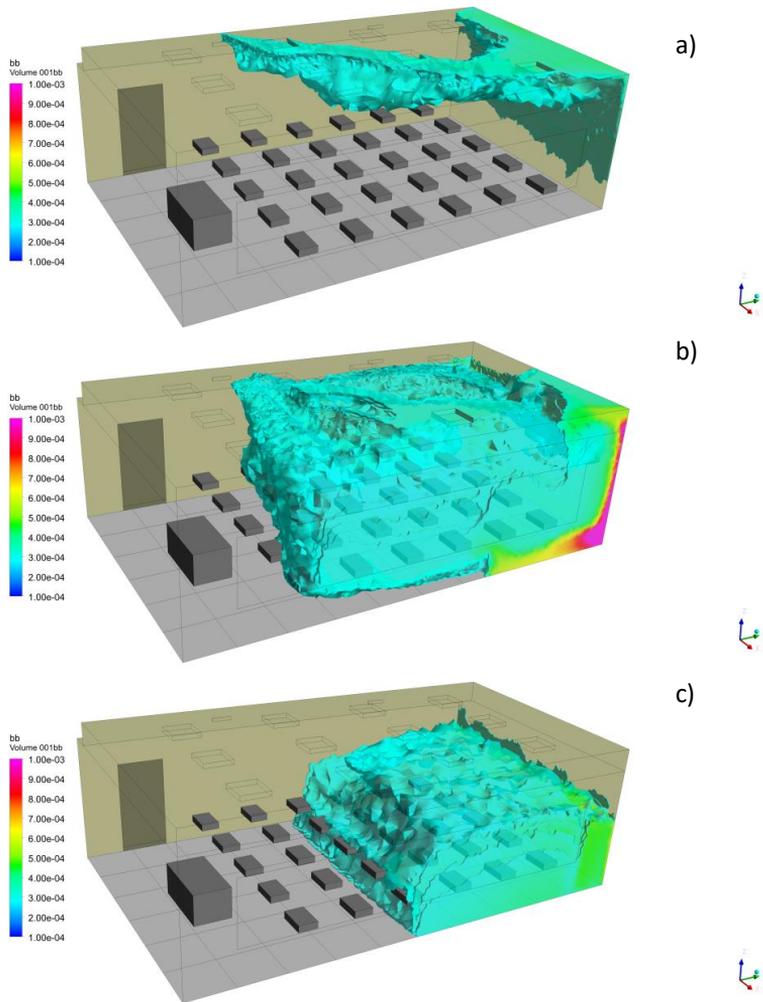
7.4 Epäpuhtauslähteen sijainti

Epäpuhtauslähteen sijainti ja sen pinta-ala vaikuttivat tuloksiin. Kaikilla lähteillä oli sama emissiovirta huonetilaan [mg/s]. Näin ollen lattiakulman (1 m^2) emissiovirran tiheys oli suurin ja lattialähteen (60 m^2) pienin [mg/s, m^2]. Tuloksissa tämä näkyi siten, että suurimmat pitoisuudet muodostuivat pienimmän epäpuhtauslähteen lähivyöhykkeelle ja tasaisempia muutoksia esiintyi suurempikokoisilla epäpuhtauslähteillä.

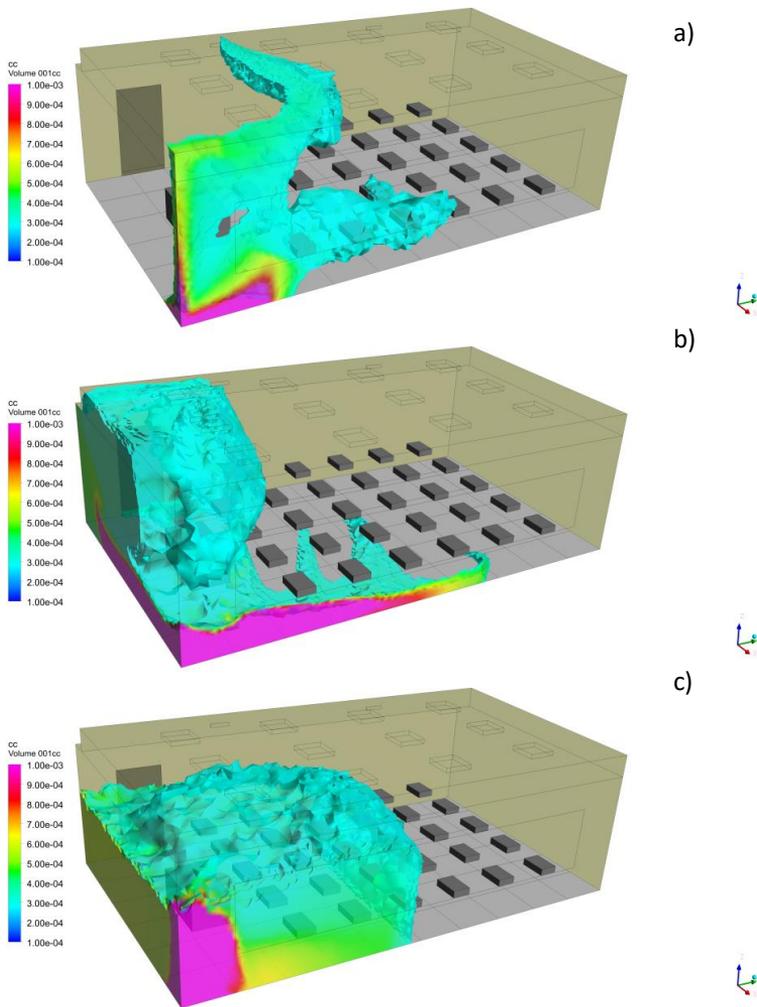
Päätyseinän epäpuhtauslähteellä ($16,8 \text{ m}^2$) alilämpöinen tuloilma kasvatti epäpuhtauspitoisuuksia kattovyöhykkeellä (Kuva 39a), kun taas ylälämpöisellä tuloilmalla oleskeluvyöhykkeen pitoisuudet kasvoivat epäpuhtauslähdeä kohti (Kuva 39c). Tasalämpöisellä huoneilmalla suurimman pitoisuuden alue muodostui tasaisesti tuloilmasuihkun vaikutusalueen ulkopuolelle (Kuva 39b).

Nurkkauksen epäpuhtauslähteellä (1 m^2) alilämpöisellä tuloilmalla korkean pitoisuuden alueita muodostui lähelle nurkkaa ja kattovyöhykkeellä lähellä tuloilmasuihkua (Kuva 40a). Tasalämpöisellä tuloilmalla korkean pitoisuuden alue muodostui kapeammaksi kuin seinämäepäpuhtauden tapauksessa (Kuva 40b). Ylälämpöisellä tuloilmalla oleskeluvyöhykkeelle muodostui korkean pitoisuuden alue nurkanpuoleiselle huonetilan lähivyöhykkeelle (Kuva 40c). Pitoisuuden muutokset kasvoivat suuremmaksi kohti nurkkaa, kun seinämän tai lattialähteen tapauksissa.

Tässäkin pienin pitoisuuskenttä muodostui alilämpöisellä tuloilmalla hyvän huoneilman sekoittumisen takia, kun taas pitoisuuden vaihteluväli kasvoi isothermisellä ja ylälämpöisellä tuloilmalla. Näin ollen isothermisellä tuloilmalla saavutettiin suurin pienen pitoisuuden alue luokan takaosaan, koska tuloilma puhallettiin epäpuhtauslähteen puolelta, jolloin pitoisuuksia ei päässyt leviämään niin paljon toiselle puolelle huonetta. Ylälämpöisellä tuloilmalla vastaava alhaisen/pienen pitoisuuden alue muodostui kattovyöhykkeelle.



Kuva 39. Seinäemission aiheuttamat pitoisuudet huoneilmassa: a) alilämpöinen tuloilma (-4°C), b) isoterminen huoneilma, c) ylilämpöinen tuloilma (4°C). Kuvassa tilavuudet, jossa dimensioton pitoisuus on suurempi kuin $3E-4$.



Kuva 40. Nurkkaemission aiheuttamat pitoisuudet huoneilmassa: a) allämpöinen tuloilma (-4°C), b) isoterminen huoneilma, c) ylälämpöinen tuloilma (4°C). Kuvassa tilavuudet, jossa dimensioton pitoisuus on suurempi kuin $3\text{E}-4$.

8. Yhteenveto ja pohdinta

Suomen julkinen sektori vastaa noin 30 % kokonaistyöllisyydestä. Tämän lisäksi varhaiskasvatuksessa on arvioitu olevan noin 200 000 lasta ja perusopetuksessa noin 500 000 oppilasta. Sen vuoksi rakennusten sisäilmasto on tärkeä osa työikäisten hyvinvointia. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten julkisten rakennusten käytönajan ulkopuolinen ilmanvaihto tulee toteuttaa siten, että sisäilman laatu pysyy tavoitetasolla koko normaalin työskentelyajan aikana. Silloin riittäväällä ilmanvaihdolla pystytään ehkäisemään materiaaliemissioista johtuvien mahdollisten sisäilmaongelmien syntyminen ja pitämään siitä huolimatta energiankulutus järkevällä tasolla. Tutkimus toteutettiin kenttämittauksina 10:ssä koulu- ja päiväkotirakennuksessa. Lisäksi mitattiin yksi oppilaitosrakennus. Kohteet oli valittu siten, että niissä ei ole ollut aiemmin raportoituja sisäilmaongelmia. On huomattava, että mitatut 11 kohdetta on tilastollisesti varsin pieni otanta koko rakennuskannasta. Tilastollisesti olisi ollut parempi saada kattavampi otos, esimerkiksi 30 kpl, mutta se olisi ollut projektin budjetin ja kokonaisaikataulun kannalta mahdotonta.

Mittauskohteiden sisäilman laatua tarkasteltiin kolmella erilaisella käyttötavalla: koneellisen yöilmanvaihdon ollessa pysäytettynä, jatkuvalla käytöllä sekä jaksottaisella käytöllä. Lisäksi kohteissa tehtiin sisäilmastokysely. Yksittäinen käyttötavan testijakso kesti kaksi viikkoa. Päivällä ilmanvaihto oli normaalilla käytöllä. Kaikissa kohteissa ei voitu mitata yöilmanvaihdon pysäytystä.

Tuloksissa tarkasteltiin mikrobeja, TVOC-pitoisuutta ja lämpöolosuhteita. Mitatuista tuloksista esitettiin erilaisia analyyskejä, joiden perusteella arvioitiin ilmanvaihdon yöaikaisen käytön vaikutuksia sisäilman laatuun heti aamulla ja työpäivän aikana. Lisäksi erilaisten yöaikaisen ilmanvaihdon käyttötapojen vaikutuksesta ilman laatuun tehtiin tietokonemallinnuksia, joilla täydennettiin tehdyistä mittauksista ja sisäilmastokyselystä saatua informaatiota.

Kenttämittaukset tehtiin ajanjaksolla 4.4.2019–7.10.2020. Mittaukset tehtiin eri aikoina vuodesta, mikä tarkoittaa, että saman tyyppisiä rakennuksia ei voitu verrata suoraan toisiinsa. Kenttämittauksissa 5 rakennusta mitattiin syksyllä, 2 rakennusta talvella, 2 rakennusta keväällä ja 2 rakennusta kesällä. Kenttämittaukset kestivät yksittäisessä rakennuksessa yhteensä 4–6 viikkoa. Samanaikaisesti mittauksia oli käynnissä yhdessä tai kahdessa kohteessa.

Hankkeen alussa koottiin hypoteeseja siitä, miten yöaikainen ilmanvaihto voi vaikuttaa rakennusten sisäilmastoon. Eräs hypoteesi liittyi siihen, mikä on yöaikaisen ilmanvaihdon vaikutus sisäilman laatuun aamutilanteessa heti käyttöjakson alkaessa. Olettamuksena oli, että ilmanvaihtokoneiden pysäyttäminen yöksi voisi aiheuttaa pölyn ja kosteuden kertymistä ilmanvaihtokanaviin, joissa edelleen puhaltimen pysäytys aiheuttaisi mikrobikasvustoa. Tällöin ilmanvaihdon käynnistyttyä epäpuhtauksia voisi levitä tuloilman mukana huonetilaan. Tulokset osoittivat, että puhaltimen pysäyttäminen ei lisännyt huonetilassa mikrobien määrää eikä ilmanvaihdon käynnistymisellä ollut sisäilman hiukkaspitoisuutta lisäävää vaikutusta.

Tehdyt sisäilmaston materiaaliemissiomittaukset (TVOC) eivät myöskään tukeneet jatkuvan yöaikaisen ilmanvaihdon käyttöä. TVOC-pitoisuuksien perusteella ilmanvaihdon käytön kahden tunnin suositusaika tilakäytön molemmin puolin on perusteltua. Tätä suositusta tuki myös ryhmätyötilassa tehty koejärjestely, jossa normaalilla ilmanvaihdolla (2,6 L/s, m²) huoneilman merkkiainepitoisuus pieneni 5%:iin noin 1 tunnissa. Tehostetulla ilmanvaihdolla (3,6 L/s, m²) taas merkkiainepitoisuus pieneni 5%:iin jo noin 35 minuutissa. Tietokonesimuloinneissa normaalilla ilmanvaihdolla yöaikainen epäpuhtauspitoisuus pieneni 10 %:iin yhden tunnin aikana (3 L/s, m²).

TVOC-pitoisuus riippuu suurelta osin yksittäisistä VOC-yhdisteistä. On huomattava, että MOS-menetelmällä mitattu TVOC on käytännössä haihtuvien orgaanisten yhdisteiden trendi eikä tarkka arvo. Se on kuitenkin hyvä yleinen indikaattori sisäilman orgaanisista epäpuhtauksista. Sisätilojen yleisiä TVOC-lähteitä ovat tyypillisesti henkilökohtaiset tai tilankäyttöön liittyvät tuotteet ja materiaalit, puhdistusaineet sekä tilojen rakennus- tai sisustusmateriaalit (Shendell ym. 2004). Lisäksi tilakäyttäjien kosmetiikka voi lisätä TVOC-pitoisuuksia (Leppänen ym. 2020). Näin ollen päivittäiset tilakäytön aktiviteetit vaikuttavat suuresti TVOC-tasoihin. Mittaustulosten perusteella TVOC-pitoisuudet olivat päivällä korkeammalla tasolla kuin aamulla, korostaen tilakäytön merkitystä ilman laadun osatekijänä. Tehdyssä koejärjestelyssä hiuslakka ja suihkedeodorantti näkyivät selvästi TVOC-anturissa, mutta ammattikäyttöön tarkoitettu siivousaine ei näkynyt.

Tulosten perusteella tutkitut yöilmanvaihdon käyttöstrategiat tuottivat samanlaista sisäilman laatua aamutilanteessa. Jatkuva ilmanvaihto piti TVOC-pitoisuudet yöllä matalalla tasolla, mutta tällöin energiankulutus myös kasvaa vastaavasti. Mittauksissa jaksottainen ilmanvaihto tuotti yöaikaan korkeimmat TVOC-pitoisuudet. Tulos johtui mitä todennäköisimmin palvelualueiden tulo- ja poistoilmavirtojen epätasapainosta sekä ilmanvaihtokoneiden ja poistoilmapuhaltimien erilaisista aikatauluista. Mitatuissa kohteissa paine-erot ulkovaipan yli olivat maltillisia ja pysyttelivät pääsääntöisesti alle 10 Pascalin. Tilojen ilmavirtojen tasapainoa ja ulkovaipan ja tilojen välisiä paine-eroja tulisi mitata rakennusten käyttöönottoaiheessa ja huoltotoimenpiteenä sen varmistamiseksi, etteivät epäpuhtaudet leviäisi rakennuksessa. Tämä tarkoittaa sitä, että ilmavirta- ja painemittaukset suositellaan tekemään myös kaikilla eri ilmanvaihdon ohjaustavoilla ja kiinnittämään erityistä huomiota VAV-järjestelmien toimintaan eri käyttötilanteissa.

Laboratoriotutkimuksessa ilmanvaihtokanavassa ei todettu selvää mikrobikasvua. Siten laboratorioskokeessa saadut tulokset viittaavat siihen, ettei kanavan pinnalle asettuneet mikrobit kasva kovin helposti uusissa ilmanvaihtokanavissa. Kuitenkin kanaviston suunnittelussa tulee välttää tilannetta, jossa kanavistoon muodostuu korkea ilman suhteellinen kosteus tai vettä tiivistyy pinnalle. Tällöin vältetään riski, että kanavaan kondensoitua kosteus mahdollistaisi mikrobien kasvun. Tulokset tukevat aikaisempia havaintoja siitä, että ilmanvaihtokanavan pinnalla, myös pölyisellä pinnalla, mikrobien kasvun todennäköisyys on hyvin alhainen.

Yleisesti on esitetty myös hypoteesi siitä, että sisätiloihin päivällä päässyt kosteus ei poistu, jos ilmanvaihto on yöaikana pysäytetty. Luokkatilojen ja ryhmähuoneiden ilman kosteus määräytyy huonetilan sisäisen kuormituksen, ulkoilman olosuhteiden sekä ilmanvaihdon perusteella. Tällöin keskeinen tekijä on ilmanvaihtuvuus, joka oli mitatuissa julkisissa rakennuksissa luokkaa 2–4 1/h. Käytännössä näillä ilmavirroilla voidaan tilat tuulettaa tehokkaasti. Tehtyjen mittausten mukaan mitatuissa sisätiloissa ei ulkoetäisen kautta tuleva kosteus lisännyt merkittävästi sisäilman kosteutta eikä ilmanvaihdon pysäyttäminen yöksi lisännyt mitatun huoneen (päiväaikaista) sisäilman kosteutta.

Ilmanvaihdon tehokkuuteen vaikuttaa merkittävästi ilmanvaihdon määrä ja ilmanjaon toiminta. Yöaikaisten epäpuhtauksien poistotehokkuus kasvaa ilmanvaihtoa kasvattamalla. Suurempi ilmavirta tuloilmanjaon päätelaitteissa tuottaa pidemmät heittokuviot, jotka oikein suunniteltuna parantavat epäpuhtauksien sekoittumista ja edelleen laimentumista tasaisemmin koko tilavuuteen. Tämä tulee

esille myös yöilmanvaihtomenetelmissä pienillä ilmavirroilla, jolloin sekoittuminen heikkenee. Poistojen sijainti tulee valita siten, että sekoittuneet epäpuhtaudet voidaan poistaa tehokkaasti. Yleisesti ottaen hyvä tulos voidaan saavuttaa, jos tuloilman virtaus päätelaitteelta suoraan poistoon vältetään. Suurissa tiloissa tulo- ja poistoilmalaitteiden määrä ja sijoittelu on olennaista ilmanvaihdon tehokkuuden kannalta. Yleensä useampi ilmanvaihdon päätelaite parantaa tehokkuutta ja lyhentää ilman ikää oleskeluvyöhykkeellä.

Suomen rakentamismääräyskokoelman ja ympäristöministeriön asetuksen 1009/2017 mukaan ilmanvaihdon yöaikainen vähimmäismäärä on $0,15 \text{ L/s, m}^2$ tilojen ylläpitotilanteessa (Ympäristöministeriö 2012; Ympäristöministeriö 2017). Tätä pientä ilmavirtaa on vaikea säätää, koska ilmanvaihtokoneen vähimmäisilmavirta on usein noin 30 % suurimmasta ilmavirrasta, minkä seurauksena $0,15 \text{ L/s, m}^2$ suuruinen ilmavirta voi olla paljon tätä pienempi. Pienet ilmavirrat eivät myöskään välttämättä jakaudu suunnitellusti ilmanvaihtokanavistoissa, kun kanavat on tasapainotettu suuremmille normaalin käyttöjakson ilmavirroille. Ilmanvaihdon säätölaitteet eivät myöskään pysty mittaamaan pieniä ilmavirtauksia, koska mittauslaitteiden miniminopeus on luokkaa $0,7\text{-}1 \text{ m/s}$ ja pieni yöaikainen ilmavirta voi tuottaa huomattavasti tätä pienemmän ilman nopeuden mittalaippaan. Lisäksi ilmanvaihdon tehokkuus on heikko, kun minimaalinen ilmavirta tuottaa lyhyen heittopituuden päätelaitteesta. Oleskeluvyöhykkeen sekoittumista voidaan kuitenkin tehostaa pienillä ilmavirroilla käyttämällä alilämpöistä tuloilmaa (esim. 18°C) huoneen yläosasta. Tietokonemallinnuksessa alilämpöinen tuloilma virtasi käytäväseinän yläosasta lattialle sekoittaen paremmin yöaikaista oleskeluvyöhykettä kuin isoterminen tai huoneilmaa lämpimämpi tuloilma.

Analysoidut mikrobit valittiin kuvaamaan laajoja mikrobiryhmiä, ja näitä qPCR-määrytyksiä käytetään yleisesti mikrobien mittaamiseen sisäilmatutkimuksissa. Laskeutuneen pölyn näytteitä kerättiin 14 vuorokauden ajan, jolloin ne kuvaavat pidemmän ajanjakson aikana kertynyttä mikrobimäärää eikä ainoastaan nopeaa hetkellistä tilannetta. Laskeutuvan pölyn näytteissä sisäilman mikrobipitoisuus oli yleensä vain muutaman prosentin luokkaa vastaavasta ulkoilman pitoisuudesta. Lisäksi yöilmanvaihdon käyttöstrategialla ei ollut vaikutusta sisäilman mikrobipitoisuuksiin vaan pitoisuudet vaihtelivat tapauskohtaisesti. Kaiken kaikkiaan yhdestä huoneesta kerätyt rinnakkaiset tulokset olivat hyvin samanlaisia. Laboratorioanalyysissä käytettiin myös tyhjiä näytteitä sekä positiivisia ja negatiivisia kontrollinäytteitä protokollan mukaisesti. Yleisesti ottaen tilakäyttäjät vaikuttavat enemmän sisänäytteiden bakteeripitoisuuteen ja ulkoilman olosuhteet vastaavasti näytteiden sienipitoisuuteen. Tulosten perusteella jaksottainen yöilmanvaihto tuotti hiukan pienemmän mikrobipitoisuuden kuin muut menetelmät. Luotettavaa syytä siihen ei tunnistettu. Eräs mahdollinen selitys saattaisi olla, että huoneilman virtauskuviot muuttuisivat ilmanvaihdon pysäytyksen ja käynnistyksen yhteydessä vaikuttaen näytemaljojen lähivyöhykkeen virtauksiin ennen kuin uusi tasapainotilanne huoneilman virtauskentässä on muodostunut. Periaatteessa tämä voisi aiheuttaa muutoksia pölynäytteisiin kaappien ja hyllyjen päällä, esimerkiksi poistaen jo aiemmin laskeutunutta pölyä maljoista. Testijakson ilmanvaihdon kokonaisilmamäärä oli jaksottaisella ilmanvaihdolla pysäytetyn ja jatkuvan yöilmanvaihdon väliltä, mutta jatkuva ilmanvaihto ei kuitenkaan tuottanut analyysissä pienimpiä mikrobitasoja.

Yliopistorakennuksen ryhmätyötilojen sisäilmastokyselyssä vastaajia oli yhteensä 51 kpl ja näistä 47 % oli naisia ja 53 % miehiä, ikäjakauman ollessa 19-49 vuotta. Kyselyyn vastasi tilakäyttäjät, joten jokaisella testijaksolla eivät olleet samat vastaajat. Kyselyssä kartoitettiin lämpöoloja sekä huoneilman laatua. Merkittävää tässä kohteessa oli, että jaksottaisen yöilmanvaihdon testijaksolla jopa 73 % vastanneista piti ilmanvaihtoa sopivana, kun taas pysäytetyllä yöilmanvaihdolla jopa 80 % olisi halunnut lisätä ilmanvaihtoa. Sisäilmastokyselyn tuloksiin ei todennäköisesti vaikuta yöilmanvaihto

merkittävästi, vaan tuloksissa näkyy luultavasti tilakäyttäjien yksilölliset tuntemukset vastaushetken olosuhteissa.

Yöaikaisen ilmanvaihdon käyttö ei ole tulosten mukaan perusteltua. Lisäksi on huomattava, että kouluissa ja päiväkodeissa tilojen ilmanvaihdon energiankäyttö on suurin yksittäinen tekijä ja se on esimerkiksi suurempi kuin rakennuksen ulkovaipan lämpöhäviöt. Näin ollen optimoimalla ilmanvaihdon yöllistä käyttöä, rakennuksen omistajat voivat pitää energiankulutuksen kohtuullisella tasolla. Energiankulutus kasvaa suoraan ilmanvaihdon käyttöajan ja ilmavirran kasvattamisen myötä. Siten energiatehokasta on käyttää yöilmanvaihtoa vain tarvittaessa, jotta ihmisille voidaan varmistaa hyvä sisäilman laatu tilankäytön alussa. Terveet ja viihtyisät sisäilmasto-olosuhteet tulisi taata koko tilankäytön aikoina. Puhaltimien energiankulutusta voidaan vähentää käyttämällä jatkuvaa yöilmanvaihtoa pienillä ilmavirroilla, mutta silloin ilmanvaihdon tehokkuus voi olla huono.

Yhteenvetona voidaan todeta, että tutkimushankkeen tuloksena saatiin uutta tietoa julkisten rakennusten käyttöajan ulkopuolisen ajanjakson ilmanvaihtojärjestelmien käytöstä. Ilmanvaihtokoneiden käytöstä on esitetty erilaisia hypoteeseja, jotka eivät perustu tutkimustietoon. Tutkimuksen tärkein tulos oli se, että tilojen käytöllä on itsessään suurempi vaikutus sisäilman laatuun kuin käyttöjakson ulkopuolisen ajan ilmanvaihdolla. Jatkuva yöaikainen ilmanvaihto ei ole perusteltua ja riittää kun ilmanvaihto on käynnistetty 2 tuntia ennen tilankäyttöä. Kaiken kaikkiaan yöllisen ilmanvaihtomenetelmän valinnalla oli normaalitilanteessa pienempi vaikutus sisäilman laatuun kuin mitattujen suureiden normaalilla vaihtelulla. Tämä on yhteydessä sisäilman epäpuhtauksien muodostumiseen, sisätilojen käyttöön ja sääolosuhteisiin. Hankkeen tulokset antavat kuntapäätäjille luotettavaa tietoa ilmanvaihdon käyttöön liittyvien päätösten tueksi.

Julkaisuluettelo

Lestinen, S., Kilpeläinen, S., Kosonen, R., Valkonen, M., Jokisalo, J., Pasanen, P. (2021). Effects of Night Ventilation on Indoor Air Quality in Educational Buildings—A Field Study. *Applied Sciences*, Volume 11, Issue 9, 4056. <https://doi.org/10.3390/app11094056>.

Lestinen, S., Kilpeläinen, S., Valkonen, M., Kosonen, R., Jokisalo, J. (2021). Tilojen käytön ulkopuolisen ajan ilmanvaihdon vaikutus sisäilman laatuun koulu- ja päiväkotirakennuksissa. Sisäilmastoseminaari 2021. Ahola, M. & Merikari, A. (eds.). SIY SISÄILMATIETO OY, p. 107-112 (Sisäilmayhdistys raportti; no. 39).

Lestinen, S., Kilpeläinen, S., Kosonen, R., Jokisalo, J. (2021). Hiilidioksidipitoisuuden paikallinen ja ajallinen vaihtelu koulun luokkatilassa. Sisäilmastoseminaari 2021. Ahola, M. & Merikari, A. (eds.). SIY SISÄILMATIETO OY, p. 125-130 (Sisäilmayhdistys raportti; no. 39).

Lestinen, S., Kilpeläinen, S., Kosonen, R., Jokisalo, J. (2021). Impact of different mechanical ventilation strategies for night purging on indoor air quality in public buildings. In proceedings of HVAC 2021, Cold Climate HVAC & Energy 2021 in Tallinn, Estonia 18-21 April 2021, Paper ID: 108. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 246, p. 11003). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124611003>.

Lestinen, S., Kilpeläinen, S., Kosonen, R., Jokisalo, J. (2021). Effects of ventilation use in non-occupied conditions on indoor air quality. In proceedings of Roomvent 2020, Virtual Conference, February 15th, 2021, Paper ID: 1189.

Lestinen, S., Kilpeläinen, S., Kosonen, R., Jokisalo, J. (2020). Yöaikaisen ilmanvaihdon vaikutus sisäilman laatuun ja lämpöoloihin julkisissa rakennuksissa. Sisäilmastoseminaari 2020. Ahola, M. & Merikari, A. (eds.). SIY SISÄILMATIETO OY, p. 223-228 (Sisäilmayhdistys raportti; no. 38).

Tulevia julkaisuja:

Kilpeläinen, S., Lestinen, S., Kosonen, R., Valkonen, M., Jokisalo, J. (2022). Impact of night-time ventilation on indoor air quality in kindergartens and schools. In proceedings of REHVA 14th HVAC World Congress CLIMA 2022, 15th-18th May 2022, Rotterdam, The Netherlands.

Lestinen, S., Mustakallio P., Kosonen, R., Kilpeläinen, S., Jokisalo, J. (2022). Spatial and temporal effects of pollutant location on contaminant removal efficiency with night-time ventilation in a school classroom. In proceedings of REHVA 14th HVAC World Congress CLIMA 2022, 15th-18th May 2022, Rotterdam, The Netherlands.

Lestinen, S., Kilpeläinen, S., Kosonen, R., Valkonen, M., Jokisalo, J. (2021). Koneellisen yöilmanvaihdon vaikutus sisäilman laatuun päiväkotij- ja koulurakennuksissa. Rakennusfysiikka 2021 -seminaari, 26.-28.10.2021, Tampere.

Lähdeluettelo

- Adams, R. I., Tian, Y., Taylor, J. W., Bruns, T. D., Hyvärinen, A., & Täubel, M. (2015). Passive dust collectors for assessing airborne microbial material. *Microbiome*, 3(1), 1-11.
- Alanko, A. (2018). Ilmanvaihdon käyttötapojen ja käyttötasojen vaikutus sisäilmaan koulurakennuksissa, Kuopio: Koulutus- ja kehittämisspalvelu Aducate, Itä-Suomen yliopisto.
- Allen, J. ym. (2016). Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments. *Environmental Health Perspectives*, 124(6), pp. 805-812.
- Almeida, S. M., Canha, N., Silva, A., do Carmo Freitas, M., Pegas, P., Alves, C., ... & Pio, C. A. (2011). Children exposure to atmospheric particles in indoor of Lisbon primary schools. *Atmospheric Environment*, 45(40), 7594-7599.
- ANSYS. (2019a). ANSYS CFX-Solver Modeling Guide 2019 R3. ANSYS, Inc., Canonsburg, PA 15317, USA.
- ANSYS. (2019b). ANSYS CFD-Post User's Guide 2019 R3. ANSYS, Inc., Canonsburg, PA 15317, USA.
- ANSYS. (2019c). ANSYS ICEM CFD User's Manual 2019 R3. ANSYS, Inc., Canonsburg, PA 15317, USA.
- Artmann, N., Manz, H., & Heiselberg, P. (2007). Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in europe. *Applied Energy*, 84(2), 187-201.
- Asikainen, V., Pasanen, P. ja Kokotti, H. (2015). Yleisilmanvaihdon jaksottaisen käytön vaikutukset rakennusten paine-eroihin ja sisäilman laatuun. Espoo: SIY Raportti 33, SIY Sisäilmatieto Oy, 247 – 252
- Bakò-Birò, Z. ym. (2011). Ventilation rates in schools and pupils' performance. *Building and Environment*, Volume 48, pp. 1-9.
- Bask, W. (2019). Confirming the Functionality of Variable Air Volume Ventilation Systems with Field Studies. Master's Thesis. Aalto University.
- Bastuck, M., Baur, T., Richter, M., Mull, B., Schütze, A., & Sauerwald, T. (2018). Comparison of ppb-level gas measurements with a metal-oxide semiconductor gas sensor in two independent laboratories. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 273, 1037-1046.
- Batterman, S. (2017). Review and Extension of CO₂-Based Methods to Determine Ventilation Rates with Application to School Classrooms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(2), p. 145.
- Bivolarova, M., Kierat, W., Zavrl, E., Popiolek, Z., & Melikov, A. (2017). Effect of airflow interaction in the breathing zone on exposure to bio-effluents. *Building and Environment*, 125, 216-226.
- Black, T. R. (1993). Evaluating social science research – An introduction. SAGE Publications. ISBN 0-8039-8852-4.
- Blondeau, P., Spérandio, M., & Allard, F. (1997). Night ventilation for building cooling in summer. *Solar energy*, 61(5), 327-335.
- Blyussen, P. M., Cox, C., Seppänen, O., de Oliveira Fernandes, E., Clausen, G., Müller, B., & Roulet, C. A. (2003). Why, when and how do HVAC-systems pollute the indoor environment and what to do about it? The European AIRLESS project. *Building and Environment*, 38(2), 209-225.
- Borrego, C., Coutinho, M., Costa, A. M., Ginja, J., Ribeiro, C., Monteiro, A., . . . Miranda, A. I. (2015). Challenges for a new air quality directive: The role of monitoring and modelling techniques. *Urban Climate*, 14, 328-341. doi:10.1016/j.uclim.2014.06.007.

- Brown, S. K., Sim, M. R., Abramson, M. J., & Gray, C. N. (1994). Concentrations of volatile organic compounds in indoor air—a review. *Indoor air*, 4(2), 123-134.
- Cao, G., Awbi, H., Yao, R., Fan, Y., Sirén, K., Kosonen, R., & Zhang, J. J. (2014). A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings. *Building and environment*, 73, 171-186.
- Carrer, P., E. De Oliveira Fernandes, H. Santos, O. Hänninen, S. Kephelopoulou, and P. Wargocki. (2018). On the development of health-based ventilation guidelines: Principles and framework. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2018 (15):1360.
- CEN. (2001a). European Standard EN 12238:2001 Ventilation for buildings. Air terminal devices. Aerodynamic testing and rating for mixed flow application.
- CEN. (2001b). European Standard EN ISO 7726:2001 Ergonomics of the thermal environment. Instruments for measuring physical quantities (ISO 7726 1998)
- CEN. (2012). European Standard EN 12599:2012 Ventilation for buildings. Test procedures and measurement methods to hand over air conditioning and ventilation systems.
- CEN. (2007). European Standard EN 15251:2007 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.
- Chang, J. C., Foarde, K. K., & VanOsdell, D. W. (1996). Assessment of fungal (*Penicillium chrysogenum*) growth on three HVAC duct materials. *Environment International*, 22(4), 425-431.
- Chao, C. Y. H., & Hu, J. S. (2004). Development of a dual-mode demand control ventilation strategy for indoor air quality control and energy saving. *Building and Environment*, 39(4), 385-397.
- Chatzidiakou, L., Mumovic, D., & Summerfield, A. J. (2012). What do we know about indoor air quality in school classrooms? A critical review of the literature. *Intelligent Buildings International*, 4(4), 228-259.
- Chen, Q. (2009). Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. *Building and environment*, 44(4), 848-858.
- Chung, K. C., & Hsu, S. P. (2001). Effect of ventilation pattern on room air and contaminant distribution. *Building and Environment*, 36(9), 989-998.
- Clements-Croome, D. J., Awbi, H. B., Bakó-Biró, Z., Kochhar, N., & Williams, M. (2008). Ventilation rates in schools. *Building and Environment*, 43(3), 362-367.
- Coley, D. A., & Beisteiner, A. (2002). Carbon dioxide levels and ventilation rates in schools. *International journal of ventilation*, 1(1), 45-52.
- Daisey, J. M., Angell, W. J., & Apte, M. G. (2003). Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. *Indoor air*, 13(LBNL-48287).
- Diapouli, E., Chaloulakou, A., & Koutrakis, P. (2013). Estimating the concentration of indoor particles of outdoor origin: A review. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 63(10), 1113-1129.
- Ekberg, L. E. (1994). Volatile organic compounds in office buildings. *Atmospheric Environment*, 28(22), 3571-3575.
- Fanger, O. (2006). What is IAQ?. *Indoor air*, 16(5), 328-334.
- Fanger, P. O., Lauridsen, J., Bluyssen, P., & Clausen, G. (1988). Air pollution sources in offices and assembly halls, quantified by the olf unit. *Energy and Buildings*, 12(1), 7-19.
- Ferziger, J. H. and Peric M. (2002). *Computational methods for fluid dynamics*. 3rd edition, Springer-Verlag. ISBN 3-540-42074-6.
- Fingerroos, M., Kolari, S., Pasanen, P. ja Keskkikuru, T. (2005). Ilmanvaihdon jatkuvan toiminnan hyödyt. Espoo SIY Raportti 23, SIY Sisäilmatiето Oy, s. 101 – 107
- Fisk, W. J. (2017). The ventilation problem in schools: literature review. *Indoor Air*, 27(6), 1039-1051.
- Frankel, M., Timm, M., Hansen, E. W., & Madsen, A. M. (2012). Comparison of sampling methods for the assessment of indoor microbial exposure. *Indoor air*, 22(5), 405-414.

- Geiss, O., Giannopoulos, G., Tirendi, S., Barrero-Moreno, J., Larsen, B. R., and Kotzias, D. (2011). The AIRMEX study-VOC measurements in public buildings and schools/kindergartens in eleven European cities: Statistical analysis of the data. *Atmospheric Environment*, 45(22), 3676-3684.
- Geros, V., Santamouris, M., Tsangrasoulis, A., & Guarracino, G. (1999). Experimental evaluation of night ventilation phenomena. *Energy and Buildings*, 29(2), 141-154.
- Griffiths, M., & Eftekhari, M. (2008). Control of CO₂ in a naturally ventilated classroom. *Energy and Buildings*, 40(4), 556-560.
- Guo, R., Heiselberg, P., Hu, Y., Johra, H., Zhang, C., Jensen, R. L., . . . Peng, P. (2021). Experimental investigation of heat transfer for night cooling with diffuse ceiling ventilation. *Building and Environment*, , 107665.
- Haugland, R., & Vesper, S. (2002). U.S. Patent No. 6,387,652. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Haugland, R. A., Varma, M., Wymer, L. J., and Vesper, S. J. (2004). Quantitative PCR analysis of selected *Aspergillus*, *Penicillium* and *Paecilomyces* species. *Systematic and Applied Microbiology*, 27(2), 198-210.
- Haverinen-Shaughnessy, U., Moschandreas, D. J., and R. J. Shaughnessy. (2011). Association between substandard classroom ventilation rates and students' academic achievement. *Indoor Air* 21 (2):121–31.
- Haverinen-Shaughnessy, U. ym. (2015). An assessment of indoor environmental quality in schools and its association with health and performance. *Building and Environment*, 93(1), pp. 35-40.
- Herberger, S., Herold, M., Ulmer, H., Burdack-Freitag, A., & Mayer, F. (2010). Detection of human effluents by a MOS gas sensor in correlation to VOC quantification by GCMS. *Building and Environment*, 45(11), 2430-2439.
- Hodgson, A. T. (1995). A review and a limited comparison of methods for measuring total volatile organic compounds in indoor air. *Indoor Air*, 5(4), 247-257.
- Holopainen, R. (2004). Dust in ventilation ducts: accumulation, measurement and removal. Doctoral dissertation. Helsinki University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Laboratory of Heating, Ventilating and Air Conditioning. ISBN 951-22-6976-7.
- Holopainen, R., Asikainen, V., Pasanen, P., & Seppänen, O. (2002). The field comparison of three measuring techniques for evaluation of the surface dust level in ventilation ducts. *Indoor Air*, 12(1), 47-54.
- Hyvärinen, A., Marttila, T., Kero, P., Pekkanen, J., Ung-Lanki, S., Lampi, J., ... & Niemi, J. (2017). Avaimet terveelliseen ja turvalliseen rakennukseen (AVATER)–Yhteenvetoraportti. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 44/2017. Valtioneuvoston kanslia. ISBN 978-952-287-411-5.
- Kilpeläinen, S., Bask, W., Lestinen, S., Kosonen, R. (2021). Operational challenges of variable air volume ventilation systems and how to overcome them: a case study. In proceedings of Roomvent 2020, Virtual Conference - Starting on February 15th, 2021, Paper ID: 311.
- Koester, B. D., Sloane, S., Fujimoto, E. M., Fiese, B. H., & Su, L. Y. F. (2021). What Do Childcare Providers Know about Environmental Influences on Children's Health Implications for Environmental Health Literacy Efforts. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(10), 5489.
- Kokko, E., Ojanen, T., Salomaa, M., Hukka, A., & Viitanen, H. (1999). Puurakenteiden kosteustekninen toiminta. VTT, Espoo. ISBN 951-38-5499-X.
- Koskela, H., Häggbloom, H., Kosonen, R., & Ruponen, M. (2010). Air distribution in office environment with asymmetric workstation layout using chilled beams. *Building and Environment*, 45(9), 1923-1931.
- Kosonen, R., Ahola, M., Villberg, K., and Takki, T. (2011). Perceived IEQ conditions: Why the actual percentage of dissatisfied persons is higher than standards indicate?. In S. A. Abdul-Wahab (Ed.), *Sick Building Syndrome* (pp. 75-88). Springer Berlin Heidelberg.

- Kosonen, R., & Mustakallio, P. (2010). Ventilation in classroom: a Case-study of the performance of different air distribution methods. In Proceedings of 10th REHVA World Congress-Clima.
- Kärkkäinen, P. M., Valkonen, M., Hyvärinen, A., Nevalainen, A., and Rintala, H. (2010). Determination of bacterial load in house dust using qPCR, chemical markers and culture. *Journal of Environmental Monitoring*, 12(3), 759-768.
- Lampi, J., ja Pekkanen, J. (2018). Terve ihminen terveissä tiloissa: Kansallinen sisäilma ja terveys - ohjelma 2018–2028. Raportti 8 | 2018. THL. ISBN (verkko) 978-952-343-158-4. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-343-158-4>.
- Le Dreau, J., Heiselberg, P., & Jensen, R. L. (2013). Experimental investigation of convective heat transfer during night cooling with different ventilation systems and surface emissivities. *Energy and Buildings*, 61, 308-317.
- Leidinger, M., Sauerwald, T., Conrad, T., Reimringer, W., Ventura, G., & Schütze, A. (2014). Selective detection of hazardous indoor VOCs using metal oxide gas sensors. *Procedia Engineering*, 87, 1449-1452.
- Leino, K. (2020). Kemiaalliset tutkimusmenetelmät sisäilmaongelmien selvittämisen työkaluna. Työterveyslaitoksen esitys, sisäilmapajaX, 25.11.2020. Sisäilmayhdistys.
- Leppänen, H. K., Täubel, M., Jayaprakash, B., Vepsäläinen, A., Pasanen, P., & Hyvärinen, A. (2018). Quantitative assessment of microbes from samples of indoor air and dust. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 28(3), 231-241.
- Leppänen, M., Peräniemi, S., Koponen, H., Sippula, O., & Pasanen, P. (2020). The effect of the shoeless course on particle concentrations and dust composition in schools. *Science of The Total Environment*, 710, 136272.
- Li, Y., & Nielsen, P. V. (2011). CFD and ventilation research. *Indoor Air*, 21(6), 442-453.
- Licina, D., Melikov, A., Sekhar, C., & Tham, K. W. (2015). Transport of gaseous pollutants by convective boundary layer around a human body. *Science and Technology for the Built Environment*, 21(8), 1175-1186.
- Lynch, P. M., & Hunt, G. R. (2011). The night purging of a two-storey atrium building. *Building and Environment*, 46(1), 144-155.
- Mustakallio, P., & Kosonen, R. (2011). Modelling Indoor Climate in Classroom with Different Air Distribution Methods. In Proceedings of 12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate 2011. ISIAQ.
- Madureira, J., Alvim-Ferraz, M. C. M., Rodrigues, S., Gonçalves, C., Azevedo, M. C., Pinto, E., & Mayan, O. (2009). Indoor air quality in schools and health symptoms among Portuguese teachers. *Human and Ecological Risk Assessment*, 15(1), 159-169.
- Madureira, J. ym. (2015). Indoor air quality in Portuguese schools: levels and sources of pollutants. *Indoor Air*, 26(4), pp. 526-537.
- Maula, H., V. Hongisto, V. Naatula, A. Haapakangas, and H. Koskela. (2017). The effect of low ventilation rate with elevated bioeffluent concentration on work performance, perceived indoor air quality, and health symptoms. *Indoor Air* 27 (6):1141–53.
- Melikov, A. K. (2015). Human body micro-environment: The benefits of controlling airflow interaction. *Building and Environment*, 91, 70-77.
- Mendell, M. J., & Heath, G. A. (2005). Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor air*, 15(1), 27-52.
- Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, 32(8), 1598-1605.
- Mølhave, L. (1982). Indoor air pollution due to organic gases and vapours of solvents in building materials. *Environment international*, 8(1-6), 117-127.
- Montgomery, J. F., Storey, S., & Bartlett, K. (2015). Comparison of the indoor air quality in an office operating with natural or mechanical ventilation using short-term intensive pollutant monitoring. *Indoor and Built Environment*, 24(6), 777-787.

- Morawska, L., Ayoko, G. A., Bae, G. N., Buonanno, G., Chao, C. Y. H., Clifford, S., ... & Mazaheri, M. (2017). Airborne particles in indoor environment of homes, schools, offices and aged care facilities: The main routes of exposure. *Environment international*, 108, 75-83.
- Mundt, E., Mathisen, M. H., Nielsen, P. V. and Moser, A. (2004). Ventilation effectiveness. REHVA Guidebook no. 2, Federation of European Heating and Air-conditioning Associations.
- Müller, D., Kandzia, C., Kosonen, R., Melikov, A. K. and Nielsen, P. V. (2013). Mixing Ventilation. Guide on mixing air distribution design. Federation of European Heating and Air-Conditioning Associations, REHVA, ISBN 978-2-930521-11-4.
- Myatt, T. A., Johnston, S. L., Zuo, Z., Wand, M., Kebabze, T., Rudnick, S., & Milton, D. K. (2004). Detection of airborne rhinovirus and its relation to outdoor air supply in office environments. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 169(11), 1187-1190.
- Nielsen, P. V. (2015). Fifty years of CFD for room air distribution. *Building and Environment*, 91, 78-90.
- Nielsen, P.V., Allard, F., Awbi, H.B., Davidson, L., & Schälin, A. (2007). Computational fluid dynamics in ventilation design. REHVA Guidebook no 10. ISBN 2-9600468-9-7.
- Norbäck, D., Torgen, M., & Edling, C. (1990). Volatile organic compounds, respirable dust, and personal factors related to prevalence and incidence of sick building syndrome in primary schools. *Occupational and Environmental Medicine*, 47(11), 733-741.
- OAJ. (2017). Sisäilmatutkimus 2017. Verkko-julkaisu osoitteessa: <https://www.oaj.fi/cs/oaj/Sisailmatutkimus%202017>. Viitattu 12.5.2018.
- Ojanen, T., Vesanen, T., Kannari, L., Piira, K., Nykänen, E., Tuomainen, M., ... & Mattila, J. (2021). Sisäilma 2020: Hyvän sisäilman tekijöitä kouluissa ja päiväkodeissa. VTT Technology 388. ISBN 978-951-38-8748-3.
- Pasanen, P., Pasanen, A. L., & Jantunen, M. (1993). Water condensation promotes fungal growth in ventilation ducts. *Indoor Air*, 3(2), 106-112.
- Pasanen, P., Holopainen, R., Müller, B., Railio, J., Ripatti, H., Berglund, O., & Haapalainen, K. (2007). Cleanliness of ventilation systems. REHVA guidebook No. 8. ISBN 2-9600468-7-0.
- Patankar, S. V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw Hill. ISBN 0-89116-522-3.
- Pegas, P. N., Alves, C. A., Evtyugina, M. G., Nunes, T., Cerqueira, M., Franchi, M., ... & Freitas, M. C. (2011). Indoor air quality in elementary schools of Lisbon in spring. *Environmental Geochemistry and Health*, 33(5), 455-468.
- Salin, J. ym. (2017). Building-related symptoms are linked to the in vitro toxicity of indoor dust and airborne microbial propagules in schools: A cross-sectional study. *Environmental Research*, Volume 154, pp. 234-239.
- Salonen, H. (2009). Indoor air contaminants in office buildings. People and Work Research Reports 87, Finnish Inst. of Occupational Health, Helsinki, Finland. ISBN 978-951-802-909-3.
- Samet, J. M., Marbury, M. C., & Spengler, J. D. (1987). Health effects and sources of indoor air pollution. Part I. *American Review of Respiratory Disease*, 136(6), 1486-1508.
- Santamouris, M., & Kolokotsa, D. (2013). Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. *Energy and Buildings*, 57, 74-94.
- Schultealbert, C., Baur, T., Schütze, A., Böttcher, S., & Sauerwald, T. (2017). A novel approach towards calibrated measurement of trace gases using metal oxide semiconductor sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 239, 390-396.
- Schütze, A., Baur, T., Leidinger, M., Reimringer, W., Jung, R., Conrad, T., & Sauerwald, T. (2017). Highly sensitive and selective VOC sensor systems based on semiconductor gas sensors how to. *Environments*, 4(1), 20.
- Seppänen, O. (2008). Scientific basis for design of ventilation for health, productivity and good energy efficiency. In *Proceedings of the international conference on indoor air quality and climate*, Copenhagen, Denmark.
- Seppänen, O.A., and W.J. Fisk. (2004). Summary of human responses to ventilation. *Indoor Air* 14(S7):102-18.

- Seppänen, O.A., W.J. Fisk, and M.J. Mendell. (1999). Association of ventilation rates and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings. *Indoor Air* 9(4):226–52.
- Shaughnessy, R. J., Haverinen-Shaughnessy, U., Nevalainen, A., & Moschandreas, D. (2006). A preliminary study on the association between ventilation rates in classrooms and student performance. *Indoor air*, 16(6), 465-468.
- Shendell, D. G., Winer, A. M., Stock, T. H., Zhang, L., Zhang, J. J., Maberti, S., & Colome, S. D. (2004). Air concentrations of VOCs in portable and traditional classrooms: results of a pilot study in Los Angeles County. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 14(1), 44-59.
- Sisäilmäyhdistys ry. (2019). Mikrobikasvun edellytykset. Verkko-julkaisu osoitteessa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Mikrobit/Mikrobikasvun-edellytykset>. Viitattu 12.5.2021.
- Sisäilmäyhdistys. (2020). Perustietoa sisäilmasta: Epäpuhtaudet ja niiden torjunta. Verkko-julkaisu osoitteessa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Perustietoa-sisailmasta/Epapuhtaudet-ja-niiden-torjunta>. Viitattu 12.5.2021.
- Solgi, E., Hamedani, Z., Fernando, R., Skates, H., & Orji, N. E. (2018). A literature review of night ventilation strategies in buildings. *Energy and Buildings*, 173, 337-352.
- Sosiaali- ja Terveysministeriö. (2016). HTP-arvot 2016: Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja 2016:8, Helsinki. ISBN 978-952-00-3792-5.
- Springston, J.P., Horner, E. and Lstiburek, J. (2021). Indoor Air Quality in Nonindustrial Occupational Environments. In *Patty's Industrial Hygiene*, R. Harris (Ed.). <https://doi.org/10.1002/0471435139.hy065.pub3>.
- Sundell, J. (2004). On the history of indoor air quality and health. *Indoor air*, 14(s 7), 51-58.
- Sundell, J., Anderson, B., Anderson, K., & Lindvall, T. (1993). Volatile organic compounds in ventilating air in buildings at different sampling points in the buildings and their relationship with the prevalence of occupant symptoms. *Indoor Air*, 3(2), 82-93.
- Sundell, J., Levin, H., Nazaroff, W. W., Cain, W. S., Fisk, W. J., Grimsrud, D. T., ... & Weschler, C. J. (2011). Ventilation rates and health: multidisciplinary review of the scientific literature. *Indoor air*, 21(3), 191-204.
- Säteri, J., & Ahola, M. (2018). Sisäilmastoluokitus 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Espoo: Sisäilmäyhdistys.
- Tirkkonen, J. ym. (2016). Evaluation of sampling methods for toxicological testing of indoor air particulate matter. *Inhalation Toxicology*, 28(11), pp. 500-507.
- Tuomainen, M. ym. (2019). Julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohje ja Julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohjeen perustelumuuisto. Kuntien sisäilmaverkosto, Espoo, Helsinki, Jyväskylä, Kuopio, Lahti, Oulu, Tampere, Turku, Vantaa.
- Turunen, M., Toyinbo, O., Putus, T., Nevalainen, A., Shaughnessy, R., & Haverinen-Shaughnessy, U. (2014). Indoor environmental quality in school buildings, and the health and wellbeing of students. *International journal of hygiene and environmental health*, 217(7), 733-739.
- Viitanen, H., Vinha, J., Salminen, K., Ojanen, T., Peuhkuri, R., Paajanen, L., & Lähdesmäki, K. (2010). Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures. *Journal of Building Physics*, 33(3), 201-224.
- Wallace, L. A., Pellizzari, E. D., Hartwell, T. D., Davis, V., Michael, L. C., & Whitmore, R. W. (1989). The influence of personal activities on exposure to volatile organic compounds. *Environmental research*, 50(1), 37-55.
- Wargocki, P. (2021). What we know and should know about ventilation. *The REHVA European HVAC Journal*, volume 58, issue 2. pp. 5-13.
- Wargocki, P., J. Sundell, W. Bischof, G. Brundrett, P. O. Fanger, F. Gyntelberg, S. O. Hanssen, P. Harrison, A. Pickering, O. Seppänen, ym. (2002). Ventilation and health in non-industrial indoor environments: Report from a European Multidisciplinary Scientific Consensus Meeting (EUROVEN). *Indoor Air* 12 (2):113–28.

- Wargocki, P., and D. P. Wyon. (2007). The effects of moderately raised classroom temperatures and classroom ventilation rate on the performance of schoolwork by children (RP-1257). *HVAC&R Research* 13 (2):193–220.
- 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*, 10(4), 222-236.
- Wierzbicka, A., E. Pedersen, R. Persson, B. Nordquist, K. Stålné, C. Gao, L. E. Harderup, J. Borell, H. Caltenco, B. Ness, E. Stroh, Y. Li, M. Dahlblom, K. Lundgren-Kownacki, C. Isaxon, A. Gudmundsson, and P. Wargocki. (2018). Healthy indoor environments: The need for a holistic approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15(9):1874.
- World Health Organization. (2000). The right to healthy indoor air. World Health Organization.
- Wyon, D. P. (2004). The effects of indoor air quality on performance and productivity. *Indoor Air*, Volume 14, Issue Supplement s7, pp. 92–101.
- Yang, B., Melikov, A. K., Kabanshi, A., Zhang, C., Bauman, F. S., Cao, G., ... & Tham, K. W. (2019). A review of advanced air distribution methods-theory, practice, limitations and solutions. *Energy and Buildings*, 202, 109359.
- Yang, C. T., Liao, C. J., Liu, J. C., Den, W., Chou, Y. C., & Tsai, J. J. (2014). Construction and application of an intelligent air quality monitoring system for healthcare environment. *Journal of medical systems*, 38(2), 1-10.
- Ympäristöministeriö. (2012). D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma: Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, Määräykset ja ohjeet 2012. Rakennetun ympäristön osasto, ympäristöministeriö, Helsinki, Suomi.
- Ympäristöministeriö. (2017). 1009/2017 ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta.

LIITE I: Sisäilmastokysely

Aalto-yliopiston sisäilmastokysely

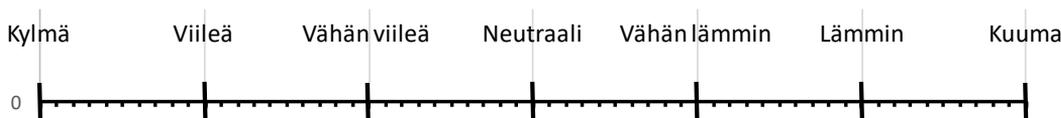
Tätä kysymykset merkitsemällä kynällä asteikkoon tai tekstillä siihen tarkoitettuun kohtaan. Vastausasteikko on portaaton, joten merkitse rasti/pystyviiva tuntemustasi parhaiten kuvaavaan kohtaan. Jätä täytetty vastauspaperi pöydällä olevaan kuoreen. Vastaan mielelläni kysymyksiin osoitteessa: sami.lestinen@aalto.fi. Kiitos osallistumisesta tutkimukseen.

Päiväys: _____

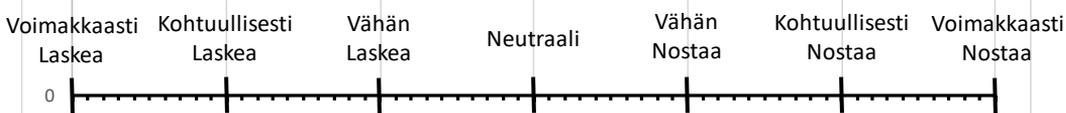
Aika: _____

Nainen [] Mies [] Ikä: _____ Huone: _____

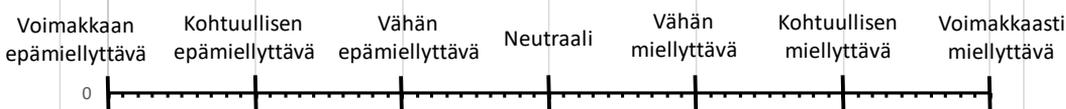
1. Miten arvioisit huoneen lämpötilaa ?



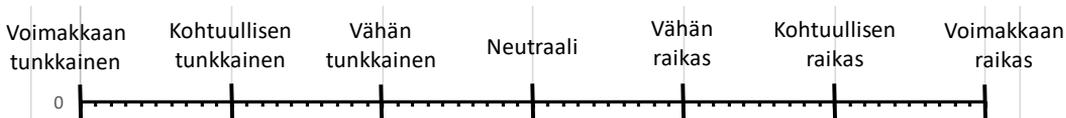
2. Pitäisikö huoneen lämpötilaa laskea tai nostaa ?



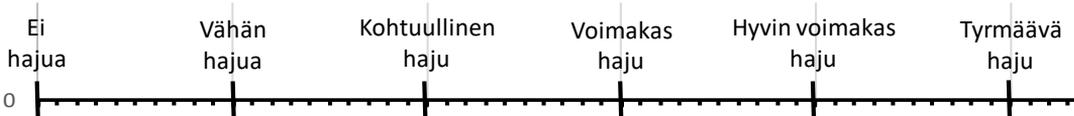
3. Aistitko ilman liikkeen miellyttävänä vai epämiellyttävänä vedon tunteena ?



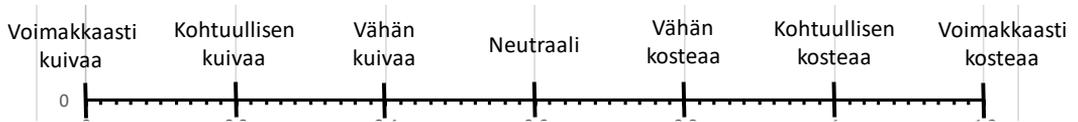
4. Tuntuuko huoneilma tunkkaiselta vai raikkaalta ?



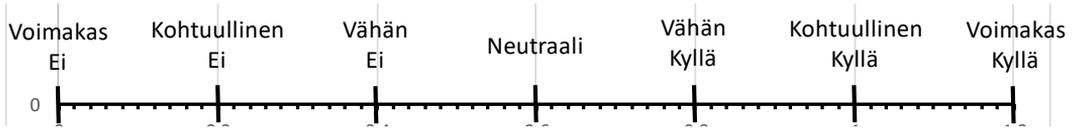
5. Onko huoneilma hajutonta ?



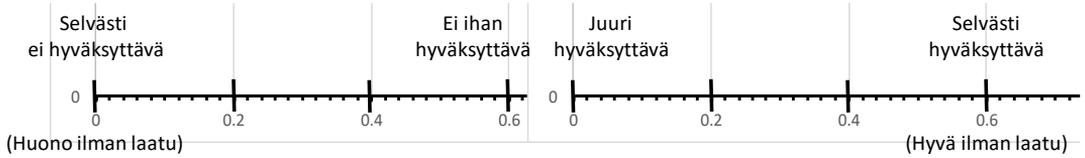
6. Onko huoneilma kuivaa vai kosteaa ?



7. Tuntuuko huoneilma puhtaalta hengittää ?



8. Onko huoneilman laatu tällä hetkellä mielestäsi hyväksyttävä ?



9. Tekeekö mielesi tehostaa ilmanvaihtoa ?

Ei Kyllä Miksi: _____

10. Onko lämpöoloihin tai sisäilman laatuun liittyviä kommentteja ?

LIITE II: Mitattuja suureita

Taulukko 17. Päiväkoti 1, mitattujen suureiden otoskeskiarvo, otoskeskihajonta, otoskeskiarvon keskivirhe ja suhteellinen muutos tarkastelujaksolla.

Päiväkoti 1	tiistai 21.05.2019 – 02.07.2019 (6 viikkoa)								Mitattuja suureita			
Vakioilmavirtainen järjestelmä: nopea, hidas ja seis												
	Testitapaus 1 (1 viikko)				Testitapaus 2 (1 viikko)				Testitapaus 3 (1 viikko)			
	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$
	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]
huoneilman lämpötila [°C]	24	0,6	0,0	0,0	25	1,1	0,0	3,0	25	0,9	0,0	3,6
ulkoilman lämpötila [°C]	13	3,2	0,1	0,0	21	4,7	0,1	63	19	4,1	0,1	50
huoneilman kosteus [%]	38	6,5	0,1	0,0	53	6,9	0,2	41	48	7,0	0,2	26
ulkoilman kosteus [%]	65	23	0,7	0,0	62	17	0,5	-4,0	59	19	0,6	-8,9
huoneilman hiilidioksidi [ppm]**	488	56	25	0,0	513	69	34	5,2	514	36	21	5,2

* Annetun suureen yksikkö. ** CO₂ pitoisuus arkena klo 08-16.

Taulukko 18. Koulu 1, mitattujen suureiden otoskeskiarvo, otoskeskihajonta, otoskeskiarvon keskivirhe ja suhteellinen muutos tarkastelujaksolla.

Koulu 1	torstai 11.04.2019–23.5.2019 (6 viikkoa)								Mitattuja suureita			
Vakioilmavirtajärjestelmä: nopea, hidas ja seis												
testitapaukset	Testitapaus 1 (1 viikko)				Testitapaus 2 (1 viikko)				Testitapaus 3 (1 viikko)			
tilastolliset muuttujat	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$
	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]
huoneilman lämpötila [°C]	21	0,7	0,0	0,0	21	0,4	0,0	1,9	22	0,4	0,0	2,9
ulkoilman lämpötila [°C]	5,4	4,4	0,1	0,0	9,1	4,6	0,1	68	9,7	2,9	0,1	78
huoneilman kosteus [%]	21	2,7	0,1	0,0	28	6,4	0,1	32	33	8,4	0,2	52
ulkoilman kosteus [%]	51	13	0,4	0,0	58	18	0,6	13	66	24	0,7	30
huoneilman hiilidioksidi [ppm]**	532	18	7,9	0,0	516	23	12	-2,9	543	29	13	2,1
Otsoni [ppm] x1E-3***	59	15	0,3	0,0	66	12	0,3	11	54	11	0,3	-9,7

* Annetun suureen yksikkö. ** CO₂ pitoisuus arkena klo 08-16. *** Otsonin PPM-arvo on kerrottu luvulla 1000.

Taulukko 19. Päiväkoti 2, mitattujen suureiden otoskeskiarvo, otoskeskihajonta, otoskeskiarvon keskivirhe ja suhteellinen muutos tarkastelujaksolla.

Päiväkoti 2	tiistai 11.06.2019 – 09.07.2019 (4 viikkoa)								Mitattuja suureita			
Tarpeenmukainen ilmanvaihto: CO ₂ , lämpötila, läsnäolo												
	Testitapaus 1 (1 viikko)				Testitapaus 2 (1 viikko)				Testitapaus 3 (1 viikko)			
	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$
	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]
huoneilman lämpötila [°C]	24	0,6	0,0	0,0	23	0,5	0,0	-3,2	-	-	-	-
ulkoilman lämpötila [°C]	17	3,7	0,1	0,0	17	3,1	0,1	-0,2	-	-	-	-
huoneilman kosteus [%]	45	6,8	0,2	0,0	44	7,7	0,2	-2,2	-	-	-	-
ulkoilman kosteus [%]	71	17	0,5	0,0	67	19	0,6	-4,8	-	-	-	-
huoneilman hiilidioksidi [ppm]**	527	21	9,5	0,0	478	17	7,5	-9,4	-	-	-	-

* Annetun suureen yksikkö. ** CO₂ pitoisuus arkena klo 08-16.

Taulukko 20. Koulu 2, mitattujen suureiden otoskeskiarvo, otoskeskihajonta, otoskeskiarvon keskivirhe ja suhteellinen muutos tarkastelujaksolla.

Koulu 2	keskiviikko 28.08.2019 – 25.09.2019 (4 viikkoa)								Mitattuja suureita			
Tarpeenmukainen ilmanvaihto: CO₂, lämpötila, läsnäolo												
testitapaukset	Testitapaus 1 (1 viikko)				Testitapaus 2 (1 viikko)				Testitapaus 3 (1 viikko)			
tilastolliset muuttujat	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$
	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]
Huoneilman lämpötila [°C]	23	0,4	0,0	0,0	21	0,2	0,0	-7,3	21	0,2	0,0	-8,0
Ulkoilman lämpötila [°C]	17	3,4	0,1	0,0	11	3,1	0,1	-33	6,3	3,0	0,1	-62
Huoneilman kosteus [%]	62	6,3	0,1	0,0	50	9,2	0,2	-20	37	3,7	0,1	-40
Ulkoilman kosteus [%]	85	14	0,4	0,0	83	11	0,3	-1,9	83	16	0,5	-2,3
Huoneilman CO ₂ [ppm]**	417	23	12	0,0	431	25	13	3,4	450	42	21	7,8
Otsoni [ppm] x1E-3***	3,6	7,0	0,2	0,0	10	8,6	0,2	169	15	9,2	0,2	299

* Annetun suureen yksikkö. ** CO₂ pitoisuus arkena klo 08-16. *** Otsonin PPM-arvo on kerrottu luvulla 1000.

Taulukko 21. Päiväkoti 3, mitattujen suureiden otoskeskiarvo, otoskeskihajonta, otoskeskiarvon keskivirhe ja suhteellinen muutos tarkastelujaksolla.

Päiväkoti 3	maanantai 04.11.2019 – 02.12.2019 (4 viikkoa)								Mitattuja suureita			
Tarpeenmukainen ilmanvaihto: CO₂, lämpötila, läsnäolo												
testitapaukset	Testitapaus 1 (1 viikko)				Testitapaus 2 (1 viikko)				Testitapaus 3 (1 viikko)			
tilastolliset muuttujat	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$
	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]
huoneilman lämpötila [°C]	21	0,3	0,0	0,0	21	0,2	0,0	0	21	0,4	0,0	0,8
ulkoilman lämpötila [°C]	4,3	3,5	0,1	0,0	3,0	3,2	0,1	-30	0,8	2,9	0,1	-82
huoneilman kosteus [%]	39	6,9	0,2	0,0	34	7,8	0,2	-15	31	5,8	0,1	-20
ulkoilman kosteus [%]	94	5,9	0,2	0,0	82	9,5	0,3	-12	91	5,6	0,2	-2,6
huoneilman hiilidioksidi [ppm]**	541	5,3	2,6	0,0	523	13	6,6	-3,3	510	13	6,6	-5,8
otsoni [ppm] x1E-3***	30	7	0,2	0,0	34	6	0,1	12	43	21	0,5	44

* Annetun suureen yksikkö. ** CO₂ pitoisuus arkena klo 08-16. *** Otsonin PPM-arvo on kerrottu luvulla 1000.

Taulukko 22. Koulu 3, mitattujen suureiden otoskeskiarvo, otoskeskihajonta, otoskeskiarvon keskivirhe ja suhteellinen muutos tarkastelujaksolla.

Koulu 3	maanantai 30.09.2019–11.11.2019 (6 viikkoa)								Mitattuja suureita			
Vakioilmavirtajärjestelmä: nopea, hidas ja seis												
testitapaukset	Testitapaus 1 (1 viikko)				Testitapaus 2 (1 viikko)				Testitapaus 3 (1 viikko)			
tilastolliset muuttujat	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$
	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]
huoneilman lämpötila [°C]	19	0,5	0,0	0,0	20	0,7	0,0	2	19	0,5	0,0	-2
ulkoilman lämpötila [°C]	6	3,0	0,1	0,0	7	3,6	0,1	16	0	3,9	0,1	-95
huoneilman kosteus [%]	41	5,0	0,1	0,0	43	6,8	0,2	3	29	8,7	0,2	-31
ulkoilman kosteus [%]	96	7,2	0,2	0,0	94	8,6	0,3	-2	87	19	0,6	-9
huoneilman hiilidioksidi [ppm]**	500	55	24	0,0	566	88	39	13	556	99	44	11
Tuloilman lämpötila [°C]	20	0,3	0,0	0,0	20	0,2	0,0	0	20	0,3	0,0	-1
Tuloilman kosteus [%]	40	5,6	0,1	0,0	42	8,0	0,2	3	27	9,2	0,2	-32
Otsoni [ppm] x1E-3***	10	12	0,3	0,0	25	8	0,2	152	22	11	0,2	123

* Annetun suureen yksikkö. ** CO₂ pitoisuus arkena klo 08-16. *** Otsonin PPM-arvo on kerrottu luvulla 1000.

Taulukko 23. Päiväkoti 4, mitattujen suureiden otoskeskiarvo, otoskeskihajonta, otoskeskiarvon keskimääräinen ja suhteellinen muutos tarkastelujaksolla.

Päiväkoti 4	keskiviikko 15.01.2020 – 26.02.2020 (6 viikkoa)								Mitattuja suureita			
Vakioilmavirtajärjestelmä												
testitapaukset	Testitapaus 1 (1 viikko)				Testitapaus 2 (1 viikko)				Testitapaus 3 (1 viikko)			
tilastolliset muuttujat	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$
	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]
huoneilman lämpötila [°C]	23	0,3	0,0	0,0	23	0,4	0,0	-0,6	22	0,3	0,0	-1,6
ulkoilman lämpötila [°C]	3,8	1,5	0,0	0,0	0,0	3,1	0,1	-100	2,5	2,4	0,1	-34
huoneilman kosteus [%]	32	3,2	0,1	0,0	27	5,2	0,1	-14	30	3,6	0,1	-4,9
ulkoilman kosteus [%]	91	13	0,4	0,0	95	9,1	0,3	4,4	97	4,9	0,2	6,4
huoneilman hiilidioksidi [ppm]**	548	5,8	2,9	0,0	578	35	17	5,6	505	45	22	-7,7
Tuloilman lämpötila [°C]	21	1,2	0,0	0,0	21	0,1	0,0	-4,6	21	1,2	0,0	-4,5
Tuloilman kosteus [%]	32	3,5	0,1	0,0	28	5,8	0,1	-11	32	4,4	0,1	-1,1
ulkovaipan paine-ero [Pa]	0,5	2,3	0,1	0,0	2,2	1,9	0,1	356	1,2	4,0	0,2	136
Ilmanvaihdon käynti $\sum(\Delta p^* \Delta t)$	661 [Pa*h]		0,1	0,0	1276 [Pa*h]		0,1	93	878 [Pa*h]		0,2	33

* Annetun suuren yksikkö. ** CO₂ pitoisuus arkena klo 08-16.

Taulukko 24. Koulu 4, mitattujen suureiden otoskeskiarvo, otoskeskihajonta, otoskeskiarvon keskimääräinen ja suhteellinen muutos tarkastelujaksolla.

Koulu 4	keskiviikko 22.01.2020 – 04.03.2020 (6 viikkoa)								Mitattuja suureita			
Muuttuvilmavirtajärjestelmä												
testitapaukset	Testitapaus 1 (1 viikko)				Testitapaus 2 (1 viikko)				Testitapaus 3 (1 viikko)			
tilastolliset muuttujat	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$
	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]
huoneilman lämpötila [°C]	20	0,3	0,0	0,0	20	0,3	0,0	-2,0	20	0,4	0,0	-0,9
ulkoilman lämpötila [°C]	1,9	1,6	0,1	0,0	1,2	3,2	0,1	-36	0,1	3,4	0,1	-94
huoneilman kosteus [%]	29	3,3	0,1	0,0	28	5,5	0,1	-4,7	25	6,3	0,1	-15
ulkoilman kosteus [%]	85	10	0,3	0,0	85	12	0,4	-0,1	79	17	0,6	-7,5
huoneilman hiilidioksidi [ppm]**	538	81	41	0,0	494	74	37	-8,2	535	78	39	-0,6
Tuloilman lämpötila [°C]	20	0,4	0,0	0,0	19	0,1	0,0	-2,8	20	0,4	0,0	-1,1
Tuloilman kosteus [%]	29	4,3	0,1	0,0	28	5,9	0,1	-2,3	25	7,2	0,2	-12
ulkovaipan paine-ero [Pa]	-2,5	2,0	0,1	0,0	-2,5	3,3	0,2	-0,8	-2,5	2,3	0,1	-0,4
Ilmanvaihdon käynti $\sum(\Delta p^* \Delta t)$	404 [Pa*h]		0,1	0,0	858 [Pa*h]		0,0	113	536 [Pa*h]		0,1	33

Taulukko 25. Päiväkoti 5, mitattujen suureiden otoskeskiarvo, otoskeskihajonta, otoskeskiarvon keskimääräinen ja suhteellinen muutos tarkastelujaksolla.

Päiväkoti 5	keskiviikko 19.08.2020 – 30.09.2020 (6 viikkoa)								Mitattuja suureita			
Vakioilmavirtajärjestelmä												
testitapaukset	Testitapaus 1 (1 viikko)				Testitapaus 2 (1 viikko)				Testitapaus 3 (1 viikko)			
tilastolliset muuttujat	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$
	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]
huoneilman lämpötila [°C]	23	0,8	0,0	0,0	22	0,2	±0,0	-6,8	21	0,3	0,0	-8,6
ulkoilman lämpötila [°C]	17	3,9	0,2	0,0	14	2,6	±0,2	-20	11	3,1	0,2	-37
huoneilman kosteus [%]	53	4,1	0,2	0,0	56	6,2	±0,3	6,5	46	6,5	0,3	-13
ulkoilman kosteus [%]	78	17	1,1	0,0	88	9,3	±0,6	13	80	14	0,9	3,3
huoneilman hiilidioksidi [ppm]**	556	10	16	0,0	567	36	±57	1,9	535	27	43	-3,8
Tuloilman lämpötila [°C]	23	1,5	0,1	0,0	21	0,2	±0,0	-6,8	21	0,6	0,0	-8,7
Tuloilman kosteus [%]	53	6,2	0,3	0,0	57	7,6	±0,3	6,8	46	7,6	0,3	-15
ulkovaipan paine-ero [Pa]	-3,0	2,0	0,2	0,0	-2,1	1,0	±0,1	-30	-3,1	2,1	0,2	2,9
Ilmanvaihdon käynti $\sum(\Delta p^* \Delta t)$	125 [Pa*h]		0,1	0,0	305 [Pa*h]		±0,0	145	180 [Pa*h]		0,1	45

* Annetun suuren yksikkö. ** CO₂ pitoisuus arkena klo 08-16.

Taulukko 26. Koulu 5, mitattujen suureiden otoskeskiarvo, otoskeskihajonta, otoskeskiarvon keskivirhe ja suhteellinen muutos tarkastelujaksolla.

Koulu 5	keskiviikko 26.08.2020 – 07.10.2020 (6 viikkoa)								Mitattuja suureita			
Muuttuvailmavirtajärjestelmä (käyntiajan epävarmuus ±1 h)												
testitapaukset	Testitapaus 1 (1 viikko)				Testitapaus 2 (1 viikko)				Testitapaus 3 (1 viikko)			
tilastolliset muuttujat	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$
	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]
huoneilman lämpötila [°C]	23	0,5	0,0	0,0	22	0,4	0,0	-4,8	22	0,3	0,0	-3,8
ulkoilman lämpötila [°C]	13	3,2	0,1	0,0	13	2,2	0,1	0,9	13	1,9	0,1	-0,7
huoneilman kosteus [%]	47	4,1	0,1	0,0	52	7,1	0,2	11	55	3,6	0,1	17
ulkoilman kosteus [%]	84	16	0,5	0,0	82	15	0,5	-2,1	89	8,5	0,3	6,1

Taulukko 27. Yliopistorakennus, mitattujen suureiden otoskeskiarvo, otoskeskihajonta, otoskeskiarvon keskivirhe ja suhteellinen muutos tarkastelujaksolla.

Yliopistorakennus	torstai 04.04.2019 – 16.5.2019 (6 viikkoa)								Mitattuja suureita			
Tarpeenmukainen ilmanvaihto: CO₂, lämpötila, ilmanvaihdon tehostus (käyntiajan epävarmuus ±1 h)												
	Testitapaus 1 (normaali, 1 viikko)				Testitapaus 2 (jatkuva, 1 viikko)				Testitapaus 3 (jaksottainen, 1 viikko)			
tilastolliset muuttujat	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$	$\bar{\phi}$	s_{n-1}	$s_{\bar{\phi}}$	$\Delta\bar{\phi}/\bar{\phi}$
	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]	[*]	[*]	[*]	[%]
huoneilman lämpötila [°C]	22	0,4	0,0	0,0	21	0,7	0,0	-3,3	21	0,9	0,0	-2,9
ulkoilman lämpötila [°C]	3,1	4,1	0,1	0,0	9,6	5,0	0,2	211	4,5	3,3	0,1	46
huoneilman kosteus [%]	27	4,4	0,1	0,0	32	3,9	0,1	20	30	4,7	0,1	11
ulkoilman kosteus [%]	71	20	0,6	0,0	59	20	0,6	-18	72	19	0,6	1,3
huoneilman hiilidioksidi [ppm]**	594	26	12	0,0	573	35	20	-3,6	546	56	28	-8,1
Otsoni [ppm] x1E-3***	36	13	0,3	0,0	92	17	0,4	154	54	17	0,4	49

* Annetun suureen yksikkö. ** CO₂ pitoisuus arkena klo 08-16. *** Otsonin PPM-arvo on kerrottu luvulla 1000.

LIITE III: Ilmanvaihdon aikatauluja

Taulukko 28 esittää testitapaukset mittauskohteittain. Testitapaukset vaihtelivat ilmanvaihtojärjestelmien rajoitusten mukaisesti. Kaikissa kokeissa on lähtökohtana ollut se, että ilmanvaihdon ohjauksella ei missään tilanteissa heikennetä lasten ja henkilökunnan sisäilmasto-olosuhteita. Sen vuoksi osa kohteista mitattiin ainoastaan kahdella testitapauksella.

Taulukko 28. Kohteissa tutkittavat 2 viikkoa kestävät testitapaukset (Testi 1-3).

Yliopisto 1 torstai 04.04.2019 – 16.5.2019 (6 viikkoa)			
Yliopistorakennus: rakennettu 1964, remontoitu 2015, ryhmätyötilan pinta-ala 39,5 m ² , hlö 3-5			
Ilmanvaihtokoneen käyntiaika (epävarmuus ±1 h) Muuttuvilmavirtainen järjestelmä, jossa ilmanvaihtoa ohjaava suure on CO ₂ , ilman lämpötila tai seinävalitsin tehostukselle. VAVmax 4 L/s,m ²			
Testijakso		Arkena	Viikonloppuna
Testi 1	Normaali	ma-pe 06-17	-
Testi 2	Jatkuva	ma-pe 00-24	00-24
Testi 3	Jaksottainen	ma-pe 06-17 + 19-21 + 02-04	02-05 + 10-13 + 18-21
Koulu 1 torstai 11.04.2019 – 23.5.2019 (6 viikkoa)			
Ala-aste: rakennettu 1953, remontoitu 2012, luokan lattiapinta-ala 65 m ² , 20-30 hlö			
Ilmanvaihtokoneen käyntiaika (epävarmuus ±1 h) Vakioilmavirtainen järjestelmä, jossa ilmanvaihtoa ohjaavat järjestelmäasetukset ovat nopea (100%), hidas (50%) ja seis. CAVmax 2,4 L/s,m ²			
Testijakso		Arkena	Viikonloppuna
Testi 1	Normaali	ma-ti 05:30-20:00 (nopea -->19:30) ke-pe 05:30-18:00 (nopea -->15:30)	06:00-18:00 (nopea -->15:30)
Testi 2	Jatkuva 1	ma-pe 00-24 (nopea)	00-24 (nopea)
Testi 3	Jatkuva 2	käyttäjän ulkopuolella hidas käynti	käyttäjän ulkopuolella hidas käynti
Päiväkoti 1 tiistai 21.05.2019 – 02.07.2019 (6 viikkoa)			
Päiväkoti: rakennettu 2012, ryhmähuoneen lattiapinta-ala 21 m ² , hlö 5-10			
Ilmanvaihtokoneen käyntiaika (epävarmuus ±1 h) Vakioilmavirtainen järjestelmä, jossa ilmanvaihtoa ohjaavat järjestelmäasetukset ovat nopea (100%), hidas (50%) ja seis. CAVmax 3 L/s,m ²			
Testijakso		Arkena	Viikonloppuna
Testi 1	Normaali	ma-pe 05-18 (nopea 5:30 -->18)	-
Testi 2	Jatkuva	ma-pe 00-24	00-24
Testi 3	Jaksottainen	ma-pe klo 5-18 + 20-22 + 01-03	02-05 + 10-13 + 18-21
Päiväkoti 2 tiistai 11.06.2019 – 09.07.2019 (4 viikkoa)			
Päiväkoti: rakennettu 2014, leikkihuoneen lattiapinta-ala 35,7 m ² , hlö 5-10			
Ilmanvaihtokoneen käyntiaika muuttuvilmavirtajärjestelmä: CO ₂ , lämpötila, läsnäolo-anturit, MIVmax 2,8 L/s,m ²			
Testijakso		Arkena	Viikonloppuna
Testi 1	Jatkuva, min.	ma-pe 00-24 ylläpito minimi-ilmavirralla	00-24 ylläpito minimi-ilmavirralla
Testi 2	Jatkuva, max.	ma-pe 00-24 ylläpito maksimi-ilmavirralla	00-24 ylläpito maksimi-ilmavirralla
Koulu 2 keskiviikko 28.08.2019 – 25.09.2019 (4 viikkoa)			
Koulu: rakennettu 2012, luokan lattiapinta-ala 87,5 m ² , hlö 20-30			
Ilmanvaihtokoneen käyntiaika (epävarmuus ±1 h) muuttuvilmavirtajärjestelmä: CO ₂ , lämpötila, läsnäolo-anturit, MIVmax 3,5 L/s,m ²			
Testijakso		Arkena	Viikonloppuna

Testi 1	Jatkuva	ma-pe 00-24	00-24
Testi 2	Jaksottainen	ma-pe klo 5-18 + 20-22 + 01-03 muuna aikana minimi-ilmavirta	02-05 + 10-13 + 18-21 muuna aikana minimi-ilmavirta
Koulu 3 maanantai 30.09.2019 – 11.11.2019 (6 viikkoa)			
Koulu: rakennettu 2006, remontoitu 2014, luokan lattiapinta-ala ~65 m ² , hlö 20-30			
Ilmanvaihtokoneen käyntiaika (epävarmuus ±1 h). vakioilmavirtajärjestelmä: nopea (1/1), hidas (1/2), seis, CAVmax 3 L/s,m ²			
Testijaksot		Arkena	Viikonloppuna
Testi 1	Normaali	ma 05-18 (1/1) ti-pe 06-18 (1/1)	14-15 (1/1)
Testi 2	Jatkuva	ma-pe 00-24 (1/1)	00-24 (1/1)
Testi 3	Jaksottainen	ma 01-03 + 05-18 + 20-22 (1/1) ti-pe 01-03 + 06-18 + 20-22 (1/1)	02-05 + 10-13 + 18-21 (1/1)
Päiväkoti 3 maanantai 04.11.2019 – 02.12.2019 (4 viikkoa)			
Päiväkoti käytössä 24 h/vrk: rakennettu 2012, Leikki ja nukkumatilaa lattiapinta-ala 33,5 m ² , hlö 10-15			
Ilmanvaihtokoneen käyntiaika muuttuvailmavirtajärjestelmä: CO ₂ , lämpötila ja läsnäoloanturit, tilan ylläpitoilmavirta 1,5 L/s,m ² .			
Testijaksot		Arkena	Viikonloppuna
Testi 1	Normaali	ma-pe 00-24	00-24
Testi 2	Normaali	ma-pe 00-24	00-24
Päiväkoti 4 keskiviikko 15.01.2020 – 26.02.2020 (6 viikkoa)			
Päiväkoti: rakennettu 2015, leikkihuoneen lattiapinta-ala 37 m ² , hlö 10-20			
Ilmanvaihtokoneen käyntiaika (epävarmuus ±1 h) vakioilmavirtajärjestelmä: CAVmax 3 L/s,m ²			
Testijaksot		Arkena	Viikonloppuna
Testi 1	Normaali	03:00-17:00	04:00-17:00
Testi 2	Jatkuva	00-24	00-24
Testi 3	Jaksottainen	04-20 + 22-01	00-04 + 08-12 + 16-20
Koulu 4 keskiviikko 22.01.2020 – 04.03.2020 (6 viikkoa)			
Ala-aste: rakennettu 2013 luokan lattiapinta-ala 40 m ² , hlö 10-20			
Ilmanvaihtokoneen käyntiaika (epävarmuus ±1 h) muuttuvailmavirtajärjestelmä: MIVmax 3 L/s,m ²			
Testijaksot		Arkena	Viikonloppuna
Testi 1	Normaali	ma-klo 4-18, ti-pe 5-18 IV-poikkeuskäyttöä myös illalla	1h/vrk
Testi 2	Jatkuva	ma-pe 00-24	00-24
Testi 3	Jaksottainen	ma-pe normaali + 20-22 + 00-02	02-05 + 10-13 + 18-21
Päiväkoti 5 keskiviikko 19.08.2020 – 30.09.2020 (6 viikkoa)			
Päiväkoti: rakennettu 2003, leikkihuoneen lattiapinta-ala 30 m ² , hlö 5-15			
Ilmanvaihtokoneen käyntiaika (epävarmuus ±1 h) vakioilmavirtajärjestelmä: CAVmax 3,5 L/s,m ²			
Testijaksot		Arkena	Viikonloppuna
Testi 1	Normaali	ma 04:30-21 + ti-pe 05:30-21	16-17
Testi 2	jatkuva	ma-pe 00-24	00-24
Testi 3	jaksottainen	ma 04:30-21:00 + 01-03 ti-pe 05:30-21:00 + 01-03	02-05 + 10-13 + 18-21
Koulu 5 keskiviikko 26.08.2020 – 07.10.2020 (6 viikkoa)			
yläaste: rakennettu 1975, remontoitu 2014, luokan lattiapinta-ala 42 m ² , hlö 20-25			
Ilmanvaihtokoneen käyntiaika (epävarmuus ±1 h) muuttuvailmavirtajärjestelmä: MIVmax: 3,6 L/s,m ²			
koulu		Arkena	Viikonloppuna

Testi 1	Normaali	ma 05-17 + ti-pe 06-17	-
Testi 2	jatkuva	ma-pe 00-24, yö maksimi	00-24
Testi 3	jatkuva	ma-pe 00-24, yö minimi	00-24



ISBN 978-952-64-0413-4 (painettu)
ISBN 978-952-64-0414-1 (pdf)
ISSN 1799-487X (painettu)
ISSN 1799-4888 (pdf)

Aalto-yliopisto
Insinööritieteiden korkeakoulu
Konetekniikan laitos
www.aalto.fi

**KAUPPA +
TALOUS**

**TAIDE +
MUOTOILU +
ARKKITEHTUURI**

**TIEDE +
TEKNOLOGIA**

CROSSOVER

**DOCTORAL
DISSERTATIONS**