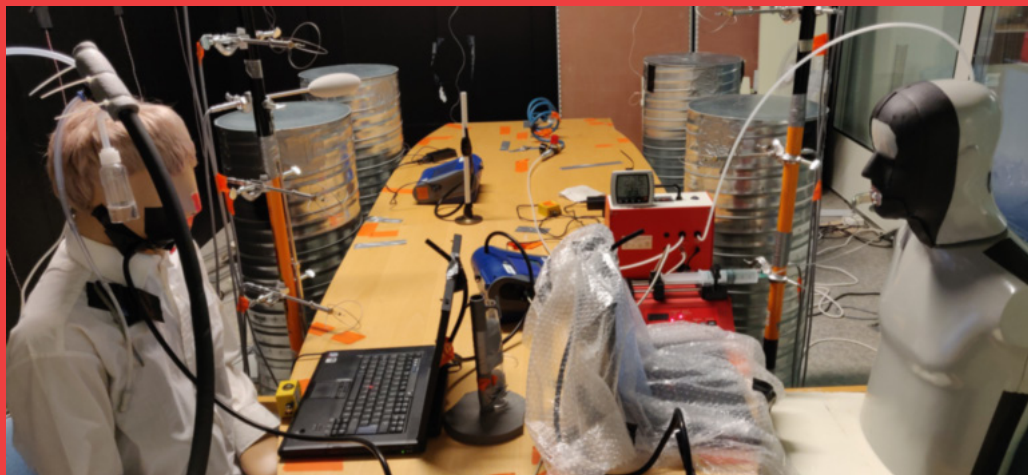


Työntekijöiden suojaaminen ilmavälitteisiä taudinaiheuttajia vastaan toimistoympäristössä

Työsuojelurahaston tutkimushanke 210099 (SUOJAILMA)

Sami Lestinen, Simo Kilpeläinen, Risto Kosonen



Työntekijöiden suojaaminen ilmavälitteisiä taudinaiheuttajia vastaan toimistoympäristössä

Työsuojelurahaston tutkimushanke #210099
(SUOJAILMA)

Sami Lestinen, Simo Kilpeläinen, Risto Kosonen

Aalto-yliopiston julkaisusarja
TIEDE + TEKNOLOGIA 3/2023

© 2023 Sami Lestinen, Simo Kilpeläinen, Risto Kosonen

ISBN 978-952-64-1187-3 (pdf)

ISSN 1799-4888 (pdf)

<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-64-1187-3>

Unigrafia Oy
Helsinki 2023

Author

Sami Lestinen, Simo Kilpeläinen, Risto Kosonen

Name of the publication

Protecting workers against airborne transmission of pathogens in office environments

Publisher School of Engineering**Unit** Department of Mechanical Engineering**Series** Aalto-yliopiston julkaisusarja TIEDE + TEKNOLOGIA 3/2023**Field of research** HVAC technology**Language** Finnish**Abstract**

The COVID pandemic showed that airborne transmission is an important route for pathogen spreading among office workers. People carrying pathogens may be completely unaware of it so protection against airborne transmission is important in office environments. Different face masks became familiar for most as a protection method during the recent pandemic but there are also other means to protect people such as air purifiers and partitions acting as flow obstruction. Also, air distribution can be used to reduce contaminant concentrations in the occupied zone.

In this Finnish Work Environment Fund project laboratory measurements and computer simulations were used to study the effect of air purifiers, masks, and air distribution onto pathogen exposure when an infected person spreads aerosols in a room either through breathing or coughing. A coughing machine and a breathing thermal manikin were used to spread and receive aerosols, respectively. Airborne pathogens were modelled with paraffin oil -based aerosol and MS2 viruses, and effectiveness of different protection methods was studied. Additionally, ventilation effectiveness and contaminant removal efficiency were investigated with SF₆ as a marker gas. Computer simulations were conducted with CFD.

The measurement results showed that masks and air purifiers were the best means of protection against pathogens transmitted via breathing whereas flow obstruction with e.g. partitions or the infector wearing a mask or visor was effective against coughing. With mixing ventilation contaminant concentrations were similar throughout the occupied zone but displacement ventilation introduced both temporal and spatial differences. Both the best and the worst local concentrations were achieved with displacement ventilation. CFD simulations showed that in a large open office an infector at the center of the space spreads contaminants efficiently in all directions. When the infector was seated in the corner, the contaminants became attached to walls and moved alongside them outside the occupied zone. As expected, the best situation was when the infector sat near the exhaust. Even with an undersized (purifier airflow equal to space supply airflow) air purifier, the size of high-concentration zones in the open office could be clearly reduced.

It can be deduced from the results that there are many effective ways to protect workers against airborne transmission of pathogens in office environments, and the best outcome can be achieved by combining them. Masks can prevent pathogens from entering the space, air purifiers remove pathogens already in the space or entering it, and flow obstruction with e.g. partitions prevents fast-moving pathogens originating from coughs and sneezes from reaching the exposed person. Proper air distribution on the other hand helps transfer the pathogens away from the occupied zone.

Keywords Infectious diseases, airborne transmission, air purification, masks, indoor air**ISBN (printed)****ISBN (pdf)** 978-952-64-1187-3**ISSN (printed)****ISSN (pdf)** 1799-4888**Location of publisher** Helsinki**Location of printing** Helsinki **Year** 2023**Pages** 130**urn** <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-64-1187-3>

Tekijä

Sami Lestinen, Simo Kilpeläinen, Risto Kosonen

Julkaisun nimi

Työntekijöiden suojaaminen ilmajäljätteistä taudinaiheuttajia vastaan toimistoympäristössä

Julkaisija Insinööritieteiden korkeakoulu**Yksikkö** Konetekniikan laitos**Sarja** Aalto-yliopiston julkaisusarja TIEDE + TEKNOLOGIA 3/2023**Tutkimusala** LVI-tekniikka**Kieli** Suomi**Tiivistelmä**

Koronapandemia osoitti, että ilmajäljetteinen altistuminen on toimistotyöntekijöillä merkittävä infektioiden tartuntareitti. Tautia kantavat henkilöt eivät välttämättä edes tiedä olevansa sairaana, joten ilmajäljetteisiltä taudinaiheuttajilta suojautuminen on toimistoympäristössä tärkeää. Erityyppiset kasvomaskit tulivat korona-aikana useimmille tutuiksi suojamenetelmänä, mutta suojautumiseen on olemassa myös muita keinoja, kuten erilaisia ilmanpuhdistimia ja virtausesteinä toimivia sermejä. Lisäksi ilmanvaihdon avulla on mahdollista pienentää epäpuhtauspitoisuuksia oleskeluvyöhykkeellä.

Tässä Työsuojelurahaston hankkeessa tarkasteltiin laboratoriomittausten ja tietokonemallinnuksen keinoin ilmanpuhdistimien, maskien ja ilmanjaon vaikutuksia taudinaiheuttajille altistumiseen, kun infektoitunut henkilö levittää aerosoleja huoneessa joko hengityksen välityksellä tai yskimällä. Aerosolien levittämisessä ja niiden vastaanotossa käytettiin yskimiskonetta ja hengittävää lämpönukkea. Ilmajäljetteisiä taudinaiheuttajia jäljiteltiin parafiniöljypohjaisella aerosolilla ja MS2-viirillä, joilla tutkittiin erilaisten suodatus- ja puhdistusratkaisujen tehokkuutta. Lisäksi ilmanvaihdon tehokkuutta ja epäpuhtauksien poistotehokkuutta tutkittiin SF6-kaasulla tehdyillä merkkiainemittauksilla. Tietokonemallinnukset tehtiin CFD-simulointeja käyttäen.

Mittaustulokset osoittivat, että hengityksen välityksellä tilaan vapautuvilta epäpuhtauksilta suojasivat parhaiten maskit ja ilmanpuhdistimet, kun taas virtausesteet kuten sermit ja infektoituneen pitämä maski sekä visiiri olivat tehokkaita yskimistä vastaan. Sekoittavalla ilmanjaolla epäpuhtauspitoisuus oli suunnilleen sama kaikkialla oleskeluvyöhykkeellä, kun taas syrjäyttävällä oli merkittävää vaihtelua sekä ajallisesti että paikallisesti. Sekä parhaat että huonoimmat paikalliset tulokset saatiin syrjäyttävällä ilmanjaolla. Tietokonemallinnukset osoittivat, että suurehkoissa avotoimistossa tilan keskellä oleva infektoitunut henkilö levittää epäpuhtauksia tehokkaasti eri suuntiin. Infektoituneen ollessa nurkassa epäpuhtaudet päätyivät seinäpintojen läheisyyteen ja kulkeutuivat niitä pitkin oleskeluvyöhykkeen ulkopuolella. Paras tilanne oli infektoituneen sijaitessa lähellä poistopistettä. Alimitoitettullakin (puhdistimen ilmajäljete sama kuin tilan tuloilmajäljete) ilmanpuhdistimella saavutettiin avotoimistossa korkean epäpuhtauskonsentraation alueita selvästi rajaava vaikutus.

Tuloksista voidaan todeta, että ilmajäljetteisiltä taudinaiheuttajilta suojautumiseen toimistoympäristössä on useita tehokkaita keinoja, joita yhdistelemällä saadaan paras lopputulos. Maskeilla pystytään estämään taudinaiheuttajia päätyvästä tilaan, ilmanpuhdistimilla kyetään poistamaan tilassa jo olevia tai sinne syntyviä epäpuhtauksia, ja virtausesteillä kuten sermeillä pystytään ehkäisemään esim. yskäisyjen ja aivastusten mukana nopeasti eteneviä taudinaiheuttajia päätyvästä altistuvan henkilön luo. Oikeaoppisella ilmanjaolla pystytään puolestaan kuljettamaan epäpuhtaudet pois oleskeluvyöhykkeeltä.

Avainsanat tartuntataudit, ilmajäljetteisyys, maskit, ilmanpuhdistimet, sisäilma**ISBN (painettu)****ISBN (pdf)** 978-952-64-1187-3**ISSN (painettu)****ISSN (pdf)** 1799-4888**Julkaisupaikka** Helsinki**Painopaikka** Helsinki**Vuosi** 2023**Sivumäärä** 130**urn** <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-64-1187-3>

Alkusanat

Nykyinen koronaepidemia on koskettanut meitä jokaista. Monet ovat voineet sairastua vakavasti tai joutuneet olemaan poissa työpaikalta sairauden tai karanteenin johdosta. Laaja etätyösuositus on vähentänyt toimistotilojen käyttöä ja ihmiset ovat voineet viettää normaalia enemmän aikaa kotona. Näin ollen pandemian aikana on jouduttu sopeutumaan uuteen tilanteeseen, ja työsuojelun turvaavat toimenpiteet ovat muuttuneet.

Tämän Työsuojelurahaston tutkimushankkeen aiheena oli työntekijöiden suojaaminen ilmavälitteisiä taudinaiheuttajia vastaan toimistoympäristössä (SUOJAILMA-hanke). Tutkimuksessa tarkasteltiin huoneilmanpuhdistimen, henkilökohtaisen ilmanpuhdistimen, kasvomaskien ja toimistosermien tehokkuutta työntekijöiden suojaamisessa työpisteillä ilmanvaihdon lisäksi. Lisäksi tarkasteltiin erilaisia ilmanjakotapoja sekä lämpökuormien aiheuttamien konvektiovirtausten vaikutusta paikallisiin aerosolipitoisuuksiin. Tavoitteena oli selvittää miten erilaisilla puhdistusratkaisuilla ja rakenteellisilla keinoilla voidaan vähentää työntekijöiden altistumista taudinaiheuttajille.

Tutkimus toteutettiin Aalto-yliopistossa yhteistyössä Itä-Suomen yliopiston ja Filha ry:n kanssa. Tutkimusta ovat rahoittaneet Työsuojelurahasto, Aalto-yliopisto, Aalto-yliopistokiinteistöt Oy (ACRE) ja Helsingin kaupunki. Tutkimusprojektin ohjausryhmään kuuluivat: Antti Säynäjoki (ACRE), Jesse Nieminen (ACRE), Marianna Tuomainen (Helsingin kaupunki), Mervi Ahola (Sisäilmayhdistys ry), Hanna Leppänen (THL), ja Anne-Marie Kurka (Työsuojelurahasto). Lämpimät kiitokset koko ohjausryhmälle asiantuntevasta keskustelusta ja kommenteista.

Tutkimuksen tekijät haluaisivat kiittää Työsuojelurahastoa, Aalto-yliopistokiinteistöt Oy:tä ja Helsingin kaupunkia rahoituksesta. Kiitokset myös Aalto-yliopiston laboratoriomestari Petteri Kivivuorelle, joka osallistui laboratoriomittausten toteutukseen. Lisäksi kiitämme Aalto-yliopiston Juha Jokisaloa asiantuntevista kommenteista. Mittauksissa auttoivat myös Aalto-yliopiston Miao Guo, Weixin Zhao ja Ilia Kravchenko, joille kiitos asiantuntevista keskusteluista ja uusista ajatuksista tutkimuksen toteutuksessa. Kiitos Sisäilmayhdistys ry:n Mervi Aholalle tutkimuksen kansallisesta tiedotuksesta. Erytiskiitos Filha ry:n Tuula Vasankarille tärkeistä kommenteista lääketieteen näkökulmasta. Lämmin kiitos Itä-Suomen yliopiston Pertti Pasaselle, Sara Tiusaselle ja Anna-Maria Veijalaiselle, joiden ansiosta virusmittauksia pystyttiin toteuttamaan. Kiitämme paljon myös Lifa air Ltd:tä, joka toimitti puhdistusratkaisuja tutkimushankkeen käyttöön. Lämmin kiitos myös Halton Oy:lle, joka antoi ilmanvaihdon päätelaitteita tutkimushankkeen käyttöön.

Kiitos kaikille hankkeeseen osallistuneille.

Espoossa 28.2.2023

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	1
Symbolit ja lyhenteet	4
1. Johdanto	7
1.1 Tutkimuksen tausta.....	7
1.2 Taudinaiheuttajien ilmavälitteisyydestä.....	8
1.3 Pisaroista ja aerosoleista	9
1.4 Ylähengitysteiden infektioriskin arviointi	11
1.4.1 Ilmanvaihdon tehokkuutta kuvaavia yhtälöitä.....	12
1.4.2 Infektioriskin arvioinnissa käytettyjä yhtälöitä.....	13
1.5 Huoneilman virtauskentästä toimistoympäristössä	16
1.6 Toimistoympäristön suojausmenetelmistä.....	17
1.6.1 Hengityssuojain	18
1.6.2 Ilmanpuhdistin	18
1.6.3 Muita suojausmenetelmiä.....	19
1.7 Tutkimuksen tavoite.....	19
2. Menetelmät	23
2.1 Tutkimus	23
2.2 Kokeellisen tutkimuksen menetelmät.....	24
2.2.1 Aerosoleilla tehtävät koejärjestelyt	24
2.2.2 Merkkiaineella tehtävät koejärjestelyt	24
2.2.3 Viruksilla tehtävät koejärjestelyt	24
2.3 Tietokonemallinnuksen menetelmät.....	24
3. Aerosolien leviäminen ja suojausratkaisujen tehokkuus.....	25
3.1 Menetelmät	25
3.1.1 Koejärjestely.....	25
3.1.2 Sairasta henkilöä jäljittelevä infektiolähde.....	28
3.1.3 Altistuvaa henkilöä jäljittelevä hengittävä lämpönukke	28
3.1.4 Käytetyt mittauslaitteet.....	29

3.1.5	Testitapaukset	29
3.2	Tulokset	30
3.2.1	Suojausratkaisujen tehokkuus, kun aerosoleja tuotettiin hengittämällä	30
3.2.2	Suojausratkaisujen tehokkuus, kun aerosoleja tuotettiin yskimällä	33
3.3	Yhteenveto	35
4.	Ilmanjaon ja lämpökuormien vaikutus työpisteellä altistumiseen ...	37
4.1	Menetelmät	37
4.1.1	Lämpökuormat	39
4.1.2	Ilmanjako.....	40
4.1.3	Mittauslaitteet.....	41
4.1.4	Testitapaukset	41
4.2	Tulokset	42
4.2.1	Sekoittava ilmanjako	42
4.2.2	Syrjäyttävä ilmanjako	60
4.2.3	Yhteenveto.....	77
5.	Virusmittaukset	79
5.1	Menetelmät	79
5.1.1	Virusaerosolin tuotto	79
5.1.2	Viruspitoisuuden määrittäminen	80
5.1.3	Koe 1: viruksen tuotto ja säilytyksen vaikutus elinkykyyn.....	80
5.1.4	Koe 2: Virusaerosolin pitoisuus ja leviäminen huonetilassa ilmanvaihdon ollessa päällä	81
5.1.5	Koe 3: Ilmanpuhdistimen vaikutus viruspitoisuuteen huoneessa ilmanvaihdon ollessa päällä.....	82
5.2	Tulokset	83
5.2.1	Koe 1.....	83
5.2.2	Koe 2	84
5.2.3	Koe 3	84
5.3	Yhteenveto.....	85
6.	Ilmanvaihdon ja ilmanpuhdistuksen tehokkuus.....	87
6.1	Johdanto.....	87
6.2	Menetelmät	88
6.2.1	CFD-simulointi	88
6.2.2	Avotoimiston CFD-malli	88
6.3	Infektioriski avotoimistossa.....	92
6.3.1	Lämpö- ja nopeusolosuhteet.....	92
6.3.2	Epäpuhtauksien leviäminen perusilmanvaihdon avulla	95

6.3.3	Epäpuhtauksien leviäminen perusilmanvaihdon ja ilmanpuhdistimen kanssa 98	
6.3.4	Yhteenveto.....	100
7.	Toimistotilojen tarpeenmukaisen suojaamisen toimintamalli	101
8.	Pohdinta	103
8.1	Tulosten merkittävyys ja sovellettavuus lääketieteen kannalta ..	103
8.2	Virusmittausten haasteet	104
8.3	Ilmanvaihdon kehitystarpeet.....	105
9.	Yhteenveto ja johtopäätökset	107
	Julkaisuluettelo.....	111
	Lähdeluettelo.....	112

Symbolit ja lyhenteet

avg	keskiarvo
CFD	computational fluid dynamics, numeerinen virtausdynamiiikka
CFU	colony-forming unit, pesäkkeen muodostava yksikkö
ppb	parts per billion
ppm	parts per million
q_v	ilman tilavuusvirta [m^3/s]
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes simulation, RANS-simulointi
RH	ilman suhteellinen kosteus [%]
SD	keskihajonta
SST	Shear Stress Transport
t	aika [s]
T	ilman lämpötila [$^{\circ}C$]
TCID ₅₀	50% Tissue Culture Infectious Dose
URANS	Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes simulation, URANS-simulointi
V	huoneen tilavuus [m^3]

1. Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Sisäilman laatuun on Suomessa panostettu vuosikymmeniä (Lampi et al., 2020). Suomalaisen sisäilman laatu onkin eurooppalaisittain hyvä ja sisäilman laatu on koettu hyväksi (THL, 2020a; Salmela et al., 2019, Hyvärinen et al., 2020). Sisäilman laatua on nyt kuitenkin jouduttu tarkastelemaan uudella tavalla SARS-CoV-2 koronapandemian myötä ja toimistotilojen työskentelyolosuhteet ovat muuttuneet epidemiatilanteissa haasteelliseksi. Esimerkiksi työpisteiden käyttöä on pohdittu uudestaan, kun työntekijöiden terveyttä on pyritty varmistamaan riittävällä suojaetäisyydellä ja rajoittamalla tilassa olevien ihmisten lukumäärää sekä ohjeistamalla työntekijöitä käsihygienian, kasvomaskien ja riittävän ilmanvaihdon tärkeydestä (THL, 2020b; ASHRAE, 2021a; CDC, 2021; REHVA, 2021; ECDC, 2020; WHO, 2020a).

Viime aikoina on julkaistu paljon koronavirukseen liittyviä tutkimuksia ja esimerkiksi The Lancet julkaisi syksyllä 2022 koonnin pandemiasta opituista asioista ja suosituksista tulevaisuuden varalle (Sachs et al., 2022). Koronavirus SARS-CoV-2 (2019-nCoV) kuuluu RNA-virusiin, joita tunnetaan satoja erilaisia (Gelderblom, 1996; Horsfall, 1965; Barker et al., 2001; Woolhouse and Brierley, 2018), kun erilaisia koronaviruksia tunnetaan tällä hetkellä yli kymmenen. On selvää, että SARS-CoV-2 virus aiheuttaa vakavaa COVID-19 tautia ja monet tartunnan saaneista ovat joutuneet sairaalahoitoon tai menehtyneet (Huang et al., 2020; Guan et al., 2020; Zhou et al., 2020; Zhu et al., 2020; Wu et al., 2020; van Kampen et al., 2021; WHO, 2020c). Lisäksi uudet variantit saattavat tarttua entistä helpommin ihmisestä toiseen (THL, 2021a; ECDC, 2021a; Hodcroft et al., 2021), mikä periaatteessa lisää työntekijöiden suojauksen tärkeyttä, vaikka virusten aiheuttama infektio saattaisikin ajan myötä lieventyä. Toisaalta emme voi tietää, miten vakavaa tautia uudet koronavirusvariantit voivat lopulta aiheuttaa. Lisäksi altistuminen muille epäpuhtauksille, esimerkiksi kaupunkiolosuhteissa, voi pahentaa COVID-19 tautia (Domingo et al., 2020). Olennaista tartuntaketjussa on se, että viruksen leviäminen alkaa yleensä jo useita vuorokausia aikaisemmin kuin tartunnan saaneelle tulee edes mitään oireita (Barker et al., 2001; He et al., 2020; Zhou et al., 2020; Noh et al., 2020; Lee et al., 2020). Joka tapauksessa on selvää, että rokotetut henkilöt saavat infektion ja levittävät tartuntaa epätodennäköisemmin kuin rokottamattomat henkilöt (Wölfel et al., 2020; Harder et al., 2021; ECDC, 2021b).

Nykyinen tieto viittaa siihen, että koronartartunnat voivat olla suuressa määrin ilmapölyä sisältäviä (Morawska and Cao, 2020; Morawska and Milton, 2020; Setti et al., 2020; Buonanno et al., 2020; Lewis, 2021; Tang et al., 2021). Esimerkiksi Liu et al. (2020) havaitsivat, että sairaalan ruuhkaisilla potilasalueilla ja potilaiden wc-tilojen ilmassa oli kohonneita viruksen RNA-pitoisuuksia. Lednicky et al. (2020) puolestaan löysivät todisteita siitä, että potilaat tuottavat elinkelpoisia SARS-CoV-2 viruksia sisältäviä aerosoleja ilmaan, jotka sitten voivat toimia viruslähteenä tartunnoissa. Roy and Milton (2004) totesivat tutkimuksessaan ilmapölyä sisältävän tartunnan edellyttävän, että huoneilmassa on tietty pitoisuus elinvoimaisia viruksia sisältäviä aerosoleja. SARS-CoV-2:n on todettu pysyvän elinvoimaisena

huoneilmassa jopa 16 tuntia (Samet et al. (2021)). Lai et al. (2022) painottivat, että tulevaisuudessa aerosolien monitorointi on entistä tärkeämmässä roolissa, kun minimoidaan tartuntariskiä sisätiloissa, koska pienten aerosolien sisäänhengitys altistuvalla on tunnistettu yhdeksi tärkeäksi reitiksi ilmapölyssä koronatartunnoissa.

Yleisesti ottaen ilmapölyisyyden todentaminen on ollut vaikeaa. Katelaris et al. (2021) tutkivat COVID-19 taudin leviämistapausta kirkossakävijöiden keskuudessa ja havaitsivat videotallenteiden perusteella, että tauti on tarttunut mitä todennäköisimmin ilman fyysistä kosketusta. Bhagat et al. (2020) pohtivat tutkimuksessaan, että huonetilan ilmapölysten ymmärtäminen on olennaista, kun arvioidaan ilmapölyistä tartuntariskiä. Lisäksi tutkimuksissa on painotettu ilmanvaihdon, ilmanjaon ja ilmapölyisyyden yhteyttä (Li et al., 2007; Bolashikov and Melikov, 2009; Luongo et al., 2016; Ai and Melikov, 2018; Correia et al., 2020), joten tämä aihealue on entistä tärkeämpi suojauduttaessa tulevaisuuden taudinaiheuttajia vastaan. Näiden lisäksi voidaan käyttää ilmanpuhdistimia tai kohdepoistoja, joilla tehostetaan aerosolien poistamista huonetilasta (Yang et al., 2013; Junjing et al., 2014; REHVA, 2021; ASHRAE, 2021b). Ai and Melikov (2018) painottivat kirjallisuustutkimuksessaan, että huoneilman virtauskentän tunteminen on olennaista ilmapölyisyyden arvioimisessa, koska ilmapölyisyys on hyvin dynaaminen virtausilmiö. Siten tulevaisuudessa tarvitaan entistä enemmän huonevirtausien erityispiirteiden tutkimusta mittausten ja CFD-simulointien avulla. Sheikhnejad et al. (2022) totesivat, että CFD-malleihin tarvitaan mitattua tietoa hengitysilma- ja partikkelijakauman trendejä.

Koneellisella ilmanvaihdolla pystytään suodattamaan huoneilman epäpuhtauspitoisuuksia alle 10 %:iin ulkoilman vastaavista pitoisuuksista, jos tuloilman suodattimet vaihdetaan suositusten mukaisesti. Tämä ei kuitenkaan auta, mikäli terveydelle haitallinen vaikutus on lähtöisin sisätiloista, kuten tilakäyttäjien hengitysteistä tulevista taudinaiheuttajista. Varmoin keino olisi luonnollisesti poistaa tilojen epäpuhtauslähteet ja taudinaiheuttajat sekä varmistaa riittävä sisäilman vaihtuvuus (Fanger, 1988; Seppänen and Fisk, 2004; Sundell, 2004; Sisäilmayhdistys, 2020). Taudinaiheuttajat eivät kuitenkaan ole ihmisten havaittavissa, eikä altistumista erilaisille viruksille oikeasti tiedetä. Siten työpisteiden mikroilmaston tarpeenmukaiselle hallinnalle on selkeä tarve. Lisäksi rakennusten omistajat tarvitsevat uutta tietoa ilmanpuhdistimien toimivuudesta (TSR, 2020; THL, 2021b). Epidemian hallintakeinoja tulisi kehittää (Xu et al., 2020b).

1.2 Taudinaiheuttajien ilmapölyisyydestä

Ilmapölyisen tartunnan riski on olemassa erityisesti sisätilassa, jossa on paljon ihmisiä ja pitkäaikaista tilakäyttöä riittämättömällä ilmanvaihdolla (WHO, 2020b; REHVA, 2021; WHO, 2021). Infektiolle altistuminen tapahtuu yleensä kolmella tavalla: 1) hengittämällä ilmaa, jossa on taudinaiheuttajia sisältävää aerosolia, 2) hengittämällä ilmaa, jossa on taudinaiheuttajia sisältäviä pisaroita ja 3) koskettelemalla limakalvoja taudinaiheuttajilla kontaminoituneilla käsillä. Ilmapölyisyyden on todettu olevan potentiaalinen riski niin influenssan, rhinovirusten ja tuberkuloosin kuin SARS- ja MERS-koronavirusten sekä tuhkarokon ja RSV-virusten kaltaisille taudinaiheuttajille (Riley et al., 1959; Bloch et al., 1985; Myatt et al., 2004; Tellier, 2006; Escombe et al., 2007; Kim et al., 2016; Kulkarni et al., 2016; Chen et al., 2020; Leung et al., 2020; Lednický et al., 2020; Kohanski et al., 2020; Tang et al., 2020; Kurnitski et al., 2021; Wu et al., 2022). On esitetty, että huoneilman hengittäminen on ensisijainen keino altistua bioaerosoleille (Nazaroff, 2016). Siksi infektoituneen uloshengityksen pisaroiden ja aerosolien leviäminen huoneessa on avainkysymys arvioitaessa ihmisen altistumista ilmapölyisille taudinaiheuttajille (Chen and Zhao, 2010). Aerosolien käyttäytymisen ymmärtäminen on olennaista suunniteltaessa tehokkaita ratkaisuja altistumisen

rajoittamiseksi. Esimerkiksi avotoimistoissa on yleensä useita henkilöitä samanaikaisesti työpäivän aikana, ja on selvää, että toimistotilat ovat silloin mahdollinen altistumisympäristö taudinaiheuttajille.

Ilmavälitteinen kulkeutuminen koostuu pisaroista ja aerosoleista, joita vapautuu niin aivastellessa, yskissä ja laulaessa, kuin myös huudettaessa, puhuttaessa ja hengitettäessä. Kirjallisuudessa ilmvälitteisyydelle on todettu 2 pääasiallista reittiä (Morawska et al., 2020; REHVA, 2021). Ensimmäinen reitti on yhdistetty pisara- ja ilmakuljetus lähivyöhykkeelle, joka ylittää noin 1–2 metrin päähän sairastuneesta. Lähivyöhykkeelle muodostuu myös suurin paikallinen aerosolipitoisuus. Toinen reitti on aerosolien kulkeutuminen kauemmas huoneessa, jolloin ilmassa olevat pienet ja kevyet aerosolit liikkuvat huonevirtausten mukana sekoittuen huoneilmaan. Perinteisessä taudinaiheuttajien torjunnassa tehokkainta on ollut suoraan tuhota ja poistaa taudinaiheuttajat tai eristää ihmiset ja taudinaiheuttajat toisistaan (CDC, 2015). Näiden lisäksi on tärkeää henkilökohtainen suojautuminen maskien avulla (CDC, 2015; Morawska et al., 2020).

Aiemmissa ilmvälitteisyyden tutkimuksissa esimerkiksi Rhino- ja influenssavirusten sekä yleisten RSV-virusten on havaittu olevan ilmvälitteisiä, kun on poissuljettu muita reittejä (Dick et al., 1987; Tellier, 2006; Milton et al., 2013; Kulkarni et al., 2016). Lisäksi MERS-viruksen aiheuttaman tautiepidemian yhteydessä ilmanäytteissä oli ollut elinvoimaisia viruksia, jotka ovat täytyneet tulla potilailta (Kim et al., 2016). Toisessa tutkimuksessa COVID-19 potilailta oli mitattu uloshengityksestä miljoonia viruksia tunnissa (Ma et al., 2021).

Virusten elinkelpoisuus riippuu mm. niiden genomisesta materiaalista (Wang et al., 2021). Epävarmaa kuitenkin on, miten paljon viruksia infektion tarttumiseen tarvitaan ja mikä on elinvoimaisten virusten luonnollinen alenema. Tällöin ilmvälitteisyydessä puhutaankin mieluummin tartuntariskistä, kun virukset kulkeutuvat uloshengityksessä huoneilmaan (Morawska and Buonanno, 2021). Kirjallisuudessa SARS-CoV-2:n puoliintumisaajan on mainittu olevan suuruusluokkaa 1-3 tuntia, ja elinkykyisten virusten alenema 0,5-2% minuutissa, mihin vaikuttavat esimerkiksi kosteusolosuhteet ja auringon valo (Smither et al., 2020; van Doremalen et al., 2020; Schuit et al., 2020; Wang et al., 2021). Esimerkiksi van Doremalen et al. (2020) havaitsivat, että aerosoleissa olevien virusten määrä aleni 3 tunnin aikana arvosta $10^{3.5}$ arvoon $10^{2.7}$ TCID₅₀ per millilitra (50 % Tissue Culture Infectious Dose).

1.3 Pisaroista ja aerosoleista

Pisarat ja aerosolit muodostuvat ihmisen hengitysteissä elimistön aktiivisuuden seurauksena, esimerkiksi hengityksen, puhumisen, nauramisen, laulamisen ja yskimisen aikana (Morawska et al., 2009; Johnson and Morawska, 2009; Johnson et al., 2011; Buonanno et al., 2020). Pisaroiden syntyyn vaikuttavat yksilöllinen hengityksen toiminta ja keuhkoissa olevan kaasun pisaroituminen (atomization) sekä kondensoituminen ylähengitysteissä (Gralton et al., 2011; Buonanno et al., 2020). Sen myötä ihmisen huonetilaan tuottamaan pisara-annokseen vaikuttavat pisaroiden vaihtoehtoiset syntymekanismit ja ilmareitit hengityselimistössä, missä yksi tärkeä tekijä on sulkeutuneiden hengitysteiden uudelleen avautuminen hengityssyklin aikana (Almstrand et al., 2010; Haslbeck et al., 2010; Bake et al., 2019).

Kirjallisuudessa on arvioitu, että yksittäisen yskimisen tai muutaman minuutin puheen tuottaman pisaroiden lukumäärä voi olla tuhansissa (Xie et al., 2007; Bake et al., 2019; Bahl et al., 2020) ja aivastuksen jopa sadoissa tuhansissa (Morawska, 2006). Asadi et al. (2019) löysivät viitteitä siitä, että ihmisen normaalisti puhuessa, aerosolituotto voisi olla luokkaa 1-50 pisaraa sekunnissa. Bake et al. (2019) taas arvioivat kirjallisuuskatsauksessaan, että vaikka ihmisen tuottaman pisarajakauman

vaihteluväli on luokkaa 0,01-1000 μm , niin uloshengityksen pisaroiden kokojakauma olisi kuitenkin suurimmaksi osaksi alle 4 μm , jossa massamediaani voisi olla noin 0,7-1 μm . Johnson et al. (2009) puolestaan totesivat, että uloshengityksen aerosolijakauma oli koehenkilöillä erilaisissa tilanteissa noin 0,5-4 μm painottuen kokoluokkaan 0,6-0,9 μm . Lisäksi Morawska et al. (2009) havaitsivat, että ihmisen hengityksen tuottama pisarajakauma oli eri aktiviteeteissa vaihteluvälillä 0,3-20 μm painottuen kokoluokkaan alle 0,8 μm . Esimerkiksi SARS-CoV-2 viruksen koko on suuruusluokaltaan 100 nm ja koon vaihteluvälin on havaittu olevan noin 60-140 nm (Bar-On et al., 2020; Varga et al., 2020; Laue et al., 2021).

Yleisesti ottaen kirjallisuudessa yskiminen ja aivastaminen ovat tuottaneet suurimman osan pisaroista kokoluokassa 0-10 μm (Nicas et al., 2005; Tellier, 2006; Yang et al., 2007; Morawska et al., 2009; Johnson et al., 2011; Bourouiba et al., 2014). Yang et al. (2007) havaitsivat, että yskimisen pisarat painoutuivat kokoluokkaan 1 μm , ja 82 % aerosoleista oli välillä 0,7-2,1 μm , mikä viittaa siihen, että tämä kokoluokka on keskeinen ilmvälitteisten taudinaiheuttajien leviämässä. Coleman et al. (2021) havaitsivat, että pienissä pisaroissa ($\leq 5\mu\text{m}$), jotka infektoitunut henkilö tuottaa puhumisen ja laulamisen aikana, oli enemmän SARS-CoV-2 viruksia (85 % kokonaisuormasta) kuin suurissa aerosoleissa ($>5\mu\text{m}$), joten pienten aerosolien vähentäminen huonetilassa on tärkeässä roolissa koronatartuntojen torjunnassa. Toisaalta suurissa pisaroissa on havaittu olevan lukumäärältään enemmän taudinaiheuttajia kuin pienissä pisaroissa (Shen et al., 2021). Lai et al. (2022) puolestaan totesivat, että pienet aerosolit ($<5\mu\text{m}$) sisältävät lukumäärältään suuremman määrän viruksia kuin suuremmat aerosolit ($>5\mu\text{m}$), jos laskenta perustuu RNA-kopioiden määrään.

Tutkimuksissa on todettu, että sylkipisarat lähikontakteissa ovat akuuttien hengityselinsairauksien ja koronavirusen ensisijainen tartuntalähde (Gupta et al., 2010; WHO, 2014; Xu et al., 2020a; WHO, 2021). Siten hengityssuojaimen käyttö voi suojata tehokkaasti pisaroilta lähikontakteissa (Tang et al., 2009; Wei and Li, 2016; Zhang et al., 2020; Leung et al., 2020; Dai and Zhao, 2020; WHO, 2020b), vaikka ne saattavat päästää pieniä aerosoleja hengitykseen erityisesti ohivirtauksen vuoksi. Koronaepidemian alkuvaiheen tutkimuksissa Qian et al. (2021) havaitsivat, että suurin osa koronatartunnoista oli tullut kotioiloissa, mikä korostaa lähikontaktin merkitystä. Myös Chan et al. (2019) löysivät viitteitä perheen sisäisistä tartunnoista. Tällöin kuitenkin uusien varianttien suuremmasta leviämisherkyydestä ei ollut käytännön tietoa. Cortellessa et al. (2021) havaitsivat, että tartuntariski pisaroiden välityksellä pieneni merkittävästi jo 0,6 m:n päässä sairaasta henkilöstä, ja sitä kauempana tartuntariski syntyi aerosolien välityksellä. Toisaalta Chen et al. (2020) totesivat, että ilmvälitteisyys voi olla myös lähikontakteissa tärkeää.

Useimmat hengityksen, puhumisen tai yskimisen tuottamat sylkipisarat laskeutuvat pinoille tai kuivuvat nopeasti aerosoleiksi, jotka kulkeutuvat huoneilman mukana tilassa (Wells 1934; Wells 1955; Xie et al., 2007; Bourouiba et al., 2014). Kun ylimääräinen vesi on haihtunut pisaroista, niistä tulee aerosoleja, jotka voivat jäädä leijumaan huoneilmaan jopa tunneiksi (Vuorinen et al., 2019; Mittal et al., 2020; Bourouiba, 2020; Asadi et al., 2020; Setti et al., 2020; ASHRAE, 2020). Kosteat olosuhteet pisarapilvessä hidastavat pisaroiden kuivumista, jolloin pienten pisaroiden haihtumisaika voi kasvaa sekunneista minuutteihin (Bourouiba, 2020; Mittal et al., 2020). Huoneilman kosteus hidastaa pisaroiden kuivumista (Xie et al., 2007), kun taas turbulenssi tehostaa lämmön- ja massansiirtoa sekä sekoittumista. Yleisesti ottaen bakteeri- ja virustartunnan riski on suurempi ympäristöissä, joissa suhteellinen kosteus on suuri (Holmberg and Chen, 2003). Lisäksi suuren suhteellisen kosteuden alentaminen voi pienentää sydän- ja hengityselimistön terveysriskejä (Guo et al., 2022). Ilman kosteuden vaikutus on kuitenkin hyvin erilainen eri viruksille (Aganovic et al., 2021; Aganovic et al., 2022). REHVA:n oppaassa todetaan, että SARS-CoV-2 on melko vastustuskykyinen huoneilman

muutoksille, jolloin viruksen elinkyvyn alentamiselle tarvittaisiin jopa yli 80 %:n huoneilman kosteus ja 30 °C:n ilman lämpötila.

Aiemmissa tutkimuksissa Bourouiba et al. (2014) painottivat, että pisarat, joiden halkaisija $d > 100 \mu\text{m}$, laskeutuvat maahan alle 1 sekunnissa ilman merkittävää haihtumista, ja pisaroista, joiden halkaisija $d < 100 \mu\text{m}$, tulee tyypillisesti aerosoleja ennen kuin ne laskeutuvat tai kiinnittyvät pinoille. Siten pisarat, joiden halkaisija $d < 5\text{--}10 \mu\text{m}$, kuivuvat nopeasti aerosoleiksi kulkeutuen huoneilman mukana periaatteessa pitkiäkin aikoja. REHVAN oppaassa (REHVA, 2021) todetaan, että $20 \mu\text{m}$:n pisara kuivuu alle sekunnissa 50 %:n kosteudessa noin $10 \mu\text{m}$:n aerosoliksi, joka sisältää vielä nestettä. Erilaisista yskäisyistä lähtevän pisarapilven lähtönopeudeksi on kirjallisuudessa esitetty 6-52 m/s, mikä tarkoittaa sitä, että pisarapilven liikemäärää on suurempi kuin huoneilman virtauskenttä (Tang et al., 2008; Gupta et al., 2009; Liu and Novoselac, 2014; Licina et al., 2015a; Ai and Melikov, 2018). Periaatteessa yskijällä oleva hengityssuojain voi kuitenkin vaimentaa tai suunnata aerosolisuihkua pois hengitysvyöhykkeeltä (Tang et al., 2009). Tämä kuitenkin riippuu yskivän ja altistuvien suhteellisesta sijainnista toisiinsa nähden.

1.4 Ylähengitysteiden infektoriskin arviointi

Infektoriskiä voidaan arvioida todennäköisyydellä, että on saanut tartunnan tietyllä sisään hengitetyllä taudinaiheuttajien annoksella (Sze To and Chao, 2010). Sisään hengitetty annos on se annos, joka kulkeutuu tarttumisalueen limakalvoille eli ilmapälitteisyydessä pääasiassa ylähengitysteihin ja silmiin. Lisäksi taudinaiheuttajien on selviydyttävä vielä henkilön immuunipuolustuksesta aiheuttaakseen infektion.

Sairastumisriskin arvioissa on otettava huomioon, että vaikka sairas on jo poistunut huoneesta, huoneilmassa voi edelleen olla elinvoimaisia taudinaiheuttajia. Käytännössä huonetiloissa olevat taudinaiheuttajat poistuvat yleensä joko poistoilman, ikkunoiden tai ovien kautta, tai ne kerääntyvät pinoille. Lisäksi taudinaiheuttajien vähenemiseen vaikuttaa taudinaiheuttajien elinvoimaisuuden luonnollinen alenema. Sisäilmastoluokituksessa (Säteri ja Ahola, 2018) toimistotilojen S1-luokan ilmanvaihto edellyttää, että huoneilma vaihtuu noin 2 kertaa tunnissa. Tämän ilmanvaihtomäärän on katsottu normaalisti olevan riittävä pitämään sisäilman laatu hyvällä tasolla.

Tartuntamekanismia ja siihen tarvittavaa annosta on kuitenkin hyvin vaikea arvioida luotettavasti (Aliabadi et al., 2011). Kirjallisuudessa altistumisannosta arvioidaan yleensä määrällisenä, esimerkiksi Quanta-annoksena (infektoivan taudinaiheuttaja-annoksen lukumäärä), tai mikro-organismien pesäkkeitä muodostavina yksikköinä (Colony-Formin Units, CFU). Quanta-annos on määritelty taudinaiheuttajia sisältävänä annoksena, joka aiheuttaa altistuneelle 63 %:n tartuntariskin ilmapälitteisesti (Buonanno et al., 2020). Sitä ei ole määritetty kaikille taudinaiheuttajille, mutta näihin voidaan soveltaa jo olemassa olevaa tietoa (Kurnitski et al., 2021).

Influenssalla yhden potilaan tuottama quanta-määrän on kirjallisuudessa arvioitu olevan esimerkiksi 67 quanta/h, tuberkuloosilla 12,7 quanta/h ja Rhinoviruksella 5 quanta/h (Knibbs et al., 2011). SARS-COV-2 viruksella vastaava quanta-määrä on arvioitu olevan levossa noin 3,1 quanta/h, puhuessa 42 quanta/h ja laulaessa 270 quanta/h luotettavuustasolla 90 %. (Buonanno, Morawska, and Stabile, 2020; Kurnitski et al., 2021). CFU:ta tarkasteltaessa jokainen kasvatusalustalla oleva pesäke edustaa elinvoimaisia organismeja, josta voidaan edelleen arvioida taudinaiheuttajien lukumäärää (Armstrong and Haas, 2007). Tätä voidaan verrata tartuntaan vaadittavaan virulenttiin annokseen (infectious dose), joka on olennaista infektoriskin tarkastelussa.

1.4.1 Ilmanvaihdon tehokkuutta kuvaavia yhtälöitä

Infektorisikin arviointia johdatellaan tässä ilmanvaihdon tehokkuutta kuvaavilla yhtälöillä. Huoneilman epäpuhtauskonsentraatio lasketaan täysin sekoittuneessa tilanteessa yhtälöllä

$$C = \frac{q_{m,s}}{q_v}, \quad (1)$$

jossa C on konsentraatio [kg/m^3], $q_{m,s}$ on epäpuhtauslähteeltä tuleva massavirta [kg/s] ja q_v on ilmanvaihdon tilavuusvirta [m^3/s] (Sandberg, 2022). Ilmanvaihtuvuutta kuvaava ilmanvaihdon nimellisaikavakio τ_n taas voidaan laskea yhtälöstä

$$\tau_n = \frac{V}{q_v}, \quad (2)$$

missä V on huoneilman tilavuus [m^3] ja q_v on tuloilman tilavuusvirta [m^3/h], jolloin nimellisaikavakio on nimellisen ilmanvaihtokertoimen n [$1/\text{h}$] käänteisluku (Seppänen, 1987; Mundt et al., 2004). Ilmanvaihdon nimellisaikavakio tarkoittaa sitä aikaa ([h] em. yksiköillä), joka kuluu huoneilman vaihtumiseen ideaalisella mäntäilmanvaihdolla. Tällöin ideaalisen ilmanvaihdon keskimääräinen ilman ikä $\langle \bar{\tau} \rangle_{id}$ on

$$\langle \bar{\tau} \rangle_{id} = \frac{\tau_n}{2}. \quad (3)$$

Tällöin oletetaan, että ilman ikä muuttuu mäntävirtauksessa lineaarisesti tuloilmaseinältä poistoilmaseinälle.

Ilmanvaihdon hyötysuhde saadaan määriteltyä erilaisilla ilmanjakotavoilla ilman lyhimmän mahdollisen keski-ian $\langle \bar{\tau} \rangle_{id}$ ja ilman todellisen keski-ian paikkakeskiarvon $\langle \bar{\tau} \rangle$ suhteena

$$\varepsilon^a = \frac{\langle \bar{\tau} \rangle_{id}}{\langle \bar{\tau} \rangle} = \frac{V}{2q_v \langle \bar{\tau} \rangle}. \quad (4)$$

Silloin hyötysuhde on ideaalisella mäntäilmanvaihdolla 1, täysin sekoittavalla ilmanvaihdolla 0,5 ja syrjäyttävällä ilmanvaihdolla 0,5-1 (Seppänen, 1987; Mundt et al., 2004). Jos tuloilmaa menee suoraan poistoon (oikosulkuvirtaus, short-circuit), ilmanvaihdon hyötysuhde pienenee alle 0,5:n. Jos tarkastellaan tilassa olevaa paikallista pistettä, sen paikallinen hyötysuhde lasketaan yhtälöllä

$$\varepsilon_p^a = \frac{V}{q_v \bar{\tau}_p}, \quad (5)$$

missä $\bar{\tau}_p$ on huonetilan tarkasteltavan pisteen ilman keski-ikä.

Ilmanvaihdon hyötysuhteen lisäksi voidaan arvioida ilmanvaihdon epäpuhtauksien poistotehokkuutta, jota lasketaan yhtälöllä

$$\varepsilon_o^c = \frac{C_{out}}{C_{avg}}, \quad (6)$$

missä C_{out} on poistoilman pitoisuus ja C_{avg} on huoneen keskimääräinen pitoisuus (Mundt et al., 2004). Sen lisäksi yhtälö (6) voidaan kirjoittaa muotoon

$$\varepsilon_{\Delta}^c = \frac{C_{out} - C_{in}}{C_{avg} - C_{in}}, \quad (7)$$

jos huoneilman konsentraatiota verrataan johonkin referenssitasoon. Tässä C_{in} on tuloilman pitoisuus. Täysin sekoittuneessa tilanteessa poistoilman ja tuloilman konsentraatioiden erotusta voidaan arvioida emissiolähteen ja ilmanvaihtuvuuden perusteella yhtälö

$$\Delta C = \frac{S}{q_v}, \quad (8)$$

missä $\Delta C = C_{out} - C_{in}$, S on emissiolähteen tuottama emissiovirta ja q_v on tuloilmavirta, joiden yksiköt määräytyvät halutun konsentraatiota kuvaavan yksikön perusteella. Nyt ilman epäpuhtauden paikallista poistotehokkuutta ε_p^c voidaan laskea kaavalla

$$\varepsilon_p^c = \frac{C_{out}}{C_p}, \quad (9)$$

jossa C_p on huoneilman paikallinen konsentraatio. Vastaavasti paikallista poistotehokkuutta voidaan laskea hengitysvyöhykkeelle ja sisäänhengitykselle vertaamalla edellä mainittuja konsentraatioita huoneen poistoilman konsentraatioon (Brohus and Nielsen, 1996; Mundt et al., 2004). Toisaalta huoneilmaa huuhteleva ilmavirta saadaan yhtälöstä

$$q_{v,p} = \left(1 - \frac{C_{in}}{C_{out}}\right) q_v, \quad (10)$$

joka on pienempi kuin tuloilman tilavuusvirta, jos myös tuloilmassa on epäpuhtauksia (Sandberg, 2022). Epäpuhtaudet kulkeutuvat huoneessa ilmavirtausten mukana. Jos tarkastellaan esimerkiksi työpistettä, epäpuhtaushiukkasen todennäköisyys palata tarkasteltavaan ilmatilavuuteen on

$$r = \frac{C_{in}}{C_{out}}, \quad (11)$$

missä r on todennäköisyys [0...1], C_{in} on tarkastelutilavuuteen tulevan ilman konsentraatio [kg/m^3] ja C_{out} on tarkasteltavalta alueelta poistuvan ilman konsentraatio [kg/m^3]. Vastaavasti todennäköisyys sille, että epäpuhtaushiukkanen ei pala tarkastelutilavuuteen vaan poistuu huoneesta, on tällöin $1 - r$, joka vastaa tarkasteltavaa ilmatilavuutta huuhtelevaa tilavuusvirtaa. Käytännössä huoneessa liikkuva ilmavirta on aina suurempi kuin poistoilmamäärä, koska huoneeseen tulevaan ilmavirtaan indusoituu huoneilmaa hidastaen samalla liikenopeutta. Siten epäpuhtaudet eivät poistu suoraan huoneesta vaan jäävät kiertämään huoneeseen (Sandberg, 2022). Kun mitataan paikallista ilman laatua huoneessa, voidaan käyttää yhtälöä

$$\varepsilon_p^c = \frac{C_{out}}{C_p} = \frac{N_p n q_{v,m}}{(N_t - N_{in}) q_v}, \quad (12)$$

jossa N_p on emissiopartikkelien lukumäärä [-], $q_{v,m}$ on mittauksen ilmavirta [m^3/s], N_t on mitattu kokonaispartikkelien lukumäärä [-], N_{in} on huoneeseen tulevat partikkelit [-] (Schumann et al., 2022).

1.4.2 Infektoriskin arvioinnissa käytettyjä yhtälöitä

Infektoriskin arviointiin on kehitetty monia menetelmiä. Yksi on quanta-pohjainen menetelmä, joka pohjautuu Wells-Riley-yhtälöön (Wells, 1955; Riley et al., 1978; Sze To and Chao, 2010; Buonanno et al., 2020; Kurnitski et al., 2021). Wells-Riley-yhtälöstä on tehty monia muunnoksia, joista yksi on Gammaitoni-Nucci-malli (Knibbs et al., 2011). Toinen menetelmä on annospohjainen laskentamenetelmä, jotka voidaan jaotella deterministisiin ja stokastisiin malleihin (Noakes et al.,

2006; Sze To and Chao, 2010). Quanta-pohjaisissa menetelmissä Wells-Riley-yhtälö (Wells, 1955; Riley et al., 1978; Sze To and Chao, 2010; Aliabadi et al., 2011; Su et al., 2022) voidaan kirjoittaa muotoon

$$P = \frac{N_c}{N_s} = 1 - \exp\left(-\frac{Iqpt}{Q}\right), \quad (13)$$

missä P on altistuneen tartunnan todennäköisyys [0...1], N_c on sairastuneiden lukumäärä [-] ja N_s on altistuneiden lukumäärä [-], I on infektoituneiden henkilöiden lukumäärä (tyypillisesti 1), q on quanta-annoksen tuotto [quanta/h], p on hengityksen tilavuusvirta [m^3/h], t on altistumisaika [h] ja Q on ilmanvaihdon tilavuusvirta [m^3/h]. Wells-Riley yhtälö on perinteinen infektioriskin kasvua kuvaava yhtälö, joka on muotoa $P = 1 - e^{-n}$ (Nazaroff et al., 1998), ja jossa eksponenttifunktion muuttuja $n = Iqpt/Q$ tarkoittaa altistuvan henkilön sisään hengittämää quanta-annosta [quanta] (Sze To and Chao, 2010; Kurnitski et al., 2021). Periaatteessa Wells-Riley-yhtälö kuvaa todennäköisyyttä saada tartunta huoneessa, kun huoneilma on täysin sekoittunutta, eli todennäköisyys on sama huonetilan jokaisessa kohdassa (Su et al., 2022). Lisäksi yhtälö olettaa taudinaiheuttajien vakiokonsentraation huonetilassa (Sze To and Chao, 2010). Jos altistunut hengittää yhden quanta-annoksen elinvoimaisia viruksia ($n=1$), on tartunnan todennäköisyys 63 % (Buonanno, Morawska, and Stabile, 2020), mikä nähdään yhtälön tuloksena. Infektioriskin yhtälöön voidaan sisällyttää myös suojausmenetelmien hyötysuhteita, jotka vaikuttavat infektion todennäköisyyteen (Nazaroff et al., 1998; Sze To and Chao, 2010; Shao and Li, 2020; Kurnitski et al., 2021; Zhang and Lin, 2021).

REHVA:n COVID-19 oppaassa (REHVA, 2021) tarkastellaan infektion riskitasoa eri alkuarvoilla. Lähtökohdaksi on otettu EN 16798-1:2019 standardin (CEN, 2019c) I luokan kriteerit täyttävä toimistotila, jossa ilmanvaihto on 2 L/s, m^2 ja ilmanvaihtuvuus 2,4 1/h. Tartunnan todennäköisyyttä on tarkasteltu täysin sekoittuneessa tilanteessa quanta-tuotolla 5 quanta/h, hengityksen tilavuusvirralla 0,54 m^3/h ja altistumisajalla 8 tuntia, kun huoneessa on yksi sairas henkilö. Tällöin infektion todennäköisyydeksi saadaan noin 16 %.

Taudin leviämistä voidaan arvioida tartuttavuusluvulla (reproduction number) R , joka kuvaa sairastuneiden lukumäärää yhtä tartuttajaa kohti N_c/I . Tapahtumakohtaista tartuttavuuslukua voidaan käyttää erityisesti sellaisessa tilanteessa, jossa sisätilassa on paljon ihmisiä (Morawska et al., 2021). Taudin lisääntymisen todennäköisyyttä voidaan tällöin laskea yhtälöllä

$$P = \frac{RI}{N_s}. \quad (14)$$

Huoneilman laimentumisen vaikutusta voidaan arvioida ilmanvaihdon ja infektiolähteen ilmavirran perusteella yhtälöllä

$$DR = \frac{Q}{p}, \quad (15)$$

jossa DR kuvaa laimennussuhdetta (dilution ratio). Tämän yhtälön avulla infektioriskin todennäköisyyden yhtälö saa muodon

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{qt}{DR}\right). \quad (16)$$

Huonetilassa infektoituneen uloshengityksen ilmavirta kuljettaa taudinaiheuttajien konsentraatiota. Muodostetaan stationaaritilanteessa ja ilman häviöitä quanta-virtaukselle yhtälö

$$pE_0 = QE, \quad (17)$$

jossa E_0 on infektointuneen uloshengityksessä oleva quanta-konsentraatio [quanta/m³] ja E on huonetilassa oleva quanta-konsentraatio [quanta/m³]. Tässä yksinkertaistetussa yhtälössä termi pE_0 tarkoittaa infektointuneen uloshengityksen kuljettamaa quanta-konsentraatiota [quanta/h] ja termi QE tarkoittaa ilmanvaihdon kuljettamaa quanta-konsentraatiota [quanta/h]. Tämä vastaa huonetilan stationääritilanteen quanta-annoksen tuottoa q [quanta/h], jolloin quanta-virtauksen yhtälö (17) voidaan kirjoittaa muotoon

$$\frac{E_0}{E} = \frac{Q}{p} = DR, \quad (18)$$

josta nähdään, että yhtälö vastaa aiemmin määritettyä laimennussuhdetta. Näin ollen laimennussuhteella on analogia myös quanta-konsentraatiolle infektointuneen ja huonetilan välillä. Analogian perusteella infektointuneen hengitysvyöhykkeen konsentraation suhde altistuvan konsentraatioon voidaan merkitä yhtälöllä

$$D = \frac{C_0}{C_s}, \quad (19)$$

missä C_0 on infektointuneen konsentraatio [kg/m³] tai [ppm] ja C_s on altistuvan konsentraatio [kg/m³] tai [ppm]. Nyt infektioriskin yhtälöksi saadaan

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{qt}{D}\right). \quad (20)$$

Zhang and Lin (2021) esittivät tutkimuksessaan paikallisen infektioriskin yhtälön periaatteella

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{p_s qt}{p_0 D}\right), \quad (21)$$

jossa p_s on altistuvan hengittämä ilmavirta [m³/h] ja p_0 on infektointuneen hengittämä ilmavirta [m³/h], jotka kumoavat quanta-annoksen (n) termissä toisensa, jos molempien hengitysilmavirta oletetaan samaksi. Yhtälö ottaa siten huomioon myös infektointuneen ja altistuvan erilaiset hengitysilmavirrat. Käytännössä konsentraatiosuhde on ajan funktio, jolloin integraalimuodossa (Zhang and Lin, 2021; Shao and Li, 2020; Aganovic et al., 2021) yhtälöstä saadaan

$$P = 1 - \exp\left(-\int_{t_1}^{t_2} \frac{p_s q}{p_0 D} dt\right), \quad (22)$$

jossa altistumisaika on integraalissa $T = t_2 - t_1$. Periaatteessa huoneilmassa olevat taudinaiheuttajat voidaan käsittää erillisinä aineina (discrete matter), jotka leviävät satunnaisesti Poisson-jakaumaa noudattaen huoneen erillisissä pisteissä aika-askelittain. Tällöin infektioriskiä voidaan laskea käyttämällä mitattuja aikasarjoja huoneessa olevasta taudinaiheuttajia jäljittelevästä konsentraatiosta. Tässä tapauksessa mitatun aikasarjan konsentraatiosuhde D on muuttuja, joka vaihtelee ajan suhteen, jolloin muut vakioidut muuttujat voidaan jättää integraalin ulkopuolelle. Nyt infektioriskin todennäköisyys saadaan yhtälöllä

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{qp_s}{p_0} \sum_{i=1}^N \left(\frac{C_s}{C_0}\right)_i \Delta t_i\right), \quad (23)$$

jossa i on mitatussa aikasarjassa olevan konsentraatioarvon järjestysnumero, N on aikasarjan konsentraatioarvojen lukumäärä ja Δt on konsentraatioarvojen välinen aika-askel siten, että altistumisaika $T = \sum_{i=1}^N \Delta t_i$.

Erilaisten suojausmenetelmien vaikutusta altistuvan hengitysvyöhykkeen taudinaiheuttajia jäljittelevään konsentraatioon voidaan arvioida suojausmenetelmän tehokkuutta myös symbolilla η , joka viittaa suojausmenetelmällä poistettuun osuuteen taudinaiheuttajista (Nazaroff et al., 1998). Tällöin infektioriskin yhtälössä voidaan käyttää termiä $\phi = 1 - \eta$. Käytännössä hyötysuhde lasketaan esimerkiksi periaatteella

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{\phi q p_s}{p_0} \sum_{i=1}^N \left(\frac{C_s}{C_0}\right)_i \Delta t_i\right), \quad (24)$$

jossa ϕ on käytössä olevien suojausmenetelmien hyötysuhde [0...1], joka saa arvon 1 kun suojausmenetelmiä ei ole käytössä. Kirjallisuudessa kuvataan suojausmenetelmän tehokkuutta myös symbolilla η , joka viittaa suojausmenetelmällä poistettuun osuuteen taudinaiheuttajista (Nazaroff et al., 1998). Tällöin infektioriskin yhtälössä voidaan käyttää termiä $\phi = 1 - \eta$. Käytännössä hyötysuhde lasketaan esimerkiksi periaatteella

$$\phi = \frac{C_{s_{suoja}}}{C_{s_{ref}}}, \quad (25)$$

missä $C_{s_{suoja}}$ on altistuvan hengitysvyöhykkeellä oleva taudinaiheuttajia jäljittelevä konsentraatio käytössä olevilla suojausmenetelmillä ja $C_{s_{ref}}$ on vastaava konsentraatio ilman suojausmenetelmiä.

Infektioriskiä laskettaessa huonetilassa olevan quanta-konsentraation häviöitä λ [quanta/h] voidaan ottaa huomioon yhtälöllä

$$\lambda = \lambda_V + \lambda_{dep} + k + k_f, \quad (26)$$

jossa λ_V on ilmanvaihdon aiheuttama häviö [quanta/h], λ_{dep} on aerosolien pinnoille kiinnittymisen aiheuttama häviö [quanta/h], k on virusten elinvoimaisuuden alenema [quanta/h] ja k_f on huoneilman puhdistuksen aiheuttama häviö [quanta/h]. Nämä termit vaikuttavat quanta-konsentraation muuttumiseen. Tällöin quanta-konsentraatio E voidaan ratkaista yhtälöstä

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} V = q - QE - \lambda EV, \quad (27)$$

jossa E on quanta-konsentraatio [quanta/m³], t on aika [h], q on quanta-annoksen tuotto [quanta/h], V on huoneen tilavuus [m³], λ kuvaa quanta-annoksen häviöitä [quanta/h]. (Kurnitski et al., 2021; Aganovic et al., 2021).

1.5 Huoneilman virtauskentästä toimistoympäristössä

Ihmisen kehon lähellä rajakerroksessa muodostuu luonnollisesta konvektiosta johtuva ilman virtaus ylöspäin (Zukowska et al., 2012; Licina et al., 2015b; Bivolarova et al., 2017). Käytännössä ihminen hengittää suun ja nenän lähivyöhykkeelle ylöspäin konvektiovirtauksen mukana virtaavaa ilmaa (hengitysvyöhyke), johon ilmanvaihdon puhdas tuloilma tulisi johtaa (Bolashikov et al., 2014). Esimerkiksi työpisteellä istuvan henkilön hengitysvyöhykkeen ilman laatuun vaikuttaa paljon vaatteilta ylöspäin nouseva virtaus, johon indusoi huoneilmaa henkilön ympäriltä. Tämän ihmisen termisen rajakerroksen voi kuitenkin rikkoa ilmasuihku tai liikkuminen, jolloin hengitysvyöhykkeelle voi tulla ilmaa ja aerosoleja myös muualta huonetilasta. Jos ihmiset istuvat vastakkain, ja lähellä toisiaan,

sairaana uloshengityksen aerosolit voivat saavuttaa vastapäätä istuvan hengitysvyöhykkeen. Jos henkilö yskii tai aivastaa eteenpäin, sen aiheuttama pisarapilvi voi saavuttaa nopeasti altistuvan henkilön myös kauempaa huoneesta. Yleisesti ottaen taudinaiheuttajien huoneilmassa selviytymiseen vaikuttaa moni tekijä, kuten ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus (Bolashikov and Melikov, 2009). Ilmassa leviämisen ohella hiukkasia kiinnittyy ja laskeutuu pinnoille, mutta niitä voi myös siirtyä pinnoilta takaisin huoneilmaan (Lai and Nazaroff, 2000; Lai and Nazaroff, 2005; Salmela et al., 2020).

Periaatteessa toimistotilan ilmapvirtaukset riippuvat lämmönlähteiden ja ilmanjaon voimakkuudesta sekä niiden sijainnista huoneessa ja toisiinsa nähden (Koskela et al., 2010; Kosonen et al., 2010; Nielsen et al., 2017). Lisäksi huoneilman virtauskenttään vaikuttavat ihmisten aktiviteetit huoneessa (Wei and Li, 2016). Aerosolit kulkeutuvat ja leviävät huonevirtauskentässä konvektion ja diffuusion avulla, joten taudinaiheuttajien leviämiseen vaikuttavat paljon huonevirtausten erilaiset lähteet (Coyle et al., 2022).

Huoneilman virtauskentässä tuloilmasuihkut ja erilaiset nostevoimavirtaukset ovat jatkuvassa vuorovaikutuksessa sekoittaen ja laimentaen huoneilmaa, sekä tasoittaen pitoisuuseroja (Heiselberg and Nielsen, 1996; Müller et al., 2013). Siten oleskeluvyöhykkeen virtauksia on vaikea hallita pelkällä keskitetyllä huoneilmanvaiholla. Periaatteessa työpisteiden mikroilmaston hallintaan tarvitaan paikallinen ilmanjako (Melikov, 2016). Paikallisen ilmanjaon käytössä täytyy kuitenkin välttää sairastuneen virusten leviämistä muualle huoneeseen (Ai and Melikov, 2018). Siten kohdepoistot työpisteillä voivat olla hyvä vaihtoehto taudinaiheuttajien poistamisessa.

Nykytekniikka mahdollistaa sisäympäristön olosuhteiden monitoroinnin ja ohjauksen (Yang et al., 2014; Borrego et al., 2015). Monissa rakennuksissa ilmanvaihtojärjestelmät eivät kuitenkaan toimi niin kuin on suunniteltu (Bask, 2019; Kilpeläinen et al., 2021). Tämä voi johtua rakennusten ylläpidon riittämättömistä resursseista tai puutteista järjestelmien säädöissä ja ilmapurtojen asettamisesta vastaanoton yhteydessä. Viime aikoina kiinnostuksen kohteena ovat erityisesti olleet ilmapurtoisten taudinaiheuttajien leviäminen rakennuksissa sekä ilmanvaihdon ja ilmanpuhdistuksen merkitys työntekijöiden terveydelle ja hyvinvoinnille (Ai and Melikov, 2018; Ai et al., 2019; Yang et al., 2019; Morawska et al., 2020; Morawska et al., 2017; Melikov et al., 2020; Nembhard et al., 2020). On myös pohdittu sitä, että keskitetty ilmanvaihto ei ole riittävä, jos bioaerosolien aiheuttamat riskit lisääntyvät. Tällöin ilmanjaon ja ilmanpuhdistuksen suojaava vaikutus työpisteillä on tärkeässä roolissa erityisesti riskiryhmissä. Siten työpisteen hengitysvyöhykkeen tarpeenmukainen hallinta muuttuvissa olosuhteissa on tärkeää. Tästä ei ole riittävästi tutkimustietoa, vaikka ihmisen lähivyöhykkeestä, ilmapurtoisista taudinaiheuttajista ja yskimisen virtausdynamiikasta löytyykin monia tutkimuksia (Gupta et al., 2009; Nielsen, 2009; Cao et al., 2015; Bivolarova et al., 2017; Licina et al., 2015a; Liu and Novoselac, 2014; Melikov, 2015; Liu et al., 2017; Xu et al., 2020a).

1.6 Toimistoympäristön suojausmenetelmistä

Toimistotiloissa työpisteiden hengitysvyöhyke on tärkeä osa työntekijöiden suojaamista. Kun ilmanvaihto halutaan pitää kohtuullisena tuloilmapurtoja suurentamatta, voidaan työpisteellä ottaa käyttöön erilaisia huoneilman puhdistusratkaisuja ja rakenteellisia suojausmenetelmiä. Huoneilman puhdistusratkaisuja ovat esimerkiksi hengityssuojaimet, henkilökohtaiset ilmanpuhdistimet ja huoneilman puhdistimet. Rakenteellisia suojausmenetelmiä ovat erilaiset toimistosermit, verhot sekä työpisteiden ja kalusteiden sijoittelu sisäympäristössä.

1.6.1 Hengityssuojain

Hengityssuojain on yleisesti käytetty keino suojata työntekijän hengitystä sisäympäristössä. Infektoituneella hengityssuojain vähentää elinvoimaisia viruksia sisältävien aerosolien kulkeutumista hengitysteistä huoneilmaan ja altistuvalla aerosolien kulkeutumista huoneilmasta hengitysteihin. Hengityssuojaimista kirurgiset hengityssuojaimet voivat suojata aerosoleilta melko vaihtelevasti, vaikka ne voivatkin pienentää hengityssuojaimen läpi kulkeutuvien aerosolien määrää jopa 50-75% (Milton et al., 2013; Leung et al., 2020). Aerosolien suodattumisen vaihtelevuus voi johtua suurelta osin hengityssuojaimen ohivirtauksesta. Lisäksi eräässä sairaalatutkimuksessa havaittiin, että SARS-CoV-2 virus oli tarttunut henkilöön, vaikka hänellä oli hengityssuojain ja silmäsuojat käytössä (Klompas et al., 2021). Aiemmissa tutkimuksissa hengityssuojien suojaustehokkuuden on havaittu olevan luokkaa 40-60% (Lindsley et al., 2021; Lindsley, Blachere, Beezhold, et al. 2021; Lindsley, Blachere, Law, et al. 2021). Lindsley et al. (2021) havaitsivat, että jos sekä infektoitunut että altistuja pitivät maskeja, etäisyydellä ja paikalla ei ollut suurta merkitystä altistumiseen. Tutkimuksessa myös todettiin, että jos yskijällä oli maski, altistumiskonsentraatio pieneni 80% kun taas hengityksellä vastaava vaikutus oli noin 40-50%. Jos vain altistuvalla oli maski, vaikutus oli pienempi. Ueki et al. (2021) puolestaan havaitsivat, että puuvillamaskin suojaustehokkuus oli vain 20-40%, kun taas N95 maskin tehokkuus oli jopa 80-90% altistuneella. Kaiken kaikkiaan hengityssuojaimen suojaustehokkuuden määrittäminen voi olla tapauskohtaista ja riippua suurelta osin siitä, minkälaista suojainta ja mitä menetelmää tutkimuksessa on käytetty. Vaikka hengityssuojaimet voivat olla tehokas suojausmenetelmä taudinaiheuttajia vastaan, ne voivat periaatteessa huonontaa työsuoritusta lisääntyvän hengitysvastuksen ja CO₂-takaisinhengityksen takia (Geiss, 2021; Perna et al., 2020). Sen vuoksi toimistoympäristössä olisi hyvä olla myös vaihtoehtoisia suojausmenetelmiä käytössä.

1.6.2 Ilmanpuhdistin

Kirjallisuudessa on todettu, että huoneilman puhdistinta käytetään yleisesti ilman laadun parantamiseen sisäympäristöissä (Shaughnessy and Sextro, 2006; Zhang et al., 2011; Jin et al., 2016; Chen et al., 2017). Niiden avulla ulkoilmasta ja sisäympäristöstä tulevia epäpuhtauksia sekä ihmisten bioaerosoleja voidaan suodattaa parantaen sisäilman laatua. Huoneilman puhdistimet suodattavat esimerkiksi savua, hajuja, pölyä, siitepölyä ja muita hiukkasia (Shaughnessy and Sextro, 2006). Ilmanpuhdistimia on käytetty esimerkiksi tuottamaan astmapotilaille terveellisempi sisäympäristö (Butz et al., 2011; Brehmer et al., 2019). Yleisesti käytetyt huoneilman puhdistimet ovat tehokkaampia poistamaan partikkeleita kuin kaasumaisia epäpuhtauksia (Shaughnessy et al., 1994). Hiukkasia poistetaan keräämällä ne mekaanisella suodatinmateriaalilla, tai ionisoimalla ne ja keräämällä varatut hiukkaset tämän jälkeen sähkösuodattimella (electrostatic precipitation). Kaasumaiset epäpuhtaudet suodatetaan yleensä sorption (kiinnitty materiaan) tai kemiallisen reaktion avulla.

Aiemmissa tutkimuksissa huoneilman puhdistimien on todettu parantavan sisäilman laatua. Ilmanpuhdistimen poistotehokkuus vaihtelee paljon riippuen puhdistimesta ja epäpuhtaudesta. Puhdistimen tehokkuus voi olla esimerkiksi vaihteluvälillä 20–90 % (Shaughnessy and Sextro, 2006; Kujundzic et al., 2005; Novoselac and Sigel, 2009; Zhang et al., 2011). Suodattimista HEPA-suodatin (High Efficiency Particulate Air) ja sähkösuodatin (Electrostatic Precipitator) on havaittu tehokkaaksi (Offermann et al., 1985; Shaughnessy et al., 1994; Kujundzic et al., 2005; Waring et al., 2008; Novoselac and Sigel, 2009; Gupta et al., 2020; Park et al., 2020b; Pei et al., 2020). HEPA-suodattimella hiukkasten poistotehokkuus voi olla 70–90 % (Shaughnessy et al., 1994).

Lisäksi ilmanpuhdistimen sijainnilla ja mitoitusilmavirralla voi olla merkittävä vaikutus huoneilman puhdistustehokkuuteen (Novoselac and Sigel, 2009; Zhang et al., 2010; Chen et al., 2017; Moradi Kashkooli et al., 2020). Esimerkiksi Dai and Zhao (2022) totesivat, että huoneen keskellä on optimaalinen paikka ilmanpuhdistimelle. Puhdistinta käytettäessä tulisi myös huomioida esteetön kulku ilmavirralla sekä varmistaa, että vaikutusalue ulottuu koko oleskeluvyöhykkeelle. Näiden lisäksi puhdistustehokkuuteen vaikuttaa suhteellinen etäisyys epäpuhtauslähteisiin ja muihin henkilöihin (Chen et al., 2010). Park et al., (2020a) havaitsivat, että koululuokissa ilmanpuhdistimen vaikutus pienhiukkasiin oli käytännössä noin 35 %. Kaiken kaikkiaan erityisesti ilmanvaihdon ja ilmanpuhdistuksen yhdistelmällä on saatu hyviä tuloksia epäpuhtauspitoisuuksien pienentämisessä (Blocken et al., 2021). Tällöin on tärkeää ilmanpuhdistimen riittävä kiertoilmavirta, joka on tässä tutkimuksessa 2,5-kertainen ilmanvaihtoon nähden.

Yhtenä vaihtoehtona on ottaa käyttöön henkilökohtainen ilmanpuhdistin (Grinshpun et al., 2005; Su et al., 2018; Yang, 2021). Henkilökohtaisella ilmanpuhdistimella hengitysvyöhykkeelle tulevaa ilmaa voidaan puhdistaa siten, että laite kulkee mukana, tai siten, että se on pöydällä esimerkiksi telineessä, josta puhdistettu ilmasuihku voidaan suunnata tarkoituksenmukaisesti työntekijän hengitysvyöhykkeelle. Henkilökohtaista ilmanpuhdistinta voidaan myös käyttää muiden henkilökohtaisten suojarusteiden lisänä pienentämään altistumisriskiä. Tällöin laite voidaan asentaa puhaltamaan puhdistettua ilmasuihku esimerkiksi suojavisiirin sisäpuolelle.

1.6.3 Muita suojausmenetelmiä

Eräänä vaihtoehtona on paikallisen ilmanjaon käyttö työpisteellä (Melikov et al., 2002; Melikov et al., 2013; Xu et al., 2018). Tämä johtuu siitä, että mitä lyhyempi matka suodatetulla tuloilmalla on hengitysvyöhykkeelle, sitä puhtaampaa hengitysilmalla yleensä on. Lisäksi voidaan käyttää erilaisia kohdepoistoja (Yang et al., 2013; Junjing et al., 2014). Tällöin infektoituneen henkilön bioaerosoleja on mahdollista poistaa jo työpisteellä. Tähän voi periaatteessa yhdistää sisäilman kierrättämistä ilmanpuhdistimen kautta, jolloin koneelliseen ilmanvaihtoon ei tarvitse tehdä periaatteellisia muutoksia. Yhtenä vaihtoehtona on käyttää paikallista ilmaverhoa, jolla voidaan estää muualta huoneesta tulevia aerosoleja kulkeutumasta eri vyöhykkeiden välillä (Xu et al., 2022). Tämän lisäksi esimerkiksi UV-C säteilyä hyödyntävien puhdistusmenetelmien on todettu vähentävän viruksien ja bakteerien määrää huoneilmassa (Kolarik et al., 2010; Sun et al., 2011; Lekshmi Mohan et al., 2019; Danilenko et al., 2020). On kuitenkin huomattava, että UV-valo on silmille vahingollista ja puhdistuksen aikana tilassa ei saa oleskella. Jotkut UV-puhdistimet voivat myös tuottaa otsonia huoneilmaan (Britigan et al., 2006). Lisäksi aiemmissa tutkimuksissa on käsitelty suojavisiirejä. Esimerkiksi Ronen et al. (2021) havaitsivat, että hengityssuojalla oli vähäisempi suojausvaikutus kuin visiirillä suoraan edestä tuleville aerosoleille, mutta toisaalta sivusuunnasta tuleva altistus oli suurin visiireillä. Tämän tutkimuksen mukaan visiiri esti suoraan edestä tulevia pieniä hiukkasia jopa 10 kertaa paremmin kuin kirurginmaski. Visiirit on periaatteessa tarkoitettu käytettäväksi muiden suojarusteiden lisänä (Roberge, 2016). Tähän liittyen Rosa et al. (2022) havaitsivat, että hengityssuojaimen ja visiirin yhdistelmän suojaustehokkuus oli noin 60–70 %.

1.7 Tutkimuksen tavoite

Koronaepidemian aikana ilmapölyisen altistumisen merkitys on korostunut toimistotyöntekijöillä yhtenä mahdollisena tartuntareittinä. Työsuojelurahaston tutkimushankkeessa tutkittiin laboratorion

kojärjestelyin ja tietokoneavusteisella mallinnuksella ilmanpuhdistimien, hengityssuojaimien ja ilmanjaon vaikutusta taudinaiheuttajille altistumiseen toimistoympäristössä, kun infektoitunut henkilö on huoneessa. Tutkimuksen teoreettinen ja käsitteellinen perusta jakautuu periaatteessa kahteen elementtiin: toimistoympäristön kokeelliseen tutkimukseen kontrolloiduissa olosuhteissa ja tietokonemallinnukseen laajemmasta kokonaisuudesta, jossa sovelletaan mitattua tietoa avotoimistoympäristöön. Näin ollen tämän tutkimuksen johtopäätökset perustuvat sekä kokeellisten mittausten että simulointien tuloksiin. Teoreettinen ja käsitteellinen perusta muodostuvat toimistotilan huoneilman virtauskentästä, jossa erilaiset ulkoiset voimat ohjaavat huoneilman virtauksia ja viruskonsentraation leviämistä konvektion ja diffuusion avulla. Huoneilman voidaan katsoa muodostuvan erilaisista virtauselementeistä (Heiselberg and Nielsen, 1996; Kosonen et al., 2016), joiden keskeiset osatekijät ovat tässä koneellisen ilmanjaon ilmasuihkut ja luonnollisen konvektion virtaukset. Lämmönlähteitä ovat henkilöt ja laitteet sekä valaisimet ja kesätilanteessa lämpimät pinnat. Käytännössä huoneilman virtauselementit ovat jatkuvassa vuorovaikutuksessa keskenään aiheuttaen ilman liikkeeseen muutoksia, sekoituskerroksia ja turbulenssia. Siten huonevirtausten vuorovaikutus vaikuttaa merkittävästi taudinaiheuttajien kulkeutumiseen infektoituneelta henkilöltä altistuville (Koskela et al., 2010; Müller et al., 2013; Chung and Hsu, 2001; Mustakallio et al., 2016).

Tutkimuksen kojärjestelyt tehtiin Aalto-yliopiston LVI-laboratorion koehuoneessa, jossa käytettiin aerosolitutkimukseen soveltuvia koelaitteita, kuten mm. yskimis- ja hengityskonetta sekä hengittävää lämpönukkea. Laboratoriomittauksissa tarkasteltiin altistuvan aerosolipitoisuutta, jota mitattiin lämpönukan hengitysvyöhykkeeltä.

Ilmavälitteisiä taudinaiheuttajia jäljittelivät parafiiniaerosolit, SF6-merkkiainekeasu sekä MS2-virukset. Aerosoleilla tutkittiin suodatusratkaisujen tehokkuutta ja merkkiaineella ilmanjaon sekä lämmönlähteiden vaikutusta. Viruksilla tarkasteltiin ilmanpuhdistimen merkitystä todelliseen taudinaiheuttajaan nähden. Tutkimuksessa käytettyä MS2-bakteriofagia on käytetty myös aiemmissa tutkimuksissa jäljittelemään ilmavälitteisiä taudinaiheuttajia (Vohra et al., 2006; Kim and Jang, 2018; Versoza et al., 2020). Käytännössä MS2-bakteriofagi on kolibakteerin virus, joka ei ole ihmiselle haitallinen.

Laskennallisen virtausmekaniikan (CFD-simulointi) avulla laajennettiin mittauksista saatavaa tietoa avotoimistoympäristöön ja tutkittiin eri skenaarioiden vaikutusta taudinaiheuttajille altistumiseen. Virtaussimuloinneilla huoneilman eri tekijöiden vaikutuksia voidaan tarkastella yksityiskohtaisesti (Nielsen et al., 2007; Chen, 2009; Li and Nielsen, 2011; Nielsen, 2015), kun taas kokeellisissa mittauksissa mittauspisteitä on rajallinen määrä tarkasteltavassa tilassa. Yhdistämällä näitä kahta menetelmää saadaan kokonaisvaltainen näkemys ajallisesta ja paikallisesta altistumisesta toimistoympäristössä.

Tehty tutkimus tuottaa uutta tutkimustietoa ihmisten altistumisesta ilmavälitteisille taudinaiheuttajille sekä uutta tietoa työpisteiden virtauskentästä ja sen vuorovaikutuksesta sisäympäristössä. Tähän liittyvät läheisesti ilmavälitteisten taudinaiheuttajien leviäminen huoneessa konvektion ja diffuusion avulla sekä ilmasuihkujen ja nostevoimavirtausten vaikutuksesta työpisteen hengitysvyöhykkeellä. Työssä otettiin huomioon myös puhdistilojen standardien suosituksia (CEN, 2019a; CEN, 2015a; CEN, 2015b; CEN, 2019b).

Lisätietoa tuotettiin myös siitä, miten työntekijät voidaan suojata toimistotiloissa käytännöllisillä ratkaisuilla. Tehostettu ilmanvaihto voi pienentää sairastumisriskiä, mutta se voi olla myös kalliimpaa kuin tarpeenmukainen paikallinen ilman puhdistaminen tai työpisteiden suojaaminen. Yleisesti ottaen ilmanvaihdon tehostamista voidaan kuitenkin pitää tehokkaana keinona aerosolipitoisuuden laimentamiseksi (WHO, 2014; ECDC, 2020; ASHRAE, 2020; REHVA, 2021). Tämä tekee suurista,

nykyisten standardien mukaisesti ilmanvaihdetuista tiloista kohtuullisen turvallisia. Pienemmät huoneet, joissa on suhteellisen pieni ilmanvaihtuvuus, muodostavat suuremman riskin. Pienten huoneiden tilakäyttäjien rajoittaminen, tilakäyttöajan lyhentäminen ja fyysisen etäisyyden noudattaminen pitää useimmissa tapauksissa tartunnan todennäköisyyden kohtuullisena (WHO, 2020d; WHO, 2020e). Periaatteessa tutkimuksen ja teollisuuden investoinnit olisi hyvä kohdentaa käytännön teknisten ratkaisujen kehittämiseen tartuntatautien aerosolien leviämisen estämiseksi sisätiloissa, rakennuksissa ja julkisissa liikennejärjestelmissä. Tutkimuksen uutuusarvo on toimistoympäristön kokeellinen ja tietokoneavusteinen tutkimus ilmanjaon ja erilaisten ilmanpuhdistimien sekä hengityssuojaimien suojausvaikutuksesta taudinaiheuttajilta. Tutkimuksella tuotettiin uutta tietoa työpaikkojen työpisteiden kustannustehokkaista suojauskeinoista.

2. Menetelmät

2.1 Tutkimus

Työsuojelurahaston tutkimushankkeessa selvitettiin laboratorion koejärjestelyin ja tietokonemallinnuksella ilmanpuhdistimien, kasvomaskien, lämpökuorman ja ilmanjaon vaikutusta virukselle altistumiseen, kun infektioitunut henkilö on huoneessa. Tutkimuksessa käytettiin yksimis- ja hengityskonetta, hengittävää lämpönukkea sekä optisia hiukkasmittareita ja kaasuanalysointia.

Ilmavälitteisiä taudinaiheuttajia jäljittelivät MS2-virukset ja parafiiniöljystä muodostettavat aerosolit sekä merkkiainekeasu, joilla tarkasteltiin taudinaiheuttajien ilmavälitteisyyttä ja tartuntariskiä. Virukset jäljittelevät luotettavimmin taudinaiheuttajia, kun taas parafiiniöljyn aerosoleilla pystyttiin tutkimaan suodatustehokkuuksia. Merkkiainekeasulla tutkittiin ilmanjaon tehokkuutta ja lämmönlähteiden vaikutusta, jolloin ajalliset ja paikalliset konsentraatioerot kuvaavat huoneilman sekoittumista.

Tutkimuksessa tarkasteltiin ihmisen altistumista työpisteillä, kun infektioitunut henkilö työskentelee huoneessa. Tutkimusmenetelminä olivat kokeellinen tutkimus ja tietokonemallinnus. Kokeellinen tutkimus tehtiin laboratorion kontrolloiduissa olosuhteissa ja tietokonemallinnuksella tarkasteltiin avotoimiston huoneilman virtauskenttää yksityiskohtaisesti. Kokeellista tutkimusta käytettiin myös virtauslaskennan reunaehto-asettamisessa.

Tutkimuksen viitekehys pohjautuu aikaisempiin tutkimuksiin ihmisen hengitysvyöhykkeeltä ja huonevirtausten vuorovaikutuksesta (Ai and Melikov, 2018; Ai et al., 2019; Yang et al., 2019; Morawska et al., 2017; Morawska et al., 2020; Cao et al., 2015; Bivolarova et al., 2017; Licina et al., 2015; Gupta et al., 2009; Nielsen, 2009; Liu and Novoselac, 2014; Melikov, 2015; Liu et al., 2017; Xu et al., 2020a; Müller et al., 2013; Chung and Hsu, 2001; Mustakallio et al., 2016; Rim et al., 2009; Melikov and Kaczmarczyk, 2007; Licina et al., 2015a). Tutkimuksen osatekijöinä ovat erilaiset ilmanjakotavat (Yang et al., 2019; Melikov et al., 2020; Cao et al., 2015) sekä henkilökohtainen ilmanpuhdistuslaite (Grinshpun et al., 2005; Su et al., 2018) ja huonekohtainen ilmanpuhdistuslaite (Pei et al., 2020; Shaughnessy et al., 1994; Waring et al., 2008; Offermann et al., 1985; Novoselac and Siegel, 2009; Gupta et al., 2020; Zhang et al., 2011; Butz et al., 2011; Brehmer et al., 2019) sekä hengityssuojien suojaava vaikutus (THL, 2020; REHVA, 2021; WHO, 2020; Ai and Melikov, 2018; Ai et al., 2019; Morawska et al., 2020).

Tutkimuksen uutuusarvo on kokeellinen ja tietokoneavusteinen tutkimus ilmanjaon ja erilaisten ilmanpuhdistimien sekä hengityssuojaimien suojausvaikutuksesta hengitysinfektioille altistumiseen toimistoympäristössä. Tutkimuksella tuotetaan uutta tietoa työpisteen suojauskeinoista, jotka ovat kustannustehokkaita ja helposti käyttöön otettavissa työpaikoilla.

Tutkimuskysymykset:

1. Miten infektoituneen sijainti vaikuttaa konsentraation paikalliseen ja ajalliseen vaihteluun?
2. Mikä on henkilökohtaisen ilmanpuhdistimen ja huoneilmaa kierrättävän ilmanpuhdistimen suojaustehokkuus yhdessä ilmanvaihdon kanssa?
3. Miten hengitysvyöhykkeellä voidaan pienentää altistumisriskiä erilaisilla ilmanvaihto- ja ilmanpuhdistusratkaisuilla?

2.2 Kokeellisen tutkimuksen menetelmät

2.2.1 Aerosoleilla tehtävät koejärjestelyt

Aerosoleilla tehtävät testit toteutettiin yskimis- ja hengityskoneella ja hengittävällä lämpönukella. Koejärjestelyn tarkoituksena oli tarkastella ihmisen altistumista työpisteellä ajan ja paikan suhteen, kun sairas ihminen työskentelee tai yskii huoneessa. Koejärjestelyssä oli toimistotilan osakuormatilanne. Hengittävä lämpönukke istutettiin yhdelle työpisteelle, ja hengityskone oli yhdistettynä ihmisen geometriaa jäljittelevään termiseen malliin (Dummy) toisella työpisteellä, jonka sijaintia vaihdettiin mittaus kerrallaan.

2.2.2 Merkkiaineella tehtävät koejärjestelyt

Merkkiaineella tarkasteltiin ilmanjaon ja lämpökuormien vaikutusta merkkiainepitoisuuteen ajan ja paikan suhteen. Koejärjestelyssä oli tyypilliset ryhmätyötilan olosuhteet, joissa huonetilan ilmanvaihto määriteltiin ihmisten lukumäärän ja tilan lämpökuormien perusteella. Koehuoneessa mitattiin merkkiainepitoisuuden lisäksi nopeus- ja lämpöolosuhteita.

2.2.3 Viruksilla tehtävät koejärjestelyt

Koejärjestelyssä huoneeseen vapautettiin MS2-virusta. Koejärjestely mallinsi tilannetta, jossa sairas ihminen on huoneessa ja viruspitoisuus kasvaa ilmanvaihtuvuuden mukaiseen tasapainotilanteeseen. Mittauksissa tutkittiin huoneessa olevan ilmanpuhdistimen tehokkuutta viruksiin. Aluksi MS2-virusaineistoa kasvatettiin laboratorioissa aerosolisointia varten, minkä jälkeen viruksia aerosolisoiitiin tasaisesti koetilaa. Ensimmäinen virusnäyte otettiin BioSampler-keräimellä 140 minuuttia syötön aloittamisesta, minkä jälkeen ilmanpuhdistin käynnistettiin ja 30 minuuttia käynnistyksestä otettiin toinen näyte.

2.3 Tietokonemallinnuksen menetelmät

Tietokonemallinnuksella (CFD-simulointi) laskettiin numeerisesti avotoimiston huoneilman virtauskenttää erilaisilla skenaarioilla. Mallinnuksen tarkoituksena oli tuottaa yksityiskohtaista laskennallista tietoa mitatun tiedon tueksi. Mallinnuksella tarkasteltiin erilaisten skenaarioiden ja tekijöiden todennäköistä vaikutusta virtauskenttään annetuilla reunaehdoilla, mikä syventää mittauksista saatavaa tietoa laskennallisesti.

3. Aerosolien leviäminen ja suojausratkaisujen tehokkuus

3.1 Menetelmät

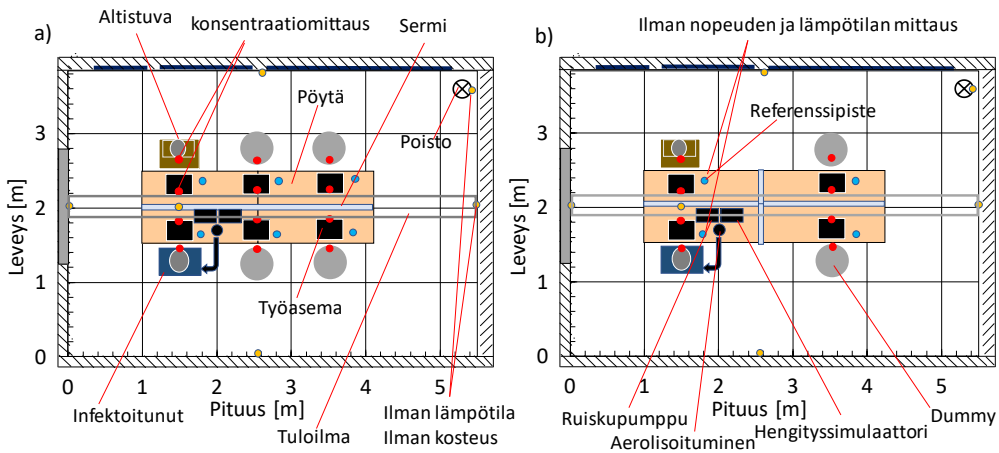
Osatehtävän tavoitteena oli tarkastella ihmisen altistumista työpisteellä, kun infektoitunut henkilö työskentelee huoneessa. Koejärjestely toteutettiin toimistotilassa (75 m^3 , 21 m^2), jossa oli max. 6 työpistettä. Koejärjestelyssä oli ihmismääräperusteinen vakioilmavirta $6 \times 6 \text{ L/s}$, per henkilö ($1,72 \text{ L/s}$, m^2 , $\text{ACH}=1,72 \text{ 1/h}$). Tarkoituksena oli selvittää sairastumisriskiä ajan ja paikan suhteen, kun sairastunut on työpisteellä. Koeasetelma jäljitteli tyypillistä toimistotilan välikauden osakuoratilannetta, jossa tilassa työskentelee kaksi henkilöä. Koejärjestelyssä altistuvaa henkilöä jäljitteli hengittävä lämpönukke ja sairasta henkilöä lämpönukan ylävartalo, joka oli yhdistetty hengitys- ja yskimiskoneeseen, jonka ilmavirta oli lämmitetty. Aerosolit syötettiin huoneilmaan tasaisesti aerosolisointiin tarkoitetun maljan kautta tilavuusvirralla 6 L/min , joka jäljitteli tyypillistä kevyen toimistotyön hengitystä.

3.1.1 Koejärjestely

Testihuoneen sisäpituus oli $5,5 \text{ m}$, leveys $3,8 \text{ m}$ ja korkeus $3,6 \text{ m}$. Lattiapinta-ala oli noin 21 m^2 ja sisäilman tilavuus noin 75 m^3 . Kuva 1 esittää koeasetelman ylhäältä. Koeasetelmassa on kaksi erilaista tarkastelutilannetta: ensimmäisessä jäljitellään neuvottelutilannetta (Kuva 1a) ja toisessa toimistotilannetta (Kuva 1b). Neuvottelutilanteessa on 6 työpistettä ja toimistotilanteessa 4 työpistettä. Toimistotilanteessa työpisteet on erotettu sermeillä. Konsentraation mittauspisteet olivat hengitysvyöhykkeellä ja työasemilla. Hengitysvyöhyke mitattiin kaksi senttimetriä altistuvan nukun suun vierestä, jonka kautta sisäänhengitys tapahtui. Esimerkiksi Yun et al. (2022) saivat tutkimuksessaan varsin loogisia tuloksia hengitysvyöhykkeeltä. Pei et al. (2019) puolestaan havaitsivat, että poistoilman pitoisuus korreloi hyvin huoneilman pitoisuuden kanssa ainoastaan sekoittavan ilmanjaon tapauksessa.

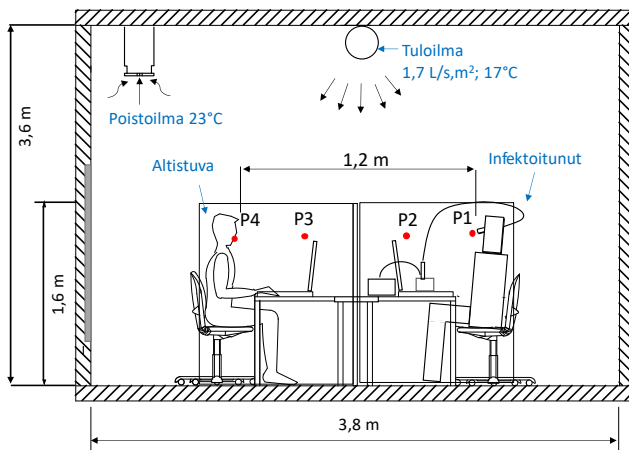
Yhden testitapauksen mittausaika oli noin 3 tuntia. Itse mittaus kesti noin 2 tuntia, jonka jälkeen varattiin 1 tunti mitatun tiedon keräykseen ja huonetilan tuuletukseen. Pitoisuuden mittauksessa oli yhtä aikaa 3 mittauspistettä: altistuvan hengitysvyöhyke, altistuvan työpiste ja infektoituneen työpiste (Kuva 1, punaiset pisteet). Hengityskoneen tuottama aerosolivirta mitattiin esimittauksessa. Mittauspisteiden välinen etäisyys oli 40 cm - 40 cm - $40 \text{ cm} \pm 3 \text{ cm}$, ja korkeus pöydän pinnasta 40 cm -

35 cm-35 cm-40 cm±3 cm). Hengitysvyöhykkeen määrittäminen pohjautuu aikaisempaan tutkimukseen (Ai et al., 2019; Bivolarova et al., 2017; Rim et al., 2009; Melikov and Kaczmarczyk, 2007; Licina et al., 2015a). Ilman nopeusolosuhteet mitattiin pöydän yläpuolelta korkeuksilta 0,8 m, 1,1 m, 1,4 m ja 1,7 m. Pöytälevyn yläpinta oli korkeudella 0,75 m.



Kuva 1. Koeasetelma ylhäältä: a) neuvottelutilanne ja b) toimistotilanne. Punaiset pisteet kuvaavat pitoisuuden mittauskohtaa, oranssit pisteet lämpötila- ja kosteusmittausta ja siniset pisteet ilman nopeus- ja lämpötilamittausta.

Kuva 2 esittää koeasetelman sivulta katsottuna. Altistuvaa tässä jäljittelevä hengittävä lämpönukke on kuvassa vasemmalla ja sairasta jäljittelevä lämpönukke sekä hengityskone oikealla. Nukkejen hengitysvyöhykkeiden välinen etäisyys vastakkaisilla työasemilla oli 1,2 m ja vierekkäisillä työpisteillä noin 1 m neuvottelutilanteessa ja 2 m toimistotilanteessa.



Kuva 2. Koeasetelma sivulta.

Taulukko 1 esittää testihuoneen ilmanvaihtoa mittaavia parametrejä. Ilmanjakomenetelmä oli sekoittava ilmanvaihto kattovyöhykkeeltä. Tuloilma tuotiin rei'itetystä suutinkanavasta, jonka halkaisija oli 0,2 m, ja joka asennettiin katon keskelle ulottuen koko katon pituudelle. Tuloilman

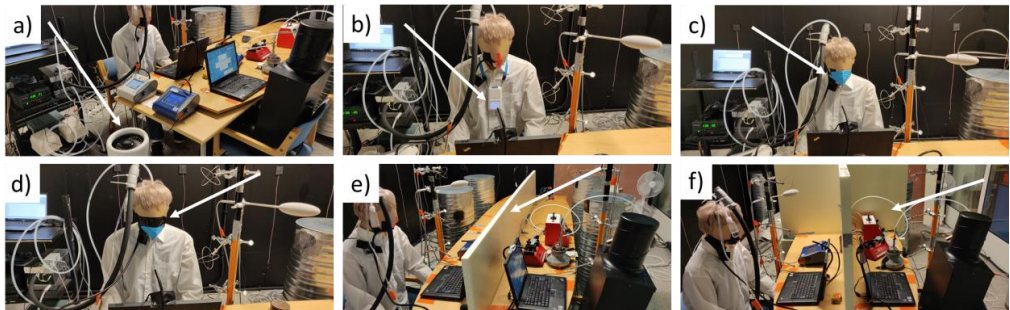
virtauskuvio oli 180° alaspäin oleskeluvyöhykkeelle. Savuvisualisointi osoitti, että tuloilma saavutti pöytätason ja se sekoittui hyvin ympäröivään sisäilmaan. Esimittauksessa ilmanjaon sekoittumista testattiin käyttämällä huoneessa myös lisäpuhallinta, jolloin havaittiin, että huoneen pitoisuusastot pysyivät tasapainotilanteessa lähes vakiona. Näin voitiin todentaa, että ilmanjako sekoitti huoneilman hyvin (ei täydellisesti). Huoneilma poistettiin kattovyöhykkeen nurkkauksesta ovesta katsottuna vastakkaisella puolella huonetilaa. Koehuoneen sisäiset lämpökuormat olivat maltillisella tasolla (12,5 W/m²).

Kuva 3 esittää käytettyjä suojausmenetelmiä mittaustilanteessa ja Taulukko 2 lisätietoja mitatuista suojausmenetelmistä.

Taulukko 1. Testihuoneen ilmanvaihtoa mitoittavat suureet (epävarmuus ±5%).

Lämpökuorma	Lämpöteho	Lämpövuoto	Ilmanvaihto	Ilmanvaihto	Ilmanvaihto
	W	W/lattia_m ²	parametri	arvo	arvo/m ²
Lämpönlukke	80	3,8	Henkilöt max.	6 hlö	0,29 hlö/m ²
Dummy	85	4,1	Tuloilma (6 L/s,hlö)	36 L/s	1,7 L/s,m ²
2 x kannettava	80	3,8	Tsp*	17 °C	
Valaisin	90	4,3	Tref*	23 °C	
Lämpöhäviöt	-73	-3,5	ACH	1,7 1/h	
Ikkuna	0	0	Ilmanpuhdistin (2,5xIV)	324 m ³ /h	
Lämpöteho yht.	262	12,5	Jäähdytysteho yht.	-262 W	-12,5 W/m ²

*Tsp on tuloilman lämpötila, Tref on huoneilman tavoitelämpötila referenssipisteessä korkeudella 1,1 m.



Kuva 3. Suojausmenetelmät: a) Huoneilmanpuhdistin lattialla. b) Henkilökohtainen ilmanpuhdistin altistuvan kaulalla (20 cm suun alapuolella). c) FFP2-hengityssuojain altistuvalla. d) FFP2-hengityssuojain, teipatut reunat. e) Matala toimistosermi pöydän keskellä neuvotteluasetelmassa (korkeus 40 cm). f) Korkea toimistosermi toimistotyöasetelmassa ulottuen lattiaan asti (korkeus 80 cm pöydän yläpuolelle).

Taulukko 2. Käytetyt suojausmenetelmät.

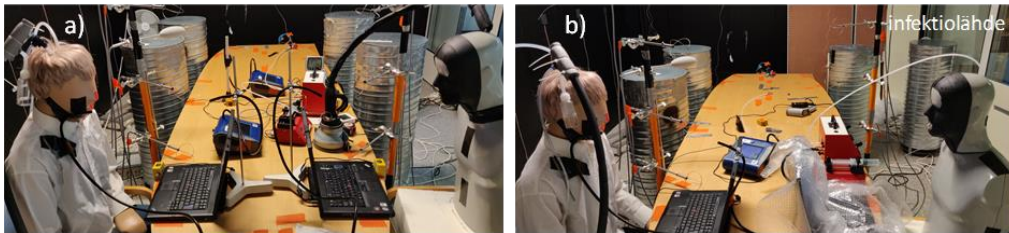
Suojausmenetelmät	Kuvaus
Huoneilmanpuhdistin, Lifa air, model LA S302	4,3 1/h, HEPA-filter, electronic sterilizer
Henk.koht.ilmanpuhdistin, Lifa air, model 6gcool	Airflow 2,4 m ³ /h, HEPA, ionizer, UV type A led
FFP2 NR particle filtering mask, Lifa air, LMP800	EN149:2001+A1:2009
Matala sermi pöydän keskellä	Polyuretaanilevy, korkeus 40 cm
Korkea sermi pöydän keskellä	Polyuretaanilevy, korkeus 80 cm
Työpisteiden sermit (edessä ja sivulla)	Polyuretaanilevy, korkeus 80 cm

3.1.2 Sairasta henkilöä jäljittelevä infektiolähde

Infektiolähde rakennettiin yhdistämällä yskimis- ja uloshengityssimulaattori (CHeST, CH Technologies Inc.) lämpönuken lämmitettyyn ylävartaloon (Kuva 4). Yskimiskoneen periaate perustui aiemmista tutkimuksista saatuun tietoon (Liu and Novoselac, 2014; Gupta et al., 2009; Licina et al., 2015a; Ai and Melikov, 2018). Hengitykselle ja yskimiselle oli simulaattorissa omat vaihdettavat suuttimet.

Hengitystapauksessa infektiolähteen parafiiniöljyä vapautettiin ruiskupumpusta 0,6 mL/h, joka aerosolisoiitiin Blaustein-sumuttimessa. Infektiolähteen uloshengitysvirtaus oli 6 L/min. Tuotettu aerosolijakauma oli muodoltaan samankaltainen kirjallisuudessa aiemmin esillä olleisiin oikeasta hengityksestä mitattujen kanssa (Morawska et al., 2009; Johnson et al., 2011).

Yskimistapauksessa suuttimen ilmaseoksen lähtönopeus määritettiin olevan 10 ± 1 m/s, joka jäljitteli tavanomaista yskimisen alkunopeutta kirjallisuudessa (Ai and Melikov, 2018). Yksittäisen yskäisyksen keston asetusarvo oli 1 s ja yhden mittausjakson aikana mitattiin 21 kpl yskäisyjä. Yskäisyjen välillä oli 1 minuutti. Näin saatiin riittävä määrä toistoja tulosten tarkasteluun, koska jokainen yskäisy oli pisarajakaumaltaan erilainen. Yskimistapauksessa parafiiniöljyä syötettiin ruiskupumpusta 66 μ L/min suoraan nuken suussa olevaan sumuttimeen, jossa parafiiniöljy aerosolisoiutui jäljitellen yskäisyä.



Kuva 4. Infektoitunutta henkilöä mallintava hengitys- ja yskimiskone yhdistettynä lämmitettävän nuken ylävartaloon: a) hengityasetelma ja b) yskimisasetelma.

3.1.3 Altistuvaa henkilöä jäljittelevä hengittävä lämpönukke

Koeasetelmassa miespuolinen hengittävä lämpönukke (valmistaja P.T. Teknik Limited, Tanska) istutettiin työtuoliin. Lämpönukke koostui 26 kehon osasta, jotka lämmitettiin asetuslämpötilaan $36,4^{\circ}\text{C}$ ihon lämpövastuksen ollessa $0,054^{\circ}\text{C}/\text{m}^2$, W. Nuken osien lämpötehoa säädettiin ulkoisten olosuhteiden perusteella siten, että kehon osien sisälämpötila olisi tavoitelämpötilassa (comfort-mode). Kevyttä toimistotyötä jäljittelevän nuken hengitys asetettiin arvoon 6 L/min ja hengityssykli oli yhteensä 7 sekuntia: 2,5 s sisään, 1 s tauko, 2,5 s ulos ja 1 s tauko. Uloshengitysilman lämpötilan asetusarvo oli 35°C ja kostutetun uloshengitysilman suhteellinen kosteus oli esimittauksessa luokkaa 85 %. Lämpönuken nenäuloshengitys oli noin 40 astetta alaspäin ja suuhengitys eteenpäin (Ai and Melikov, 2018; Bivolarova et al., 2017; Melikov and Kaczmarczyk, 2007).



Kuva 5. Hengittävä lämpönukke (valkoinen paita).

3.1.4 Käytetyt mittauslaitteet

Taulukko 3 esittää käytettyjen mittauslaitteiden tietoja. Lämpönuken hengitysvyöhykkeen aerosolipitoisuus mitattiin käyttämällä optista hiukkaskoon mittaria (TSI OPS-3330), jossa hyödynnetään lasertekniikkaa. Mittarin keräimessä oli vakioilmavirta 1 L/min. Työpisteiden pitoisuudet mitattiin käyttämällä TSI Dusttrak DRX 8533 -optista laskuria. Mittausjakson aikana molemmilla mittareilla mitattiin 1 sekunnin välein. Optisen mittarin mittausepävarmuus oli $\pm 10\%$. Nollakalibrointi tehtiin Dusttrak-mittariin ennen jokaista mittausta. Ilman nopeus ja lämpöolosuhteet puolestaan mitattiin Dantec ComfortSense-antureilla, jotka ovat lämpötilakompensoituja suuntariippumattomia antureita. Ilman lämpötila ja kosteus mitattiin lattialta, pöydältä ja jokaiselta seinältä, käyttämällä Tinytag plus 2 mittaria, jossa anturi on noin 2 cm:n etäisyydellä mittarin alustana olevasta pinnasta.

Taulukko 3. Käytettyjen mittauslaitteiden tietoja.

Mittari	Tarkkuus
TSI Optical particle Sizer (OPS) Model 3330	Laskuri 100% $>0,3\mu\text{m}$, ilmavirta $\pm 5\%$
TSI Dusttrak DRX 8533 optical counter	Resoluutio $\pm 0,1\%$, min $1\mu\text{g}/\text{m}^3$, ilmavirta $\pm 5\%$
Dantec comf.sense trans. 54T33 omnidir. probe	Ilman nopeus $\pm 2\% \pm 0,02\text{ m/s}$, lämpötila $\pm 0,5^\circ\text{C}$
Dantec comf.sense transducers 54T38 oper.temp.	Operatiivinen lämpötila $\pm 0,2^\circ\text{C}$
Tinytag plus 2 TGP- 4500	Ilman lämpötila $\pm 0,5^\circ\text{C}$, RH $\pm 3\%$ jos 25°C

3.1.5 Testitapaukset

Taulukko 4 esittää hengitystapauksessa mitatut vertailutapaukset ja Taulukko 5 yskimistapauksessa mitatut vertailutapaukset.

Taulukko 4. Hengitystapauksessa mitatut testitapaukset.

Testitapaus	Suojausmenetelmä
H001	Ei suojausmenetelmiä käytössä (neuvotteluasetelma, vertailutaso)
H002	Huoneilman puhdistin pöydän päädystä (neuvottelu)
H003	Henkilökohtainen ilmanpuhdistin altistuvan kaulalla (neuvottelu)
H004	FFP2-hengityssuojain altistuvalla (neuvottelu)
H005	FFP2-hengityssuojain altistuvan, reunat teipattu (neuvottelu)
H006	Matala toimistosermi pöydän keskellä (neuvottelu)
H007	Korkea toimistosermi pöydän keskellä (neuvottelu)
H008	Korkea toimistosermi edessä ja sivulla (toimistotyöasetelma)
H009	Korkea toimistosermi edessä ja sivulla ulottuen lattiaan (toimistotyö)

Taulukko 5. Yskimistapauksessa mitatut vertailutapaukset.

Testitapaus	Suojausmenetelmä
Y001	Ei suojausta
Y002	Kirurgin hengityssuojain infektoituneella
Y003	Kirurgin hengityssuojain altistuvalla
Y004	Kirurgin hengityssuojain infektoituneella ja altistuvalla
Y005	FFP2-hengityssuojain infektoituneella
Y006	FFP2-hengityssuojain altistuvalla
Y007	FFP2-hengityssuojain infektoituneella ja altistuvalla
Y008	Suojavisiiri infektoituneella
Y009	Suojavisiiri altistuvalla
Y010	Henkilökohtainen ilmanpuhdistin infektoituneella
Y011	Henkilökohtainen ilmanpuhdistin altistuvalla
Y012	Huoneilmanpuhdistin (2,5 x ilmanvaihto)
Y013	Matala toimistosermi pöydän keskellä (neuvotteluasetelma)
Y014	Korkea toimistosermi pöydän keskellä (neuvotteluasetelma)

3.2 Tulokset

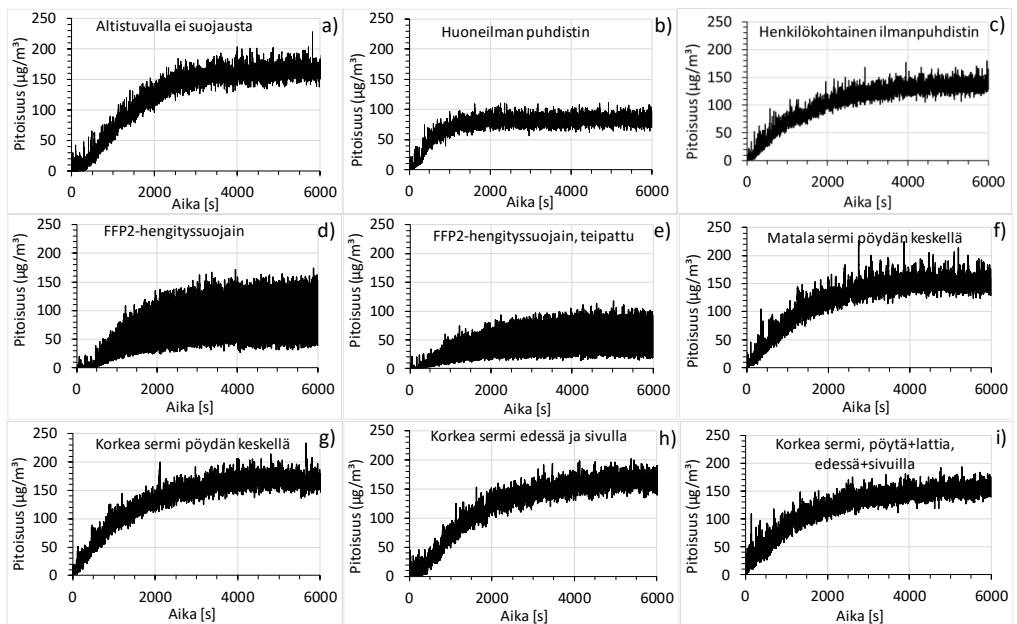
3.2.1 Suojusratkaisujen tehokkuus, kun aerosoleja tuotettiin hengittämällä

Kuva 6 esittää altistetun lämpönuken hengitysvyöhykkeen konsentraation kehittymistä. Tulokset osoittavat, että massapitoisuus saavutti sekoittavalla ilmanjaolla tilastollisesti tasapainotilanteen noin yhdessä tunnissa ($150\text{--}200\ \mu\text{g}/\text{m}^3$), jos mitään suojausmenetelmiä ei ollut käytössä. Tämä tulos saavutettiin ilmanvaihtuvuudella 1,7 1/h (ACH). Melko samanlainen konsentraation kehittyminen havaittiin, jos työpisteiden välissä oli toimistosermit. Tämä viittaa siihen, että toimistosermien vaikutus työpisteellä altistumiseen on varsin vähäinen, jos infektoitunut hengittää eikä yski huoneessa. Tulos selittyy sekoittavalla ilmanjaolla ja pienten aerosolien sekoittumisella ilmapvirtausten mukana huonetilaan. Näin ollen pöydällä olevat sermit eivät estäneet aerosoleja pääsemästä altistuvan hengitysvyöhykkeelle.

Tuloksissa huoneilman puhdistin tuotti tasapainotilanteen alle $100\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ noin puolessa tunnissa. Tämä tarkoittaa, että HEPA-suodattimen ja elektronisen suodattimen sisältävä ilmanpuhdistin pienensi hengitysvyöhykkeen pitoisuutta noin 50 %, kun puhdistimen kierrätysilmavirta ($325\ \text{m}^3/\text{h}$) oli 2,5-kertainen ilmanvaihtoon nähden.

Henkilökohtainen ilmanpuhdistin, joka oli kaulalla 20 cm suun alapuolella, aiheutti hengitysvyöhykkeelle tasapainotilanteen $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, joten henkilökohtainen ilmanpuhdistin pienensi altistuskonsentraatiota noin 20 %. Laitetta käytettiin suurimmalla teholla, jolloin valmistajan ilmoittama ilmavirta oli $2,4 \text{ m}^3/\text{h}$. Henkilökohtaisen ilmanpuhdistimen sijainti ja suuntaus ovat tärkeitä osatekijöitä, koska puhdistetun ilman ilmavirta on pieni ja se indusoi huoneilmaa matkalla hengitysvyöhykkeelle. Parempi suojaustehokkuus saavutettaisiin sijoittamalla puhdistin kaulan sijaan lähemmäs hengitysvyöhykettä.

FFP2-hengityssuojain vähensi myös altistumista. Tasapainotilanteen pitoisuus oli $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mutta vaihtelun keskihajonta oli suhteellisen suuri ($\text{SD} \pm 40 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mikä johtui siitä todennäköisimmin siitä, että nukke hengitti hengityssuojaimen takana. Lisäksi vaihteluun vaikutti ohivirtaus suojaimen ulkoreunojen kautta, jolloin huoneilmaa virtasi suojaimen sisäpuolelle. Vuotoilman vaikutus nähtiin selvästi, kun hengityssuojaimen reunat oli teipattu lämpönuken pintaan. Tällöin pitoisuus aleni ja vaihtelun keskihajonta pieneni, kuitenkin siten, että keskihajonnan ja keskiarvon suhde SD/AVG oli molemmissa tapauksissa samaa suuruusluokkaa.

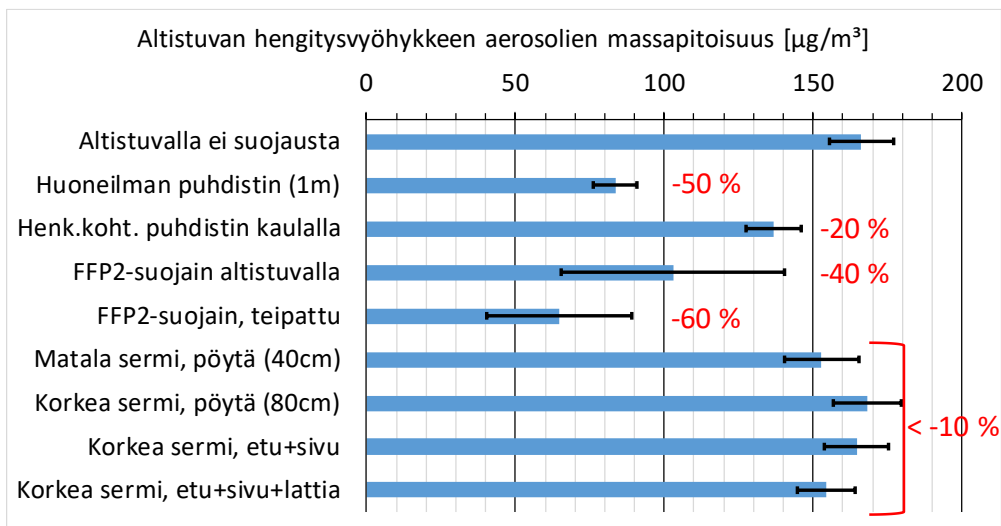


Kuva 6. Konsentraation kehittyminen ajan suhteen terveeseen hengitysvyöhykkeellä: a) Ei suojausmenetelmiä käytössä. b) Huoneilman puhdistin lattialla. c) Henkilökohtainen ilmanpuhdistin kaulalla. d) Altistuvalla FFP2-hengityssuojain e) Altistuvalla FFP2-hengityssuojain, reunat teipattu. f) Matala sermi pöydän keskellä ($h=40 \text{ cm}$). g) Korkea sermi pöydän keskellä ($h=80 \text{ cm}$). h) Korkea toimistosermi työpisteellä (edessä ja sivulla). i) Korkea toimistosermi työpisteellä ulottuen lattiaan (edessä ja sivulla).

Kuva 7 ja Taulukko 6 esittävät suojausmenetelmien vaikutusta altistuvan hengitysvyöhykkeen aerosolikonsentraatioon huonetilan tasapainotilanteessa, kun tilastollisessa arvojoukossa oli 1000 arvoa. Tulosten perusteella hengitysvyöhykkeen aerosolipitoisuus oli ilman suojausmenetelmiä $166 \pm 11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\text{avg} \pm \text{sd}$) altistuvan hengitysvyöhykkeellä (1,2 m infektoituneesta henkilöstä). Altistuvan työasemalla pitoisuus oli $173 \pm 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (80 cm lähteestä) ja infektoituneen työasemalla $487 \pm 845 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (40 cm lähteestä). Tuloksissa aerosolipitoisuus kasvoi loogisesti kohti infektiolähdettä, vaikka

huoneilma oli hyvin sekoittunutta, koska aerosolipitoisuus on luonnollisesti suurimmillaan aerosolilähteen kohdalla.

Tulosten mukaan altistumisepitoisuus oli $84 \pm 7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ huoneilmanpuhdistimella ja $137 \pm 9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ henkilökohtaisella ilmanpuhdistimella, jotka edustivat tässä koneellisia suodatusmenetelmiä. Tulosten perusteella huoneilmanpuhdistin käytetyllä ilmaviralla voi alentaa keskimääräistä pitoisuutta 50 % ja henkilökohtainen ilmanpuhdistin 20 % tyypillisellä käyttötavalla. Kun altistuvalla oli FFP2-hengityssuojain, hengitysvyöhykkeen keskimääräinen aerosolipitoisuus laski arvoon $103 \pm 38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mikä vastasi noin 40 % pienempää altistumiskonsentraatiota kuin ilman suojausta. Nyt lämpönuken hengitys aiheutti vaihtelua tuloksissa, koska mittaus tehtiin maskin sisäpuolelta. Tärkeä havainto oli, että toimistosermiellä ei näyttänyt olevan merkittävää vaikutusta terveen hengitysvyöhykkeen konsentraatioon, koska pienet aerosolit sekoittuivat ja kulkeutuivat ilmavirran mukana sisäilmassa toisille työpisteille.



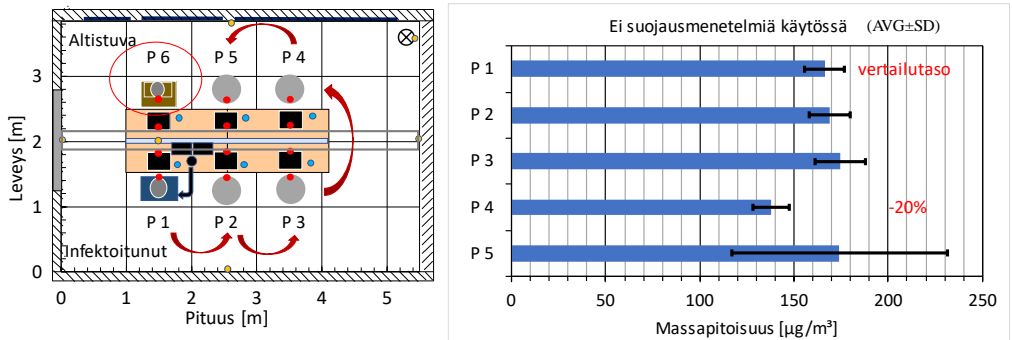
Kuva 7. Suojausmenetelmän vaikutus altistuvan hengitysvyöhykkeen aerosolipitoisuuteen huonetilan tasapainotilanteessa (1000 arvon keskiarvoistus, $\text{AVG} \pm \text{SD}$).

Taulukko 6. Suojausmenetelmien vaikutus terveen hengitysvyöhykkeen aerosolikonsentraatioon tasapainotilanteessa.

Testitapaus	AVG ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	muutos (%)
Ei suojausta	166	11	vertailutapaus
Huoneilman puhdistin (2,5 x ilmanvaihto)	84	7	-50
Henkilökohtainen ilmanpuhdistin	137	9	-18
FFP2-maski	103	38	-38
FFP2-maski, reunat teipattu	65	24	-61
Matala toimistosermi (neuvottelutilanne)	153	12	-8
Korkea toimistosermi (neuvottelutilanne)	168	11	1
Korkea toimistosermi työpisteillä (edessä ja sivulla)	165	11	-1
Korkea tst-sermi ulottuen lattialle (edessä ja sivulla)	154	10	-7

Kuva 8 esittää infektoituneen istumapaikan vaikutusta altistuvan hengitysvyöhykkeen konsentraatioon, kun suojausmenetelmiä ei ollut käytössä. Testitapauksessa infektoitunutta

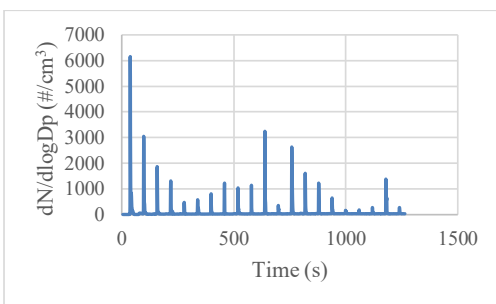
jäljittelevää lämpömallia siirrettiin eri työpisteille ja altistuvaa jäljittelevä hengittävä lämpönukke pysyi paikallaan työpisteellä P 6 (pöydän päädyssä, ikkunan puolella). Altistuvan hengitysvyöhykkeen aerosolipitoisuus oli muuten samaa suuruusluokkaa, mutta infektoituneen ollessa työpisteellä P 4, aerosolipitoisuus altistuvan hengitysvyöhykkeellä oli matalampi. Näin ollen pienin altistuminen havaittiin, kun infektoitunut ja altistuva istuivat samalla puolella pöytää mahdollisimman kaukana toisistaan. Sen lisäksi havaittiin, että viereisellä työpisteellä P 5 oleva infektoitunut aiheutti suurimman vaihtelun altistuvan hengitysvyöhykkeelle. Tämä voi johtua siitä, että katosta alaspäin suuntautuva tuloilma kuljettaa aerosoleja viereiselle työpisteelle. Poiston vaikutus oli tässä varsin rajallinen, koska sama tulos havaittiin myös toisella puolella pöytää.



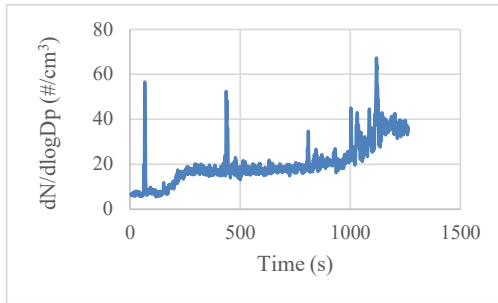
Kuva 8. Istumapaikan vaikutus altistuvan hengitysvyöhykkeen aerosolipitoisuuteen. Mittauksessa infektoitunutta siirrettiin työpisteeltä toiselle (P 1...P 5) ja altistuva pysyi paikallaan.

3.2.2 Suojusratkaisujen tehokkuus, kun aerosoleja tuotettiin yskimällä

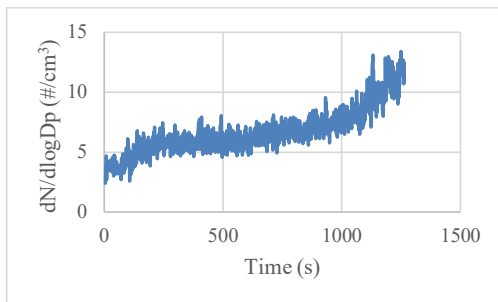
Yskimistilanteessa tarkasteltiin vastakkaisia työpisteitä. Kuva 9-Kuva 11 esittävät tyypillisiä tuloksia kategoriasta huono, kohtuullinen ja hyvä suojaustehokkuus, vastaavassa järjestyksessä. Analyysissä on arvioitu altistuneesta henkilöstä mitattujen konsentraatiohuippujen lukumäärä. Lisäksi voidaan todeta, että huoneen taustapitoisuus nousi hieman kaikissa testitapauksissa ja nousun epälineaarisuus selittyy sillä, että kunkin yksittäisen yskäisyksen kokonaishiukkasmäärä on erilainen.



Kuva 9. Aerosolien numerokonsentraatio terveeseen hengitysvyöhykkeellä, kun suojausmenetelmiä ei ole käytössä (Y001).



Kuva 10. Aerosolien numerokonsentraatio terveen hengitysvyöhykkeellä, kun sairaalla on suojavisiiri (Y008).



Kuva 11. Aerosolien numerokonsentraatio terveen hengitysvyöhykkeellä, kun sairaalla ja terveellä on FFP2-maski (Y007).

Kuva 9, joka vastaa vertailutapausta ilman suojausta, esittää 21 erikorkuista konsentraatiohuippua altistuneen hengitysvyöhykkeellä. Huippukorkeuden vaihtelua ei arvioida tässä, vaan se on yhdistelmä yksittäisten yskien välisistä eroista, altistuneen henkilön saavuttavien yskähiukkasten osuuden eroista ja itse yskätapahtuman lyhyestä kestosta. Huippujen määrä osoittaa, että jokainen yskäisy on saavuttanut altistuneen henkilön. Toisessa esimerkissä tapauksesta 8 (Kuva 10) näkyy kolme selvästi taustaa korkeampaa huippua, mikä tarkoittaa, että osa yskimisistä saavutti altistuneen henkilön ja ratkaisu tarjosi osittaista suojaa. Lopuksi esimerkkinä on tapaus 7 (Kuva 11), joka esittää tilannetta, jossa suojausratkaisu tuottaa hyvän suojan yskimistä vastaan. Tuloksessa ei ole piikkejä, ja vain pieni lisäys taustapitoisuudessa voidaan havaita. Kaikki 14 mitattua tapausta voidaan luokitella jollakin näistä kolmesta tavasta.

Taulukko 7 esittää yleiskatsauksen saaduista tuloksista. Tapaukset 4, 5, 7 ja 14 eivät tuottaneet huippuja lainkaan. Näin ollen tulokset viittaavat siihen, että parhaat suojaustoimenpiteet yskimistä vastaan ovat silloin, kun sairaalla on FFP2-maski, molemmilla henkilöillä on mikä tahansa maski ja silloin, kun pöydän keskellä on korkea toimistosermi. Kohtuullisia suojausmenetelmiä yskimistä vastaan antoivat tapaukset, joissa tartunnan saaneella oli kirurginen maski (Tapaus 2), tartunnan saaneella oli visiiri (Tapaus 8), ja tapaus, jossa neuvottelutilanteessa oli matala sermi pöydällä (Tapaus 13). Näissä tapauksissa terveen hengitysvyöhykkeelle pääsi alle viisi aerosolikonsentraatiohuippua. Muut tapaukset, eli maskit tai visiiri vain terveellä henkilöllä, sekä ilmanpuhdistimet eivät tarjonneet käytännössä suojaa lainkaan.

Taulukko 7. Yskimistapauksessa mitattujen testitapausten tulokset (luokitteluasteikko: huono, kohtuullinen ja hyvä).

Testitapaus	Suojausmenetelmä	Tehokkuus
Y001	Ei suojausta	Huono
Y002	Kirurginmaski sairaalla	Kohtuullinen
Y003	Kirurginmaski terveellä	Huono
Y004	Kirurginmaski sairaalla ja terveellä	Hyvä
Y005	FFP2-maski sairaalla	Hyvä
Y006	FFP2-maski terveellä	Huono
Y007	FFP2-maski sairaalla ja terveellä	Hyvä
Y008	Suojavisiiri sairaalla	Kohtuullinen
Y009	Suojavisiiri terveellä	Huono
Y010	Henkilökohtainen ilmanpuhdistin sairaalla	Huono
Y011	Henkilökohtainen ilmanpuhdistin terveellä	Huono
Y012	Huoneilmanpuhdistin (2,5 x ilmanvaihto)	Huono
Y013	Matala toimistosemi pöydän keskellä (neuvottelutilanne)	Kohtuullinen
Y014	Korkea toimistosemi pöydän keskellä (neuvottelutilanne)	Hyvä

3.3 Yhteenveto

Suojausratkaisujen tehokkuutta arvioitiin aerosolimittauksin. Tulosten perusteella huoneilmanpuhdistin ja hengityssuojaimet olivat tehokkaita suojausmenetelmiä infektoituneen hengityksestä peräisin olevia aerosoleja vastaan, kun taas toimistosemeillä ei näyttänyt olevan merkittävää suojausvaikutusta tässä tapauksessa. Yskimisen aerosoleja vastaan paras suojausvaikutus saavutettiin silloin kun infektoituneella oli FFP2-hengityssuojain, molemmilla oli mikä tahansa tarkastelluista hengityssuojaimista, tai silloin kun pöydän keskellä oli korkea semi. Yskimistapauksessa huoneilmanpuhdistin ei antanut merkittävää suojaa altistuvalla. Kaiken kaikkiaan on selvää, että paras suojausvaikutus saadaan erilaisia suojausmenetelmiä yhdistämällä. Tulosten perusteella hyvä vaihtoehto on, että kaikki tilakäyttäjät pitävät hengityssuojainta ja sen lisäksi huoneessa on hyvä olla ilmanpuhdistin. Sermit ovat tietenkin tarpeellisia näköesteitä, mutta ne myös osaltaan estävät yskivän aerosoleja kulkeutumasta suoraan toisille työpisteille, jos infektoitunut ei ehdi suojaamaan täysin omaa yskäisyään.

Johtopäätöksinä voidaan todeta, että huoneilman puhdistin (HEPA- ja elektroninen suodatin, 2,5xIV) ja FFP2-maski suojasivat parhaiten sairaan hengityksestä tulevia aerosoleja vastaan. Yskimistä vastaan parhaat suojaustoimenpiteet olivat puolestaan FFP2-hengityssuojain infektoituneella, mikä tahansa hengityssuojain molemmilla henkilöillä ja pöydän keskellä oleva korkea toimistosemi (80 cm).

4. Ilmanjaon ja lämpökuormien vaikutus työpisteellä altistumiseen

Osatehtävän tavoitteena on tarkastella SF₆-merkkiaineen avulla lämpökuormien ja ilmanjaon vaikutusta työpisteellä olevien ihmisten altistumiseen.

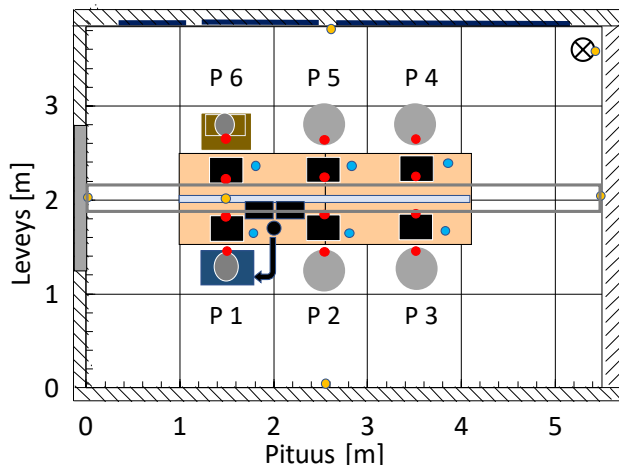
4.1 Menetelmät

Koejärjestely tehtiin pelkistetyssä ryhmätyötilassa (75 m³, 21 m²), jossa oli max. 6 työpistettä. Testihuoneessa oli normaalit ryhmätyötilan olosuhteet, joissa huoneen ilmanvaihto määräytyi ihmisten lukumäärän tai tilan lämpökuormien perusteella.

Merkkiaine vapautettiin lämpönuken nenän uloshengityksellä 6 L/min syklillä 2,5/7 s. Hengitysilma lämmitettiin asetusarvoon 35°C ja kostutettiin tasolle 85 %. Aiemmissä tutkimuksissa on todettu, että merkkiainemenetelmä soveltuu hyvin uloshengityksen aerosolien ilmapälitteisyyden tutkimiseen (Ai et al., 2020).

Merkkiainepitoisuuden lisäksi mitattiin nopeus- ja lämpöolosuhteita eri työpisteiltä 0,8 m, 1,1 m, 1,4 m ja 1,7 m korkeuksilta Dantec ComfortSense -anemometreillä. Lisäksi mitattiin seinien pintalämpötiloja, seinämärakerroksen ilman lämpötilaa ja kosteutta (Tinytag-loggerit), sekä operatiivista lämpötilaa (Dantec-anturi korkeudella 1,25 m). Sen lisäksi lämpökameralla kuvattiin huoneen seinäpintoja.

Tarkoituksena oli selvittää merkkiaineen pitoisuuden kehittyminen ajan ja paikan suhteen erilaisilla lämpökuormilla ja ilmanjakotavoilla. Osatehtävässä mitattiin, kunnes merkkiaineen pitoisuus saavutti tasapainotilanteen, minkä jälkeen keskiarvotettiin 10 mittausta jokaisessa mittauspisteessä (7 kpl). Infektoitunutta jäljittelevän hengittävän lämpönuken merkkiainevirta todennettiin esimitauksessa. Mittauspisteitä olivat: 1 tulo, 1 poisto ja 5 hengitysvyöhykettä. Kuva 12 esittää mittauspisteet.



Kuva 12. Koehuoneen periaatepiirustus ylhäältä merkkiainemittauksissa. Oranssi ympyrä on ilman lämpötilan ja kosteuden mittauspiste, sininen ympyrä on ilman nopeuden ja lämpötilan mittauspiste, ja punainen ympyrä on merkkiaineen mittauspiste.

Mittaustuloksista laskettiin myös konsentraatiojakaumaa kuvaavia indikaattoreita huoneen tasapainotilanteessa. Paikallinen epäpuhtausien poistotehokkuus ε_p^c (Mundt et al., 2004) lasketaan yhtälöllä

$$\varepsilon_p^c = \frac{C_{exh,m} - C_{supl,m}}{C_{loc,m} - C_{supl,m}}, \quad (28)$$

jossa $C_{exh,m}$ on keskimääräinen konsentraatio poistoilmassa huoneen tasapainotilanteessa [ppm], $C_{supl,m}$ on vastaava keskimääräinen konsentraatio tuloilmassa [ppm] ja $C_{loc,m}$ on paikallinen keskimääräinen konsentraatio [ppm]. Näiden edellä mainittujen muuttujien yksikkö voi olla myös jokin muu konsentraatiota kuvaava yksikkö, esim. [mg/m³]. Epäpuhtausien poistotehokkuus kuvaa paikallisen konsentraation suhdetta ilmanvaihdon konsentraatioon, siten että mitä suurempi indikaattori on, sitä pienempi paikallinen konsentraatio on verrattuna poistoilman konsentraatioon, jolloin se indikoi parempaa ilman laatua tarkasteltavassa mittauspisteessä oleskeluvyöhykkeellä.

Indikaattori C_{ind-1} puolestaan kuvaa taudinaiheuttajien paikallisen konsentraation suhdetta työpisteiden keskimääräiseen konsentraatioon. C_{ind-1} lasketaan yhtälöllä

$$C_{ind-1} = \frac{C_{loc,m}}{C_{wst,m}}, \quad (29)$$

missä $C_{wst,m}$ on altistuvien henkilöiden työpisteiden keskimääräinen konsentraatio huoneen oleskeluvyöhykkeellä [ppm]. Kun C_{ind-1} on alle yhden niin konsentraatiotasoa on tarkasteltavalla työpisteellä keskimääräistä parempi. Lisäksi indikaattorilla voidaan nähdä poistoilman konsentraatiotasoa verrattuna huoneen keskimääräiseen tasoon sekä työpisteiden konsentraatioihin nähden.

C_{ind-2} kuvaa paikallisen ja poistoilman taudinaiheuttajien konsentraatiovirran erotusta verrattuna huonetilaan tulevaan konsentraatiovirtaan. C_{ind-2} lasketaan yhtälöllä

$$C_{ind-2} = \frac{q_v(C_{loc,m} - C_{exh,m})}{p_v C_{inf,m} + q_v C_{supl}}, \quad (30)$$

jossa q_v on ilmanvaihdon ilmavirta [L/s], $C_{inf,m}$ on infektoituneen uloshengityksessä oleva keskimääräinen konsentraatio [ppm] ja p_v on infektoituneen uloshengityksen keskiarvotettu ilmavirta [L/s], joka on pienempi kuin ilmanvaihdon ilmavirta, esim. 6 L/min. Indikaattori tarkastelee konsentraatiota ja sitä kuljettavaa ilmavirtaa, sekä ottaa huomioon myös infektiolähteen tuoton. Indikaattorin jakajassa lasketaan yhteen huonetilaan tuleva taudinaiheuttajien tuotto, joten jakajan jälkimmäinen termi on pieni, ellei ulkoilmasta tule jostain syystä suurta konsentraatiota verrattuna infektoituneeseen. Tähän voi sisällyttää tarvittaessa myös muita taudinaiheuttajien lähteitä. Indikaattorin perusteella tarkastelukohta on sitä turvallisempi mitä pienempi arvo indikaattorilla on eli mitä suurempi indikaattorin miinuksen jälkeinen lukuosa on $[\infty, -\infty]$. Negatiivinen indikaattorin arvo myös tarkoittaa, että tarkasteltavan kohdan konsentraatio on pienempi kuin poistoilman konsentraatio, mikä on ilmanvaihdon tehokkuuden kannalta tavoiteltava tilanne.

4.1.1 Lämpökuormat

Koeasetelmassa käytettiin lämpökuormina normaaleja toimistokuormia, henkilöä jäljitteleviä lämpömalleja, sekä simulaatioikkunoita ja lattialämmitystä. Testihuoneessa tarkasteltiin lämpökuormatasoja $38 \text{ W/m}^2 - 60 \text{ W/m}^2$ siten, että huoneessa oli kaksi henkilöä tai kuusi henkilöä. Kahden henkilön tapauksessa ikkunan lämpökuorman osuus kokonaislämpökuormasta kasvoi, joka aiheutti erilaisen huonevirtauskentän kuin keskellä pöydän ympärillä olevat lämpökuormat.

Taulukko 8 - Taulukko 11 esittävät testihuoneen ilmanvaihtoa mitoittavat suuret eri lämpökuormatasoilla. Taulukon vasemmalla puolella on huoneen lämpötehot ja oikealla puolella ilmanvaihdon parametrit.

Taulukko 8. Ilmanvaihtoa mitoittavat suuret: epäsymmetrinen lämpökuormataso 38 W/lattia_m^2 , tuloilman lämpötila 14°C , kaksi henkilöä huoneessa. Sekoittava ja syrjäyttävä ilmanjako. Taulukon suureiden epävarmuus $\pm 5 \%$.

Lämpökuorma	Lämpöteho	Lämpövuoto	Ilmanvaihto	Ilmanvaihto	Ilmanvaihto
Parametrit	W	W/m ²	Parametrit	arvo	arvo/m ²
Lämpönukke	80	3,8	Henkilöt max.	6 hlö	0,29 hlö/m ²
Dummy	85	4,1	Tuloilmamäärä	61 L/s	2,9 L/s,m ²
2 x lap-top	80	3,8	Tuloilman lämpöt.	14 °C	
Valaisin	90	4,3	Huonelämpötila	25±1 °C	
Laitteet	45	2,1	IV-kerroin	2,9 1/h	
Ikkuna	417	19,9			
Lämpöteho yht.	797	38,0	Jäähdytysteho yht.	-797 W	-38,0 W/m ²

Taulukko 9. Testihuoneen ilmanvaihtoa mitoittavat suuret, sekoittava ilmanjako: 38 W/lattia_m^2 , kuusi henkilöä. Sekoittava ja syrjäyttävä ilmanjako. Taulukon suureiden epävarmuus $\pm 5 \%$.

Lämpökuorma	Lämpöteho	Lämpövuoto	Ilmanvaihto	Ilmanvaihto	Ilmanvaihto
Parametrit	W	W/m ²	Parametrit	Arvo	Arvo/m ²
Lämpönukke	80	3,8	Henkilöt max.	6 hlö	0,29 hlö/m ²
Istuva dummy	85	4,1	Tuloilmamäärä	61 L/s	2,9 L/s,m ²
4 x lieriödummy	320	15,3	Tuloilman lämpöt.	14 °C	
2 x lap-top	80	3,8	Huonelämpötila	25±1 °C	
Valaisin	90	4,3	IV-kerroin	2,9 1/h	
Laitteet	45	2,1	Ilmanpuhdistin	549 m3/h	
Ikkuna	97	4,6			
Lämpöteho yht.	797	38,0	Jäähdytysteho yht.	-797 W	-38,0 W/m ²

Taulukko 10. Testihuoneen ilmanvaihtoa mitoittavat suureet, sekoittava ilmanjako: 60 W/lattia_m², kaksi henkilöä. Taulukon suureiden epävarmuus ±5 %.

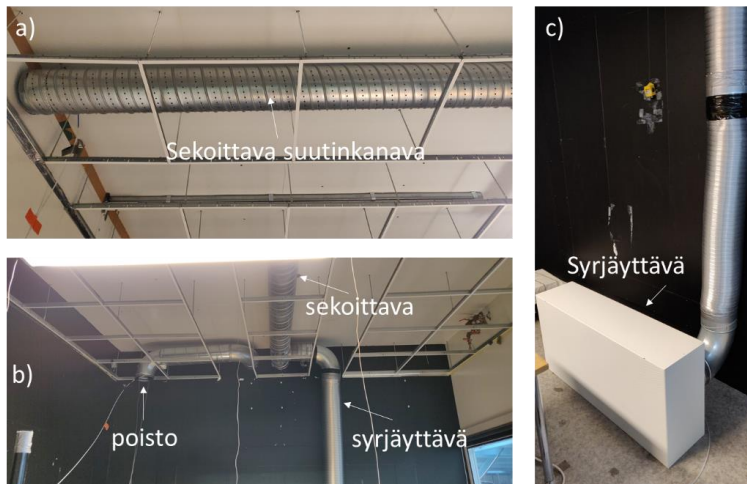
Lämpökuorma	Lämpöteho	Lämpövu	Ilmanvaihto	Ilmanvaihto	Ilmanvaihto
Parametrit	W	W/lattia_m2	Parametrit	arvo	arvo/m2
Lämpönukke	80	3,8	Henkilöt max.	6 hlö	0,29 hlö/m2
Dummy	85	4,1	Tuloilmamäärä	116 L/s	5,5 L/s,m2
2 x lap-top	80	3,8	Tuloilman lämpöt.	16±1 °C	
Valaisin	90	4,3	Huonelämpötila	25±1 °C	
Laitteet	45	2,1	IV-kerroin	5,5 1/h	
Ikkuna	458	21,8	Ilmanpuhdistin	1044 m3/h	
Lattia	420	20,0			
Lämpöteho yht.	1258	60,0	Jäähdytysteho yht.	-1258 W	-60,0 W/m2

Taulukko 11. Testihuoneen ilmanvaihtoa mitoittavat suureet, sekoittava ilmanjako: 60 W/lattia_m², kuusi henkilöä. Taulukon suureiden epävarmuus ±5 %.

Lämpökuorma	Lämpöteho	Lämpövu	Ilmanvaihto	Ilmanvaihto	Ilmanvaihto
Parametrit	W	W/m ²	Parametrit	Arvo	Arvo/m ²
Lämpönukke	80	3,8	Henkilöt max.	6 hlö	0,29 hlö/m ²
2 istuva dummy	170	8,1	Tuloilmamäärä	116 L/s	5,5 L/s,m ²
3 lieriödummy	240	11,4	Tuloilman lämpöt.	16±1 °C	
2 x lap-top	80	3,8	Huonelämpötila	25±1 °C	
Valaisin	90	4,3	IV-kerroin	5,5 1/h	
Laitteet	45	2,1	Ilmanpuhdistin	1044 m ³ /h	
Ikkuna	138	6,6			
Lattia	420	20,0			
Lämpöteho yht.	1258	60,0	Jäähdytysteho yht.	-1258 W	-60,0 W/m ²

4.1.2 Ilmanjako

Ilmanjakotavoista tarkasteltiin sekoittavaa ja syrjäyttävää ilmanjakotapaa. Sekoittava ilmanjako toteutettiin kattovyöhykkeen suutinkanavalla ja syrjäyttävä ilmanjako huoneen päätyseinällä lattialla olevalla päätelaitteella. Testimittauksessa sekoittavan ilmanjaon päätelaitteelta virtaavan tuloilman nopeus oli 5 cm:n etäisyydellä suuttimesta keskimäärin 2,8 m/s, kun 3333 tuloilman lämpötila oli 17°C. Vastaavasti syrjäyttävältä ilmanjakolaitteelta virtaavan tuloilman nopeus oli noin 0,15 m/s.



Kuva 13. Ilmanjako: a) sekoittavan ilmanjaon suutinkanava kattovyöhykkeellä. b) ilmanjako kattovyöhykkeellä. c) Syrjäyttävän ilmanjaon päätelaite lattialla huoneen päädyssä.

4.1.3 Mittauslaitteet

Merkkiaine kaasun pitoisuutta mitattiin kaasuanalysointilaitteella, jolla voidaan mitata useita mittauspisteitä huonetilasta yhden mittausjakson aikana. Taulukko 12 esittää käytetyt mittarit.

Taulukko 12. Merkkiainemittauksissa käytettyjä mittauslaitteita.

Mittari	Tarkkuus
Kaasuanalysointilaitte Gasera One	$\pm 2 \%$
Dantec comf.sense trans. 54T33 omnidir. probe	ilman nopeus $\pm 2 \%$ $\pm 0,02$ m/s, lämpötila $\pm 0,5^\circ\text{C}$
Dantec comf.sense transducers 54T38 oper.temp.	Operatiivinen lämpötila $\pm 0,2^\circ\text{C}$
Tinytag plus 2 TGP- 4500	Ilman lämpötila $\pm 0,5^\circ\text{C}$, RH $\pm 3 \%$ lämpötilassa 25°C

4.1.4 Testitapaukset

Taulukko 13 esittää merkkiaine kaasulla tehdyt testitapaukset.

Taulukko 13. Merkkiaine kaasulla tehdyt testitapaukset.

Testitapaus	Testitapauksen kuvaus
M001	Sekoittava ilmanjako, 2 hlö, lämpökuorma 38 W/m^2
M002	Syrjäyttävä ilmanjako, 2 hlö, lämpökuorma 38 W/m^2
M003	Syrjäyttävä ilmanjako, 6 hlö, lämpökuorma 38 W/m^2
M004	Sekoittava ilmanjako, 6 hlö, lämpökuorma 38 W/m^2
M005	Syrjäyttävä ilmanjako, 6 hlö, lämpökuorma 60 W/m^2
M006	Sekoittava ilmanjako, 6 hlö, lämpökuorma 60 W/m^2
M007	Sekoittava ilmanjako, 2 hlö, ikkunakuorma, lämpökuorma 60 W/m^2
M008	Syrjäyttävä ilmanjako, 2 hlö, ikkunakuorma, lämpökuorma 60 W/m^2

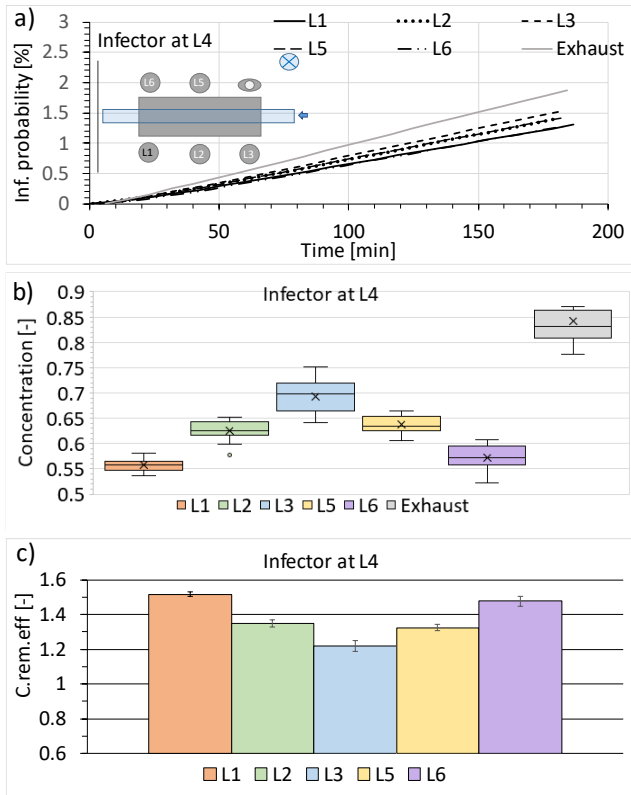
4.2 Tulokset

Merkkiainemittauksista saatiin suuri määrä tuloksia, jotka on esitetty omissa alaluvuissaan. Kaikissa infektioriskilaskuissa infektoituneen quanta-tuoton on oletettu olevan 5 quanta per tunti, joka on maltillisella tasolla. Kuten johdannossa mainittiin, ihmisen quanta-tuotto vaihtelee taudinaiheuttajien ja ihmisen aktiivisuuden perusteella. Quanta-tuotto voi olla hiljaisessa toimistotyössä suuruusluokaltaan ykkösiä ja puhuessa kymmeniä tai satoja. Infektioriskin kuvaajissa on esitetty riski myös poistoilman pitoisuustasoilla. Tavoitteenmukaista on, että infektioriski työpisteillä olisi aina alemmalla tasolla kuin poistoilmassa.

4.2.1 Sekoittava ilmanjako

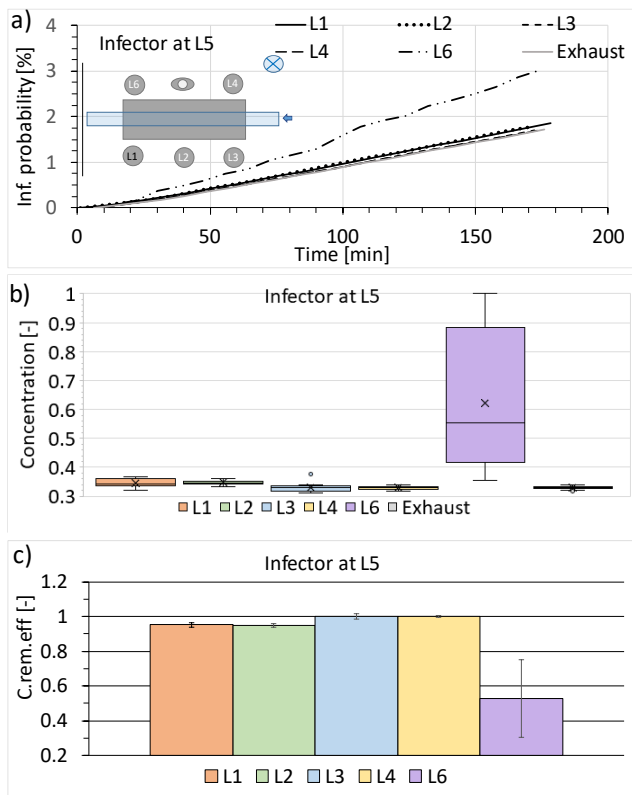
4.2.1.1 Kaksi henkilöä, lämpökuorma 38 W/m²

Kuva 14 esittää tilannetta, jossa infektoitunut on työpisteellä L4 ja altistuva on työpisteellä L1. Huoneen sisäinen lämpökuormataso on kohtuullinen noin 40 W/m² ja ilmanvaihto on sekoittava, jolloin sisäilma oli huoneessa hyvin sekoittunutta (ei täysin sekoittunutta) Infektoitunut on tässä työpisteellä, joka on lähimpänä poistoilmalaitetta. Tulosten perusteella suurin konsentraatio muodostuu työpisteelle L3, joka on infektoituneen vastakkainen työpiste toisella puolella pöytää. Epäpuhtauksien poistotehokkuus pysyttelee jokaisella työpisteellä ykkösen yläpuolella, joten konsentraatio on suurempi poistoilmassa kuin työpisteillä. Altistuva henkilö on tässä kauimpana infektoituneesta, joten myös konsentraatio on loogisesti pienimmillään altistuvan työpisteellä L1. Infektioriski puolestaan on 1,5 % prosentoin luokkaa noin 3 tunnin oleskelun jälkeen, jota voidaan pitää varsin maltillisena.



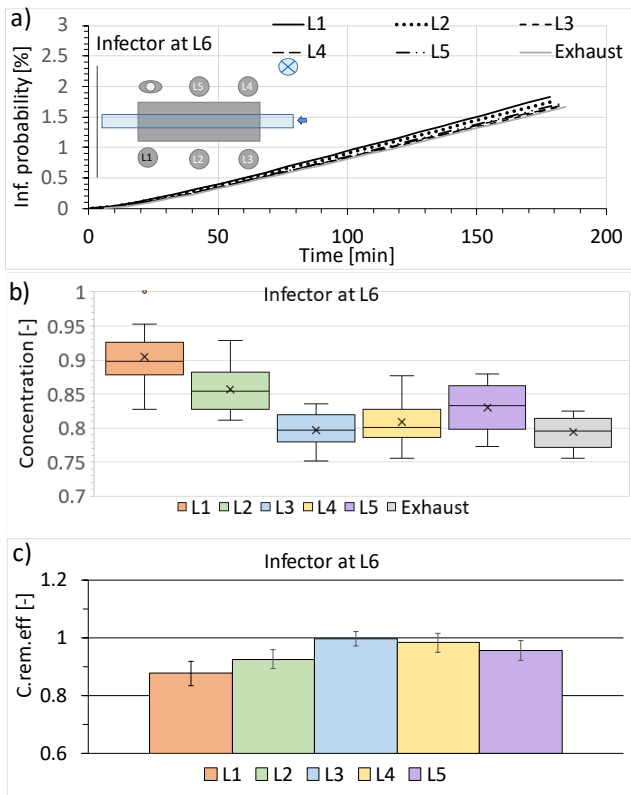
Kuva 14. Mittaustuloksia sekoittavalla ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä L4, altistuva työpisteellä L1 ja huoneen sisäinen lämpökuorma 38 W/m²: a) Infektioriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtausien poistotehokkuus.

Kuva 15 esittää vastaavasti tilannetta, jossa infektoitunut on työpisteellä L5 ja altistuva on työpisteellä L1, eli infektoitunut on toisella puolella pöydän keskellä. Altistuvan työpisteellä L1 konsentraatio on samalla tasolla kuin työpisteillä L2-L4 ja suurin konsentraatio muodostuu työpisteelle L6, joka on infektoituneen viereinen työpiste. Epäpuhtausien poistotehokkuus pysyttelee työpisteillä L1-L4 lähellä ykköstä, joten konsentraatio on poistoilmassa samalla tasolla kuin em. työpisteillä. Infektioriski noudattelee periaatteessa paikallista konsentraatiotasoa, ja on samalla tasolla kuin edellisessä tapauksessa, mutta työpisteen L6 infektioriski nousee tässä 3%:iin ja poistoilman pitoisuudesta laskettu infektioriski on samalla tasolla työpisteiden L1-L4 kanssa.



Kuva 15. Mittaustuloksia sekoittavalla ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä L5, altistuva työpisteellä L1 ja huoneen sisäinen lämpökuorma 38 W/m²: a) Infektoriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtauksien poistotehokkuus.

Kuva 16 esittää vastaavasti tilannetta, jossa infektoitunut on työpisteellä L6 eli vastakkaisella työpisteellä altistuvaan nähden. Nyt konsentraatio on altistuvan työpisteellä L1 suurin ja se on korkeammalla tasolla kuin poistoilmassa. Työpisteen L1 lisäksi myös työpisteen L2 konsentraatiotaso on suurempi kuin muilla työpisteillä, jotka puolestaan ovat samalla tasolla poistoilman kanssa. Näin ollen epäpuhtauksien poistotehokkuus pysyttelee alle yhdessä kaikilla muilla työpisteillä, paitsi työpisteellä L3, jossa poistotehokkuus on noin yksi. Tässä tapauksessa infektoriski on 1,5–2 %, joka on hieman suurempi kuin tapauksessa, jossa infektoitunut oli lähinnä poistoa, jossa oli myös enemmän hajontaa työpisteiden välillä. Toisaalta infektoriski on tässä melko samalla tasolla, kuin edellisessä tapauksessa (infektoitunut pöydän keskellä), lukuun ottamatta työpistettä L6, jossa infektoriski nousi edellisessä tapauksessa 3 %:iin.



Kuva 16. Mittaustuloksia sekoittavalla ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä 6, altistuva työpisteellä 1 ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 38 W/m^2 : a) Infektioriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtauksien poistotehokkuus.

Taulukko 14 esittää dimensiottoman konsentraation (0...1) tuloksista laskettuja tilastollisia muuttujia ($n=14$) altistuneen hengitysvyöhykkeellä (työpiste L1) sekä poistoilmassa, kun infektoitunut on työpisteillä L4, L5 tai L6. Tuloksista nähdään, että keskimääräinen dimensioton konsentraatio oli altistuneen työpisteellä L1 suurimmillaan, kun infektoitunut oli vastakkaisella työpisteellä L6, jolloin myös poistoilman konsentraatio oli matalammalla tasolla kuin altistuvalla. Tässä tapauksessa myös konsentraation vaihtelu oli altistuneen hengitysvyöhykkeellä suurinta (sd). Matalimmillaan altistuneen konsentraatio oli silloin, kun infektoitunut oli työpisteellä L4, eli lähimpänä poistoilmalaitetta. Silloin myös poistoilman konsentraatio oli suurempi kuin altistuvalla. Epäpuhtauksien poistotehokkuus nousi tässä tapauksessa suuremmaksi kuin yksi ($\epsilon \approx 1,5$, inf. L4) ja altistuneen hengitysvyöhykkeen konsentraatio oli puolestaan 8 % pienempi kuin työpisteiden keskimääräinen konsentraatio (C-index-1). Lisäksi ilmanvaihdolla ja taudinaiheuttajien tuotolla painotettu konsentraatio oli tavoitteenmukaisesti alle nollan (C-index-2).

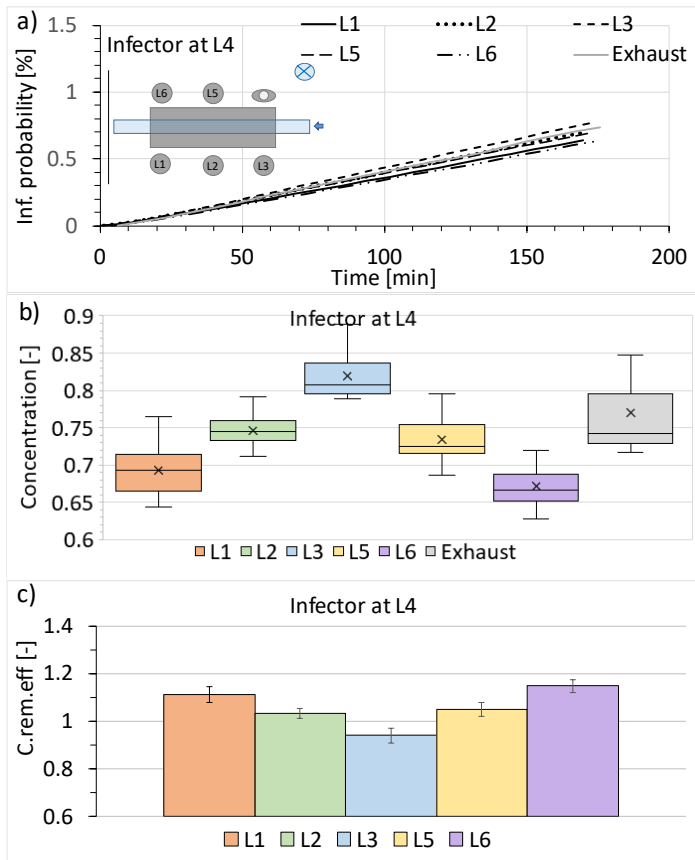
Taulukko 14. Konsentraatio [-] työpisteellä L1 ja poistossa (Exhaust), kun infektoitunut on työpisteellä L4, L5 tai L6. Sekoittava ilmanjako, lämpökuorma 38 W/m², kaksi henkilöä huoneessa.

Infektoitunut	L6	L6	L5	L5	L4	L4
Vertailupiste	L1	Exhaust	L1	Exhaust	L1	Exhaust
Arvojen lkm	14	14	14	14	14	14
Keskiarvo avg	0.90	0.79	0.35	0.33	0.56	0.84
Min	0.83	0.76	0.32	0.32	0.54	0.78
Max	1.00	0.82	0.37	0.34	0.58	1.00
sd	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05
sd/avg	0.05	0.03	0.04	0.02	0.02	0.06
C-index-1 [-]	1.07	0.95	0.89	0.85	0.92	1.32
C-index-2 [-]	0.09	-	0.03	-	-0.23	-
ε_p^c	0.88	1.00	0.95	1.00	1.52	1.00

4.2.1.2 Kaksi henkilöä, lämpökuorma 60 W/m²

Kuva 17 esittää tilannetta, jossa infektoitunut on työpisteellä L4 ja altistuva on työpisteellä L1. Tässä tapauksessa huoneen lämpökuormatasoa on kasvatettu arvoon 60 W/m² ja ilmanvaihto on edelleen sekoittava.

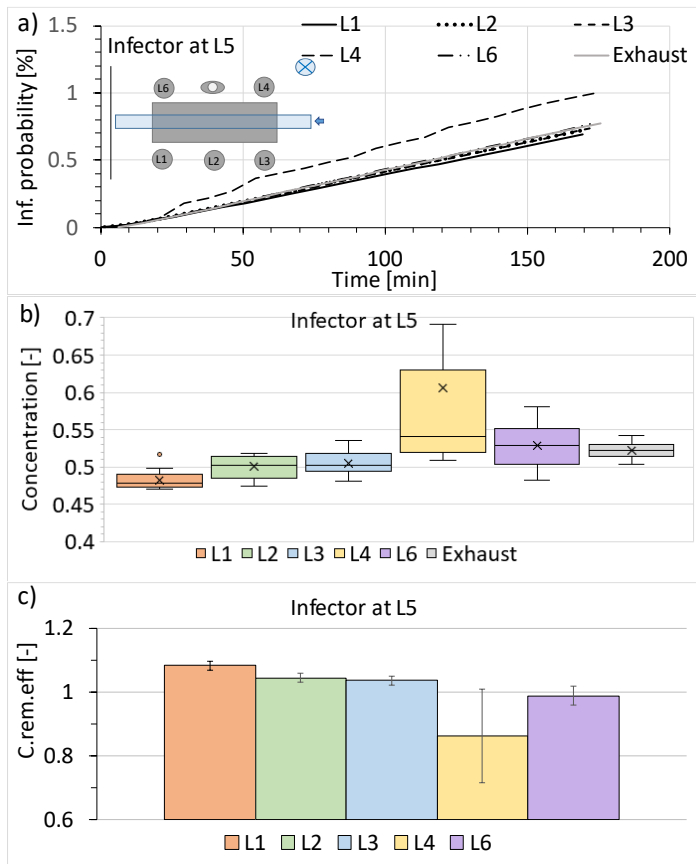
Tulosten perusteella suurin konsentraatio muodostuu suuremmallakin lämpökuormalla työpisteelle L3, joka on infektoituneen vastakkainen työpiste. Epäpuhtausien poistotehokkuus on muilla työpisteillä suurempi kuin yksi, jolloin paikallinen konsentraatio on pienempi kuin poistoilmassa. Altistuvan työpisteellä L1 konsentraatio on tässäkin tapauksessa pienimmillään yhdessä vastakkaisen, pöydän päädystä olevan työpisteen L6 kanssa. Infektoriski puolestaan laski suuremman ilmanvaihtuvuuden myötä alle 1 %:iin. Pienin paikallinen konsentraatio oli työpöydän päätypaikoilla L1 ja L6, kun taas keskipaikat L2 ja L5 tuottivat keskimääräisen tason, kun taas infektoituneen vastakkaisella työpisteellä L3 konsentraatio oli suurin hyvin sekoittuneessa tilanteessa. Huoneen ja erityisesti ikkunan lämpökuorman kasvattaminen näkyy tuloksissa siten, että poistoilman dimensioton pitoisuus oli pienempi työpisteisiin verrattuna, kun lämpökuormaa kasvatettiin. Tämä näkyy epäpuhtausien poistotehokkuudessa pienempänä arvona kuin jos huoneessa on matalampi lämpökuormataso.



Kuva 17. Mittaustuloksia sekoittavalla ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä 4, altistuva työpisteellä 1 ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 60 W/m^2 : a) Infektoriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtauksien poistotehokkuus.

Kuva 18 esittää suuremman lämpökuorman tapausta, jossa infektoitunut on pöydän keskellä työpisteellä L5 ja altistuva on työpisteellä L1. Altistuvan työpisteellä L1 konsentraatio on pienempi kuin muilla työpisteillä (L2-L4, L6). Nyt suurin konsentraatio ja konsentraation vaihtelu muodostuu työpisteelle L4, joka on infektoituneen vieressä, mutta toisella puolella kuin pienemmän lämpökuorman tapauksessa. Tulos tarkoittaa, että infektoituneen hengityksestä suurempi osa aerosoleista kulkeutui poistoilmalaitteenpuoleiselle työpisteelle, kun taas pienemmällä lämpökuormatasolla aerosoleja kulkeutui selvästi eniten toiselle puolelle infektoitunutta. Tähän voi olla monia syitä, mutta joka tapauksessa muuttunut lämmönlähteiden jakauma ja voimakkaampi tuloilmavirta kattovyöhykkeeltä pöydälle sekä näiden vuorovaikutus on aiheuttanut muutoksen myös konsentraatiojakaamaan.

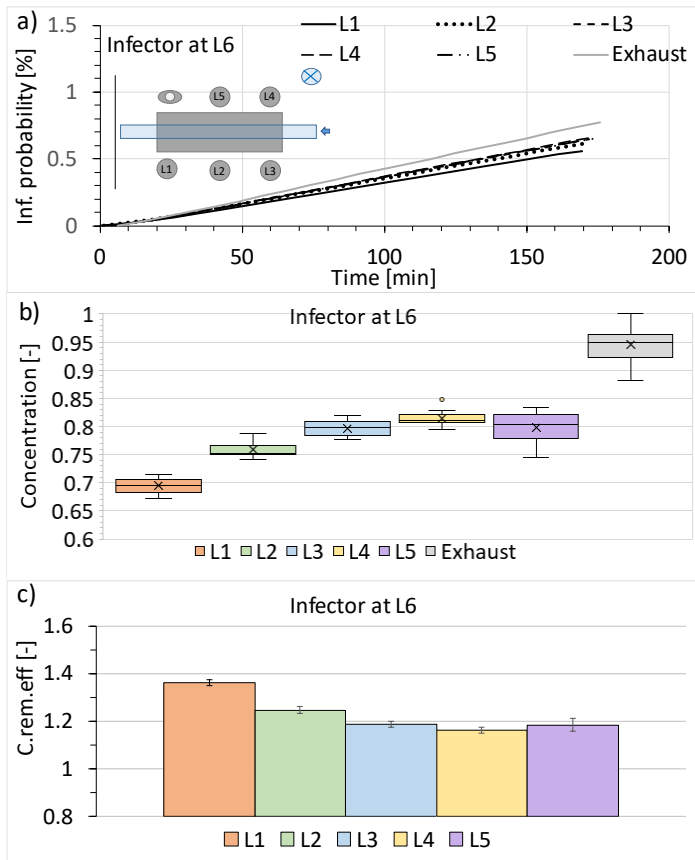
Epäpuhtauksien poistotehokkuus on työpisteillä L1-L6 on muuten suurempi tai yhtä suuri kuin yksi, mutta suurimman konsentraation työpisteellä L4 paikallinen poistotehokkuus laskee alle yhden. Infektoriskissä korostuu suurimman konsentraation työpiste L4. Muissa työpisteissä infektoriski jää selvästi alle 1 %:iin, joten se on samalla tasolla kuin edellisessä tapauksessa.



Kuva 18. Mittaustuloksia sekoittavalla ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä 5, altistuva työpisteellä 1 ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 60 W/m^2 : a) Infektoriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtauksien poistotehokkuus.

Kuva 19 esittää vastaavasti tilannetta, jossa infektoitunut on työpisteellä L6 eli vastakkaisella työpisteellä altistuvaan nähden. Päinvastoin kuin huoneen pienemmällä lämpökuormalla, dimensioton konsentraatio on suuremmalla lämpökuormalla pienin altistuvan työpisteellä L1 ja suurin poistoilmassa, mikä on edellä olevista tapauksista kaikista tavoiteltavin tilanne. Tässä konsentraatio kasvaa melko tasaisesti altistuvan työpisteeltä L1 työpisteelle L2 ja työpisteelle L3, kun taas infektoituneen puolella pöytää dimensioton konsentraatio pysyttelee samalla tasolla.

Näin ollen epäpuhtauksien poistotehokkuus on selvästi yli yhden kaikilla altistuvien työpisteillä L1-L5. Tässä tapauksessa infektoriski kasvoi noin kolmessa tunnissa vain vähän yli 0,5 %:iin, joka siten oli vieläkin matalammalla tasolla kuin muissa esitellyissä suuremman lämpökuorman tapauksissa.



Kuva 19. Mittaustuloksia sekoittavalla ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä 6, altistuva työpisteellä 1 ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 60 W/m^2 : a) Infektoriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtausien poistotehokkuus.

Taulukko 15 esittää dimensiottoman konsentraation (0...1) tuloksista laskettuja tilastollisia muuttujia altistuneen hengitysvyöhykkeellä työpisteellä L1 sekä poistoilmassa, kun infektoitunut on työpisteillä L4, L5 tai L6.

Tulosten perusteella suuremmalla lämpökuormalla dimensioton konsentraatio oli altistuneen työpisteellä L1 suurimmillaan, kun infektoitunut oli vastakkaisella työpisteellä L6 tai kauimmaisella työpisteellä L4. Näissä kummassakin tapauksessa poistoilmassa oli suurempi konsentraatio kuin työpisteellä. Tässä tapauksessa konsentraation vaihtelu oli altistuneen hengitysvyöhykkeellä suurinta silloin kun infektoitunut oli työpisteellä L4.

Matalimmillaan altistuneen dimensioton konsentraatio oli silloin kun infektoitunut oli keskellä pöytää työpisteellä L4. Silloin myös poistoilman konsentraatio oli samaa suuruusluokkaa. Epäpuhtausien poistotehokkuus oli suurimmillaan, kun infektoitunut oli työpisteessä L6, jolloin altistuneen konsentraatio oli 10 % pienempi kuin työpisteiden keskimääräinen konsentraatio (C-index-1) ja myös ilmanvaihdon ja taudinaiheuttajien tuotolla painotettu konsentraatio oli selvästi alle nollan (C-index-2).

Taulukko 15. Konsentraatio työpisteellä L1 ja poistossa, kun infektoitunut on työpisteellä L4, L5 tai L6. Sekoittava ilmanjako, lämpökuorma 60 W/m², kaksi henkilöä huoneessa.

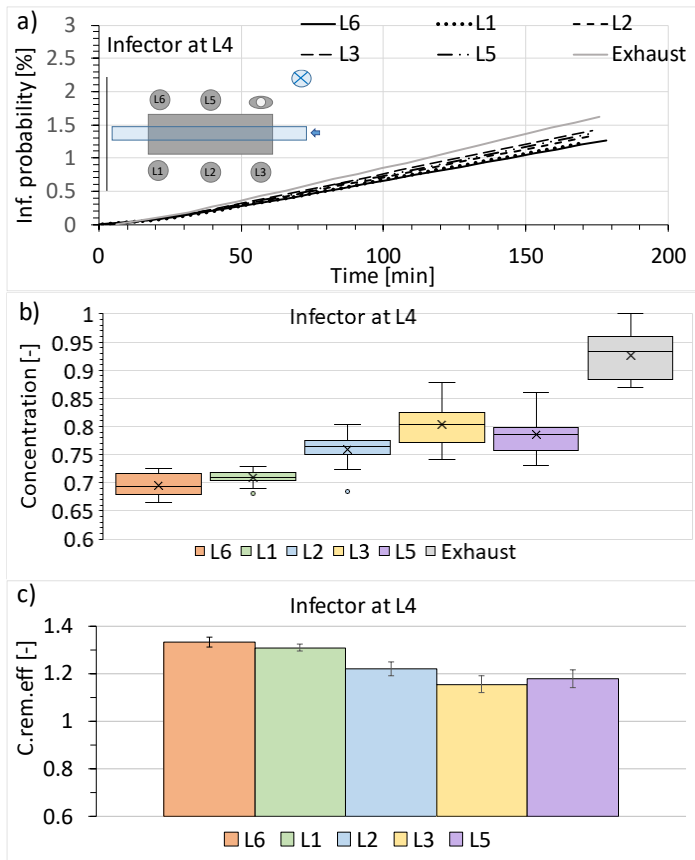
Infektoitunut	L6	L6	L5	L5	L4	L4
Vertailupiste	L1	Exhaust	L1	Exhaust	L1	Exhaust
Arvojen lkm	14	14	14	14	13	14
Keskiarvo avg	0.69	0.94	0.48	0.52	0.69	0.77
Min	0.67	0.88	0.47	0.50	0.64	0.72
Max	0.71	1.00	0.52	0.54	0.76	1.00
sd	0.01	0.03	0.01	0.01	0.03	0.08
sd/avg	0.02	0.03	0.03	0.02	0.05	0.10
C-index-1 [-]	0.90	1.22	0.92	1.00	0.95	1.05
C-index-2 [-]	-0.17	-	-0.05	-	-0.06	-
ε_p^c	1.36	1.00	1.08	1.00	1.11	1.00

4.2.1.3 Kuusi henkilöä, lämpökuorma 38 W/m²

Kuva 20 esittää tilannetta, jossa Infektoitunut on työpisteellä L4 ja huoneen sisäisten lämpökuormien painopistettä on siirretty pöydän ympärille siten, että jokaisessa työpisteessä on henkilöä jäljittelevä lämpömalli. Tässä tapauksessa huoneessa on pienempi lämpökuormataso, noin 40 W/m², ja ilmanvaihto on sekoittava, jolloin sisäilma on hyvin sekoittunutta (ei täysin sekoittunutta).

Tulosten perusteella suurin konsentraatio oli poistoilmassa, mikä on tavoitteenmukaista ja loogista, koska infektoituneen työpiste L4 oli lähimpänä poistoilmalaitetta. Oleskeluvyöhykkeellä suurin keskimääräinen dimensioton konsentraatio mitattiin työpisteellä L3, joka on infektoituneen vastakkainen työpiste toisella puolella pöytää. Pienin konsentraatio puolestaan mitattiin työpisteellä L6, joka oli kauimpana infektoituneesta, mutta samalla puolella pöytää. Tuloksissa dimensioton konsentraatio kasvoi melko tasaisesti huoneen ovipäädyn työpisteiltä L6 ja L1 huoneen toisen päädyn työpisteille L3 ja L5, jotka siis olivat tässä tapauksessa lähimpänä infektoitunutta. Konsentraation vaihtelu oli puolestaan suurinta poistoilmassa ja pienintä työpisteellä L1, joka nähdään selvästi dimensiottoman konsentraation kuvaajasta.

Epäpuhtauksien poistotehokkuus oli jokaisella työpisteellä suurempi kuin yksi ja se pieneni kohti poistoilmalaitteenpuoleisia työpisteitä L3 ja L5. Infektioriski oli työpisteillä noin 3 tunnin jälkeen 1–1,5 %, eli samaa suuruusluokkaa kuin kahden henkilön tapauksessa, paitsi että hajontaa työpisteiden välillä oli 2 henkilön tapauksessa ehkä vähän enemmän.

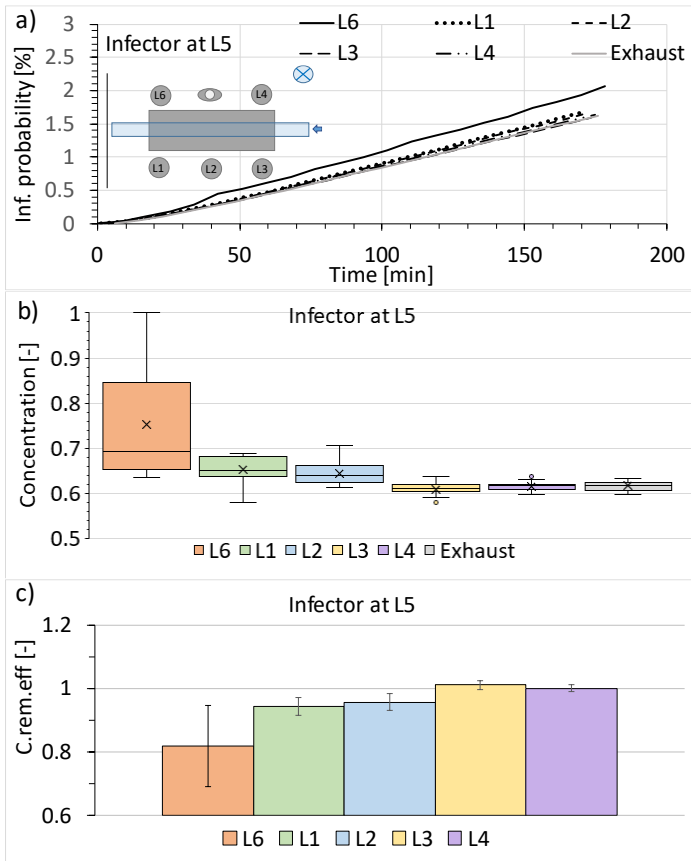


Kuva 20. Mittaustuloksia sekoittavalla ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä 4, altistuvia on kaikilla muilla työpisteillä ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 38 W/m^2 : a) Infektoriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtausien poistotehokkuus.

Kuva 21 esittää tilannetta, jossa Infektoitunut on työpisteellä L5 ja huoneen sisäisten lämpökuormien painopistettä on siirretty pöydän ympärille lämpökuormatason ollessa 40 W/m^2 .

Kun infektoitunut siirrettiin pöydän keskelle, suurin konsentraatio oli infektoituneen vierekkäisellä työpisteellä L6, eikä poistoilmassa, niin kuin edellisessä tapauksessa. Vastaava havainto tehtiin myös kahden henkilön tapauksessa. Pienin konsentraatio puolestaan mitattiin työpisteellä L4 sekä poistoilmassa, mikä ei ole tavoiteltava tilanne. Konsentraation vaihtelu oli selvästi suurinta työpisteellä L6 ja pienintä työpisteellä L4.

Epäpuhtausien poistotehokkuus oli jokaisella työpisteellä pienempi tai yhtä suuri kuin yksi pientyntyen kohti suurimman konsentraation työpistettä L6. Infektoriski oli työpisteillä tässä tapauksessa 1,5–2 % eli vähän pienempi kuin kahden henkilön tapauksessa. Kuuden henkilön tapauksessa työpisteen L6 infektoriski jäi kuitenkin noin 2 %:iin kun se kahden henkilön tapauksessa oli noin 3 % prosenttia selvästi suuremman konsentraation vaihtelun takia.

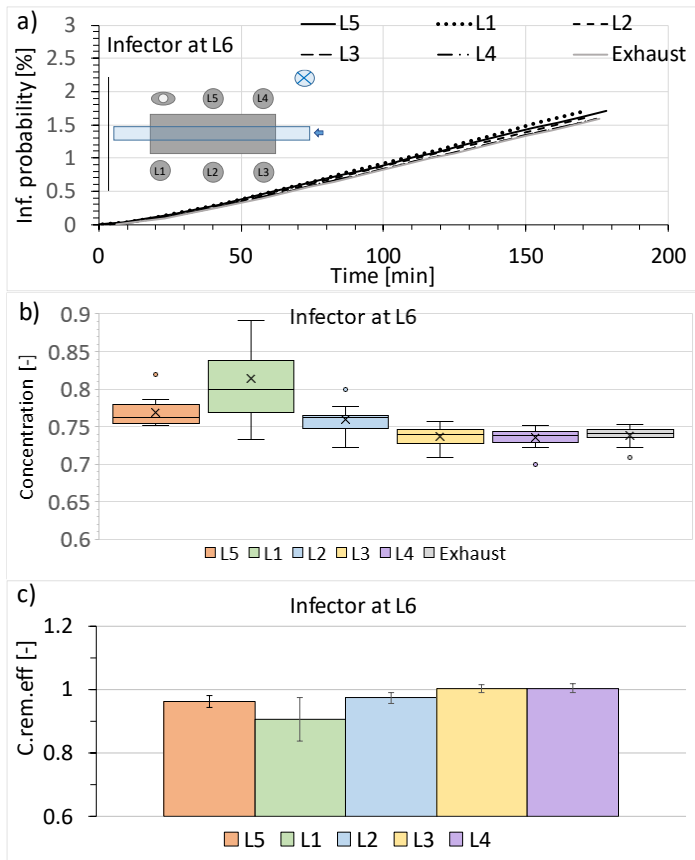


Kuva 21. Mittaustuloksia sekoittavalla ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä 5, altistuvia on kaikilla muilla työpisteillä ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 38 W/m²: a) Infektoriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtauspoistotehokkuus.

Kuva 22 esittää tilannetta, jossa Infektoitunut on työpisteellä L6 eli kauimpana poistoilmalaitetta, ja huoneen sisäisten lämpökuormien painopistettä on siirretty ikkunalta pöydän ympärille lämpökuormatason ollessa 40 W/m².

Mittausten perusteella, suurin konsentraatio oli infektoituneen vastakkaisella työpisteellä L1, samoin kuin kahden henkilön tapauksessa. Pienin konsentraatio mitattiin työpisteellä L4 sekä poistoilmassa. Työpiste L4 oli tässä tapauksessa kauimpana infektoituneesta, mutta samalla puolella pöytää. Konsentraation vaihtelu oli taas selvästi suurinta työpisteellä L1 ja pienintä työpisteellä L4.

Epäpuhtauspoistotehokkuus oli jokaisella työpisteellä pienempi tai yhtä suuri kuin yksi, ollen pienimmillään suurimman konsentraation työpisteellä L1. Infektoriski oli työpisteillä 1,5–2 % eli samaa suuruusluokkaa kuin kahden henkilön tapauksessa. Myös työpisteiden välinen infektoriskin hajonta jäi suppeaksi.



Kuva 22. Mittaustuloksia sekoittavalla ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä 6, altistuvia on kaikilla muilla työpisteillä ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 38 W/m²: a) Infektoriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtauksien poistotehokkuus.

Taulukko 16 esittää dimensiottoman konsentraation (0...1) tuloksista laskettuja tilastollisia muuttujia altistuneiden hengitysvyöhykkeellä sekä poistoilmassa, kun infektoitunut on työpisteillä L4, L5 tai L6. Tuloksista nähdään, että keskimääräinen konsentraatio oli vertailutyöpisteellä L1 suurimmillaan, kun infektoitunut oli vastakkaisella työpisteellä L6, jolloin myös poistoilman konsentraatio oli matalammalla tasolla kuin työpisteellä L1. Matalin konsentraatio mitattiin työpisteellä L1 silloin, kun infektoitunut oli työpisteellä L4, eli lähimpänä poistoilmalaitetta. Vastaavat havainnot tehtiin myös kahden henkilön tapauksessa.

Kun infektoitunut oli keskellä pöytää työpisteellä L5, suurin keskimääräinen konsentraatio mitattiin vierekkäisellä työpisteellä L6 ja pienin konsentraatio työpisteellä L3, joka oli toisella puolella pöytää. Kun infektoitunut siirrettiin vielä lähemmäksi poistoilmalaitetta, työpisteelle L4, suurin konsentraatio mitattiin vastakkaiselta työpisteeltä L3 ja pienin konsentraatio työpisteellä L6, joka oli kauimpana infektoituneesta samalla puolella pöytää. Pienimmän konsentraation työpisteestä tehtiin vastaavanlainen havainto myös aerosolimittauksissa.

Epäpuhtauksien poistotehokkuus nousi vertailutyöpisteellä L1 suuremmaksi kuin yksi silloin, kun infektoitunut oli lähimpänä poistoilmalaitetta työpisteellä L4. Tällöin myös pienimmän konsentraation

omaavan työpisteen paikallinen poistotehokkuus oli suurimmillaan noin 1,3. Suurimman konsentraation omaavan työpisteen poistotehokkuuden havaittiin olevan noin 0,8 kun infektoitunut oli pöydän keskellä työpisteessä L5.

Taulukko 16. Konsentraatio vertailutyöpisteellä L1, suurimman (max) ja pienimmän (min) konsentraation työpisteillä sekä poistoilmassa (Ex). Infektoitunut on työpisteellä L4, L5 tai L6. Sekoittava ilmanjako, lämpökuorma 38 W/m², kuusi henkilöä huoneessa, mittausten lukumäärä 14 kpl.

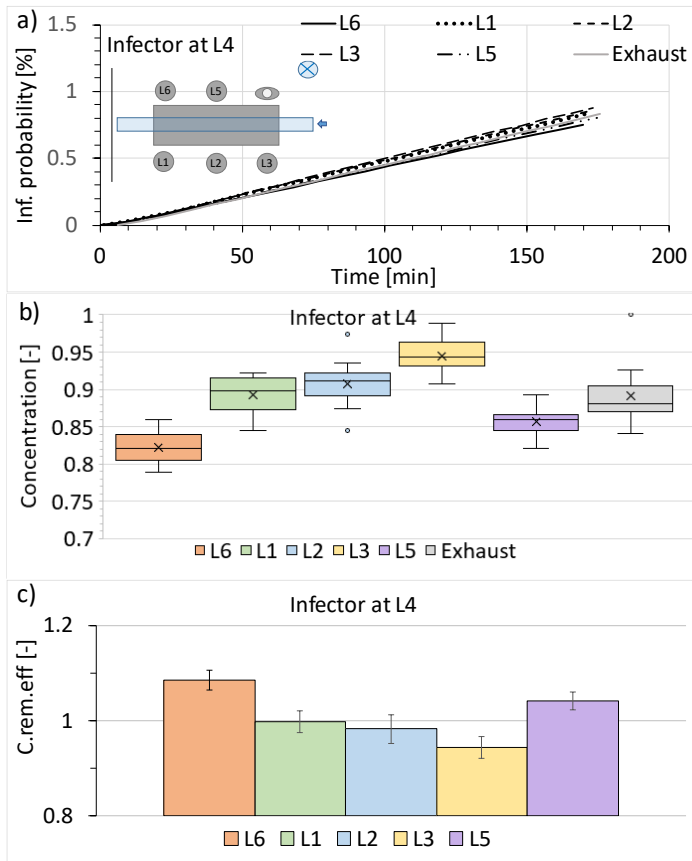
C [-]	L1 (ref)	L1(max) /L4(min)	Ex.	L1 (ref)	L6(max) /L3(min)	Ex.	L1 (ref)	L3(max) /L6 (min)	Ex.
Infect.	L6	L6	L6	L5	L5	L5	L4	L4	L4
avg	0.81	0.81 / 0.74	0.74	0.65	0.75 / 0.61	0.6 2	0.71	0.8 / 0.7	0.93
min	0.73	0.73 / 0.7	0.71	0.58	0.63 / 0.58	0.6 0	0.68	0.74 / 0.66	0.87
max	1.00	1 / 0.75	0.75	0.69	1 / 0.64	0.6 3	0.73	0.88 / 0.73	1.00
sd	0.07	0.07 / 0.01	0.01	0.03	0.13 / 0.01	0.0 1	0.01	0.04 / 0.02	0.04
ε_p^c	0.91	0.91 / 1	1.00	0.94	0.82 / 1.01	1.0 0	1.31	1.15 / 1.33	1.00

4.2.1.4 Kuusi henkilöä, lämpökuorma 60 W/m²

Kuva 23 esittää tilannetta, jossa infektoitunut on työpisteellä L4 ja huoneen sisäisten lämpökuormien painopistettä on siirretty pöydän ympärille siten, että jokaisessa työpisteessä on henkilöä jäljittelevä lämpömalli. Tässä tapauksessa huoneessa on suurempi lämpökuormataso, noin 60 W/m², ja ilmanvaihto on sekoittava, jolloin sisäilma on hyvin sekoittunutta (ei täysin sekoittunutta).

Tulosten perusteella suurin konsentraatio oli työpisteellä L3, eli vastapäätä infektoitunutta henkilöä. Myös muilla samalla puolella pöytää olevilla työpisteillä (L1, L2) konsentraatio oli suurempi kuin poistoilmassa, mikä viittaa siihen, että voimakkaamman ikkunan lämpökuorman aiheuttama konvektiovirtaus kuljettaa epäpuhtauksia sinne. Pienin konsentraatio mitattiin samoin kuin pienemmän lämpökuorman tapauksessa työpisteeltä L6. Konsentraation vaihtelu oli kaikilla työpisteillä aika maltillista, kuten myös poistossa.

Epäpuhtauksien poistotehokkuus oli pöydän ikkunanpuoleisella puolella (työpisteet L5-L6) yli yhden ja muualla (työpisteet L1-L3) alle yhden. Infektioriski oli kuitenkin kaikkialla reilusti alle 1 % johtuen suuremmista ilmajirroista verrattuna pienemmän lämpökuorman tapaukseen.

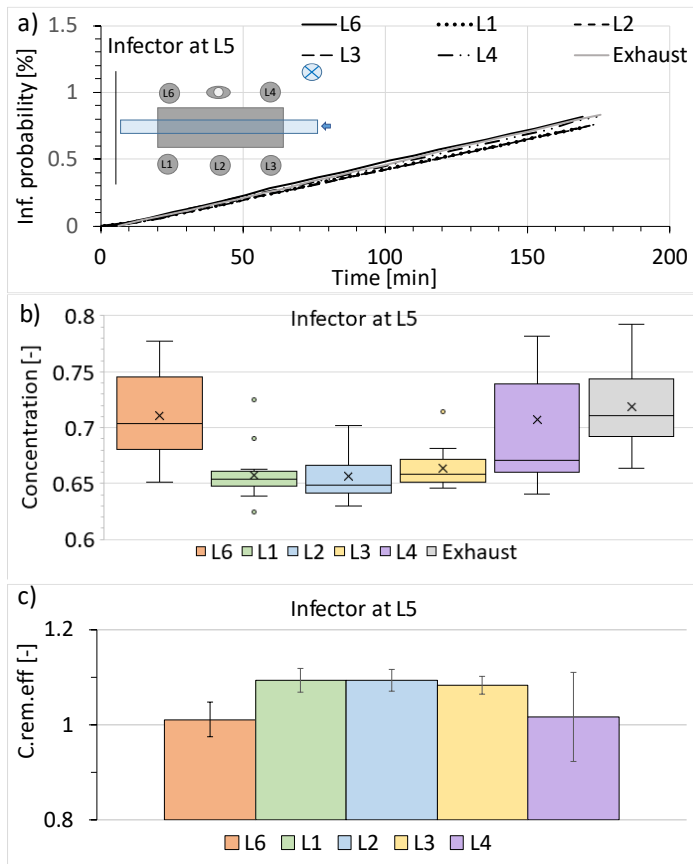


Kuva 23. Mittaustuloksia sekoittavalla ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä 4, altistuvia on kaikilla muilla työpisteillä ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 60 W/m^2 : a) Infektoriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtausien poistotehokkuus.

Kuva 24 esitetään tilanne, jossa infektoitunut on työpisteellä L5 ja huoneen sisäisten lämpökuormien painopistettä on siirretty pöydän ympärille siten, että jokaisessa työpisteessä on henkilöä jäljittelevä lämpömalli. Tässä tapauksessa huoneessa on suurempi lämpökuormatase, noin 60 W/m^2 , ja ilmanvaihto on sekoittava, jolloin sisäilma on hyvin sekoittunutta (ei täysin sekoittunutta).

Tulosten perusteella suurin konsentraatio oli poistoilmassa. Oleskeluvyöhykkeen työpisteistä konsentraatio oli suurin pisteellä L6, eli infektoituneen vieressä oven puolella. Toisella infektoituneen vierellä olevalla työpisteellä (L4) konsentraatio oli keskimäärin matala, mutta vaihtelu oli suurta, mikä selittyi sijainnilla infektoituneen ja poistoilmalaitteen välissä. Pöydän toisella puolella olevilla työpisteillä (L1-L3) konsentraatio oli kaikilla pieni. Konsentraation vaihtelu oli suurta infektoituneen vieressä olevilla työpisteillä (L4, L6) sekä poistossa.

Epäpuhtausien poistotehokkuus oli kaikilla työpisteillä yksi tai hieman sen yli. Infektoriski oli kaikilla reilusti alle 1 %.

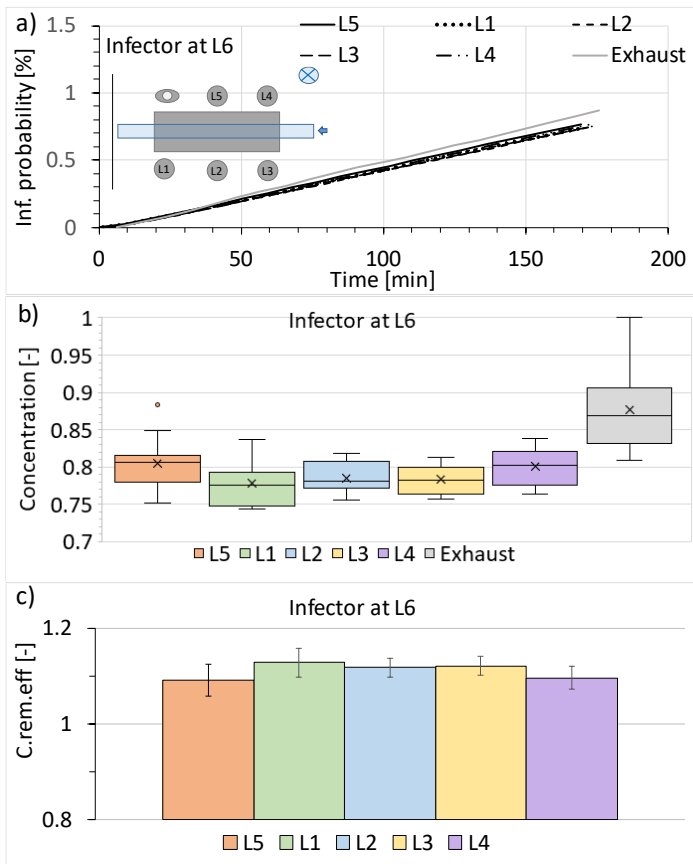


Kuva 24. Mittaustuloksia sekoittavalla ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä 5, altistuvia on kaikilla muilla työpisteillä ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 60 W/m^2 : a) Infektoriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtauksien poistotehokkuus.

Kuva 25 on tilanne, jossa infektoitunut on työpisteellä L6 ja huoneen sisäisten lämpökuormien painopistettä on siirretty pöydän ympärille siten, että jokaisessa työpisteessä on henkilöä jäljittelevä lämpömalli. Tässä tapauksessa huoneessa on suurempi lämpökuormataso, noin 60 W/m^2 , ja ilmanvaihto on sekoittava, jolloin sisäilma on hyvin sekoittunutta (ei täysin sekoittunutta).

Tulosten perusteella suurin konsentraatio oli tässäkin tapauksessa poistoilmassa. Oleskeluvyöhykkeen työpisteistä konsentraatio oli suurin pisteellä L5, eli infektoituneen vieressä. Toisella infektoituneen kanssa samalla puolella pöytää olevalla työpisteellä (L4) konsentraatio oli toiseksi suurin, kun taas pöydän vastakkaisen puolen työpisteillä (L1-L3) kaikilla pieni. Konsentraation vaihtelu oli suurta ainoastaan poistossa.

Epäpuhtauksien poistotehokkuus oli kaikilla työpisteillä reilusti yli yhden ($\sim 1,1$). Infektoriski oli kaikilla reilusti alle 1 %.



Kuva 25. Mittaustuloksia sekoittavalla ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä 6, altistuvia on kaikilla muilla työpisteillä ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 60 W/m^2 : a) Infektoriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtauksien poistotehokkuus.

Taulukko 16 esittää dimensiottoman konsentraation (0...1) tuloksista laskettuja tilastollisia muuttujia altistuneiden hengitysvyöhykkeellä sekä poistoilmassa, kun infektoitunut on työpisteillä L4, L5 tai L6. Tuloksista nähdään, että keskimääräinen konsentraatio oli vertailutyöpisteellä L1 suurimmillaan, kun infektoitunut oli työpisteellä L4, jolloin myös poistoilman konsentraatio oli samalla tasolla kuin työpisteellä L1. Kyseisessä testitapauksessa ikkunoiden lämpökuorman aikaansaamat konvektiovirtaukset näyttivät liikuttavan hiukkaspilveä infektoituneen hengityksestä pöydän vastakkaiselle puolelle. Matalin konsentraatio mitattiin työpisteellä L1 silloin, kun infektoitunut oli työpisteellä L5.

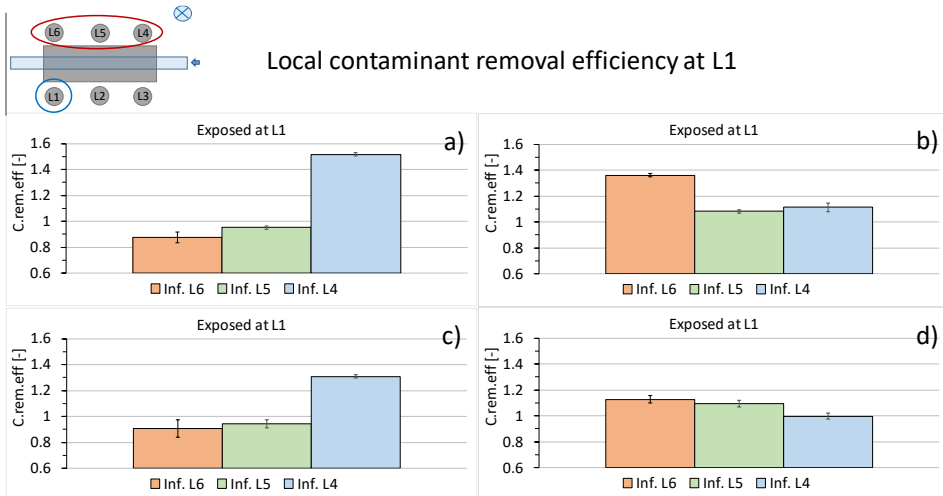
Taulukko 17. Konsentraatio työpisteellä L1, suurimman (max) ja pienimmän (min) konsentraation työpisteellä sekä poistoilmassa (ex). Infektoitunut on työpisteellä L4, L5 tai L6. Sekoittava ilmanjako, lämpökuorma 60 W/m², kuusi henkilöä huoneessa, tilastollinen arvojoukko 14 mittausarvoa.

C [-]	L1 (ref)	L5(max) /L1(min)	Ex.	L1 (ref)	L6(max) /L2(min)	Ex.	L1 (ref)	L3(max) /L6(min)	Ex.
infect.	L6	L6	L6	L5	L5	L5	L4	L4	L4
avg	0.78	0.8/ 0.78	0.88	0.66	0.71 / 0.66	0.72	0.89	0.94 / 0.82	0.89
min	0.74	0.75/ 0.74	0.81	0.62	0.65 / 0.63	0.66	0.84	0.91 / 0.79	0.84
max	0.84	0.88/ 0.84	1.00	0.72	0.78 / 0.7	0.79	0.92	0.99 / 0.86	1.00
sd	0.03	0.03/ 0.03	0.06	0.03	0.04 / 0.02	0.04	0.02	0.02 / 0.02	0.04
ϵ_p^c	1.13	1.09/ 1.13	1.00	1.09	1.01 / 1.09	1.00	1.00	0.94 / 1.09	1.00

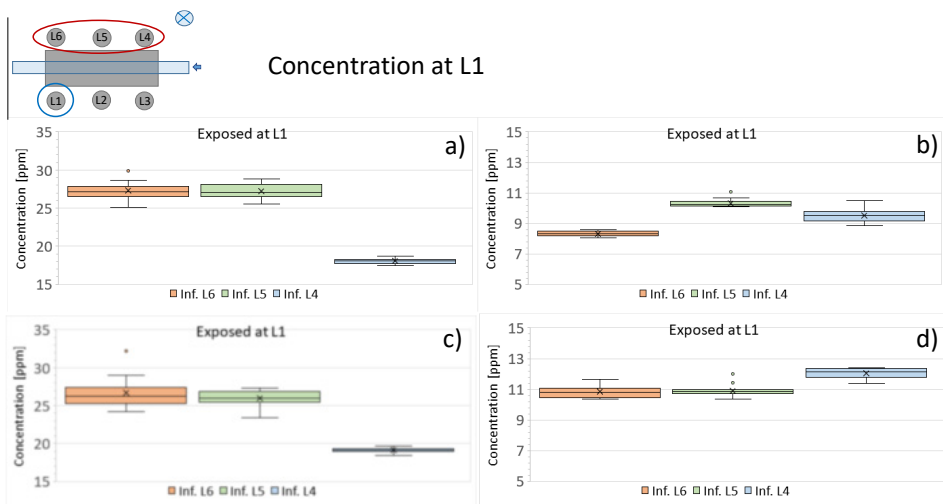
4.2.1.5 Eri lämpökuormien ja henkilömäärien vertailu

Kuva 26 on esitetty epäpuhtauksien paikallinen poistotehokkuus referenssityöpisteellä L1 eri lämpökuormilla ja henkilömäärillä infektoiduneen henkilön ollessa työpisteellä L4, L5 tai L6. Kuvasta huomataan, että henkilömäärän kasvattaminen heikentää jonkin verran epäpuhtauksien poistotehokkuutta, mutta sairaan henkilön paikan vaikutus on samankaltainen sekä kahden että kuuden henkilön tapauksessa lämpökuorman ollessa sama. Lämpökuorman kasvattaminen puolestaan muuttaa tilannetta reilusti sairaan henkilön paikan vaikutuksen suhteen.

Kuva 27 esittää absoluuttiset hiukkaskonsentraatiot vastaavista testitapauksista ja siitä voidaan nähdä, että vaikka epäpuhtauksien poistotehokkuudet ovat suuremman lämpökuorman tapauksissa heikommät, suurempien kokonaisilmavirtojen ansiosta konsentraatiot jäävät etenkin kahden henkilön tapauksissa samalle tasolle tai jopa hiukan alemmaksi.



Kuva 26. Paikallinen epäpuhtauksien poistotehokkuus, sekoittava ilmanjako. Infektoitunut on joko työpisteellä L4, L5 tai L6 ja altistuva työpisteellä L1: a) Huoneessa kaksi henkilöä ja lämpökuorma 38 W/m². b) Huoneessa kaksi henkilöä ja lämpökuorma 60 W/m². c) Huoneessa kuusi henkilöä ja lämpökuorma 38 W/m². d) Huoneessa kuusi henkilöä ja lämpökuorma 60 W/m².

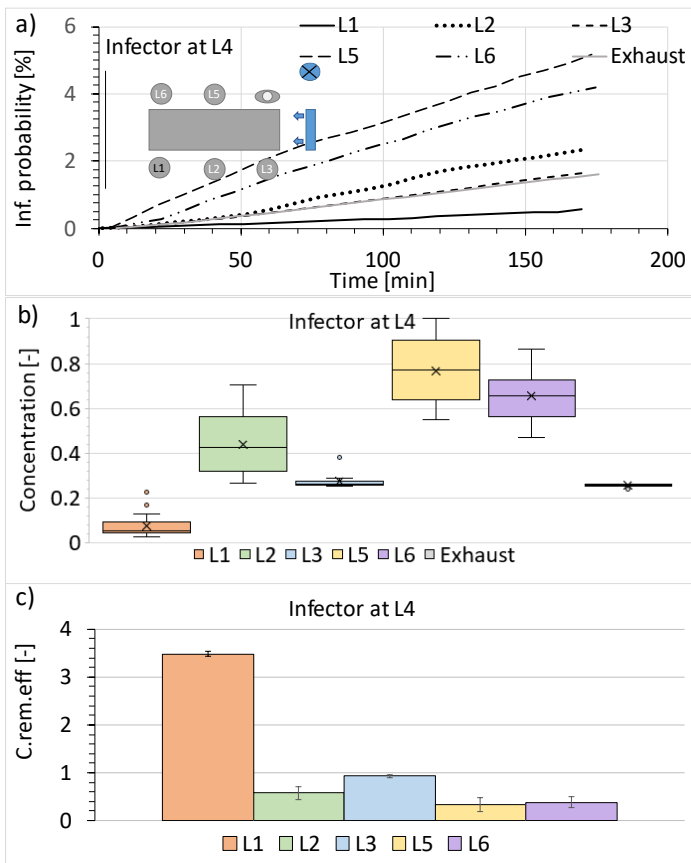


Kuva 27. Konsentraatio altistuvan hengitysvyöhykkeellä työpisteellä L1. Infektoitunut on työpisteellä L4, L5 tai L6, sekoittava ilmanjako: a) Huoneessa kaksi henkilöä ja lämpökuorma 38 W/m². b) Huoneessa kaksi henkilöä ja lämpökuorma 60 W/m². c) Huoneessa kuusi henkilöä ja lämpökuorma 38 W/m². d) Huoneessa kuusi henkilöä ja lämpökuorma 60 W/m².

4.2.2 Syrjäyttävä ilmanjako

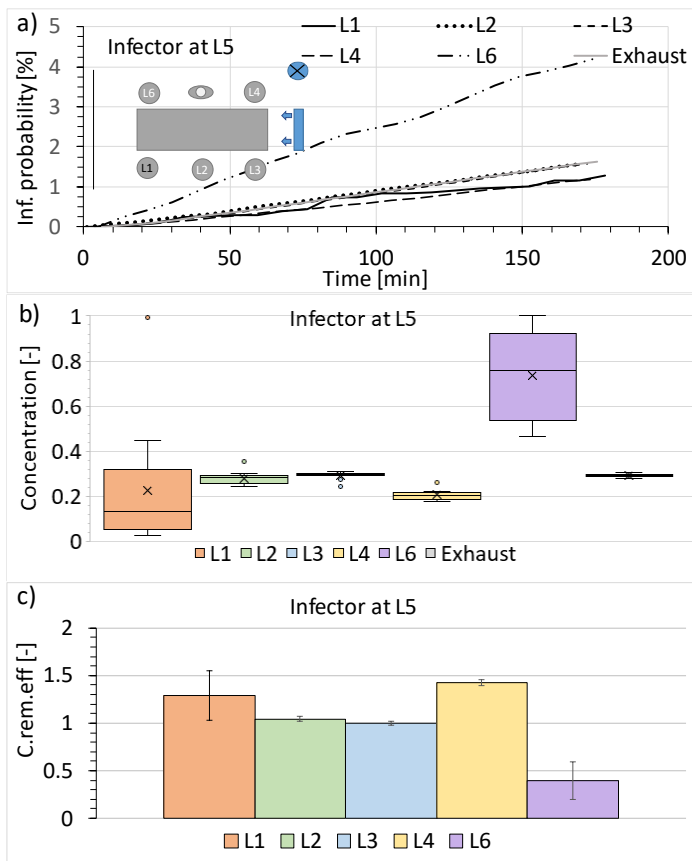
4.2.2.1 Kaksi henkilöä, lämpökuorma 38 W/m²

Kuva 28 esittää tilannetta, jossa infektoitunut on työpisteellä L4 ja altistuva on työpisteellä L1. Huoneen sisäinen lämpökuormatase on kohtuullinen noin 40 W/m² ja ilmanvaihto on syrjäyttävä. Infektoitunut on tässä työpisteellä, joka on lähimpänä poistoilmalaitetta. Tulosten perusteella suurin konsentraatio muodostuu infektoituneen viereen. Epäpuhtauksien poistotehokkuus on altistuvan työpistettä L1 lukuun ottamatta kaikkialla oleskeluvyöhykkeellä alle 1. Altistuva henkilö on tässä kaukana infektoituneesta, joten konsentraatio on loogisesti pienimmillään tämän työpisteellä. Infektioriskissä on suuria vaihteluita eri paikoissa oleskeluvyöhykettä; työpisteellä L1 se on alle 1 %, kun taas infektoituneen puolella pöytää jopa 4–5 %.



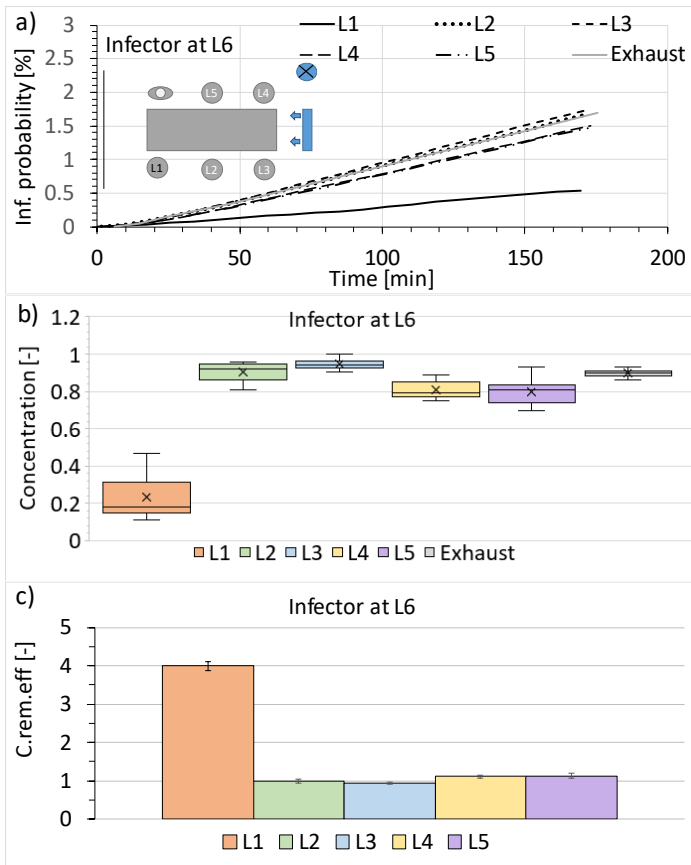
Kuva 28. Mittaustuloksia syrjäyttävällä ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä 4, altistuva on työpisteellä 1 ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 38 W/m²: a) Infektioriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtauksien poistotehokkuus.

Kuva 29 esittää tilannetta, jossa infektoitunut on työpisteellä L5 ja altistuva on työpisteellä L1. Huoneen sisäinen lämpökuormatase on kohtuullinen noin 40 W/m² ja ilmanvaihto on syrjäyttävä. Tulosten perusteella suurin konsentraatio muodostuu infektoituneen viereen oven puolelle. Epäpuhtauksien poistotehokkuus on tätä kohtaa lukuun ottamatta kaikkialla yli 1. Pienin konsentraatio on tässäkin tapauksessa altistuneen työpisteellä L1, joskin taso vaihtelee aika paljon. Infektoriski on infektoituneen vieressä olevaa suuren konsentraation pistettä (4 %) lukuun ottamatta kaikkialla hieman yli 1 %.



Kuva 29. Mittaustuloksia syrjäyttävällä ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä 5, altistuva on työpisteellä 1 ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 38 W/m²: a) Infektoriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtauksien poistotehokkuus.

Kuva 30 esittää tilannetta, jossa infektoitunut on työpisteellä L6 ja altistuva on työpisteellä L1. Huoneen sisäinen lämpökuormatase on kohtuullinen noin 40 W/m² ja ilmanvaihto on syrjäyttävä. Infektoitunut on tässä vastapäätä altistuvan työpistettä. Tulosten perusteella altistuvan työpisteellä on selvästi oleskeluvyöhykkeen alin epäpuhtauskonsentraatio. Huoneen niukasti suurimmat konsentraatiot ovat muualla altistuneen puolella pöytää. Epäpuhtauksien poistotehokkuus on altistuvan työpistettä L1 (~4) lukuun ottamatta kaikkialla oleskeluvyöhykkeellä ykkösen luokkaa. Infektoriskissä on altistuvan työpisteellä n. 0,5 % ja muualla n. 1,5 %.



Kuva 30. Mittaustuloksia syrjäyttävällä ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä 6, altistuva on työpisteellä 1 ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 38 W/m²: a) Infektoriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtauksien poistotehokkuus.

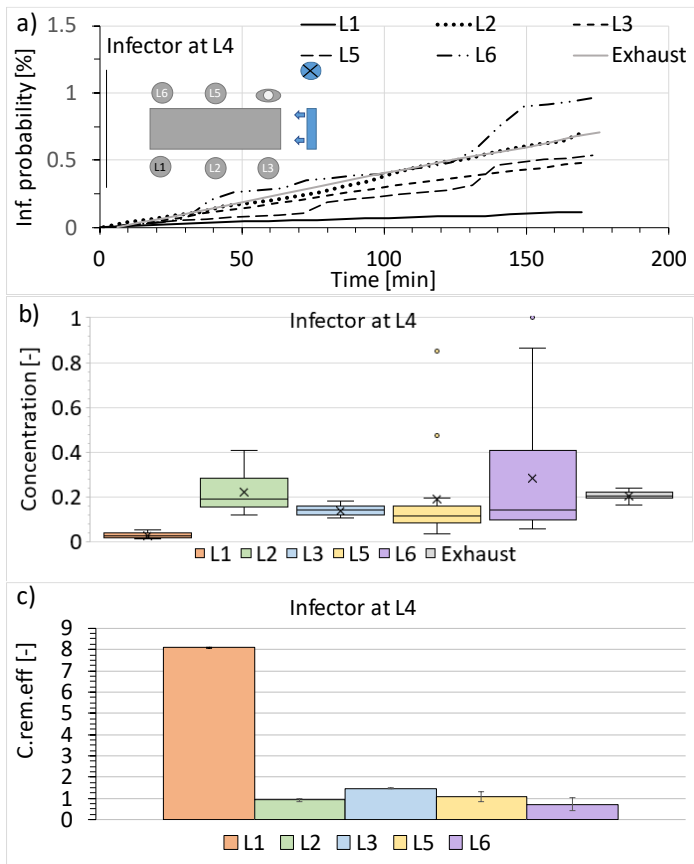
Taulukko 18. Konsentraatio [-] työpisteellä L1 ja poistossa, kun infektoitunut on työpisteellä L4, L5 tai L6. Sekoittava ilmanjako, lämpökuorma 38 W/m², kaksi henkilöä huoneessa. esittää dimensiottoman konsentraation (0...1) tuloksista laskettuja tilastollisia muuttujia altistuneiden hengitysvyöhykkeellä sekä poistoilmassa, kun infektoitunut on työpisteillä L4, L5 tai L6. Tuloksista nähdään, että keskimääräinen konsentraatio oli vertailutyöpisteellä L1 suurimmillaan infektoituneen ollessa työpisteellä L5 tai L6. Selvästi matalin konsentraatio mitattiin työpisteellä L1 silloin, kun infektoitunut oli työpisteellä L4. Kaikissa tapauksissa konsentraatio oli selvästi alempi kuin poistoilmassa eli syrjäyttävä ilmanjako pystyi suojaamaan altistuvaa hyvin, kun tämä oli työpisteellä L1. On kuitenkin huomionarvoinen maininta, että tilanne olisi ollut eri, jos altistunut olisi ollut millä tahansa muulla paikalla.

Taulukko 18. Konsentraatio [-] työpisteellä L1 ja poistossa, kun infektoitunut on työpisteellä L4, L5 tai L6. Sekoittava ilmanjako, lämpökuorma 38 W/m², kaksi henkilöä huoneessa.

Infektoitunut	L6	L6	L5	L5	L4	L4
Vertailupiste	L1	Exhaust	L1	Exhaust	L1	Exhaust
Arvojen lkm	13	14	14	14	14	14
Keskiarvo avg	0.23	0.90	0.23	0.29	0.08	0.25
Min	0.11	0.86	0.03	0.28	0.02	0.24
Max	0.47	0.93	0.99	0.31	0.23	0.26
sd	0.12	0.02	0.26	0.01	0.06	0.01
sd/avg	0.52	0.02	1.14	0.03	0.78	0.02
C-index-1 [-]	0.39	1.19	0.68	0.85	0.21	0.60
C-index-2 [-]	-0.49	-	-0.14	-	-0.44	-
ε_p^c	4.00	1.00	1.29	1.00	3.48	1.00

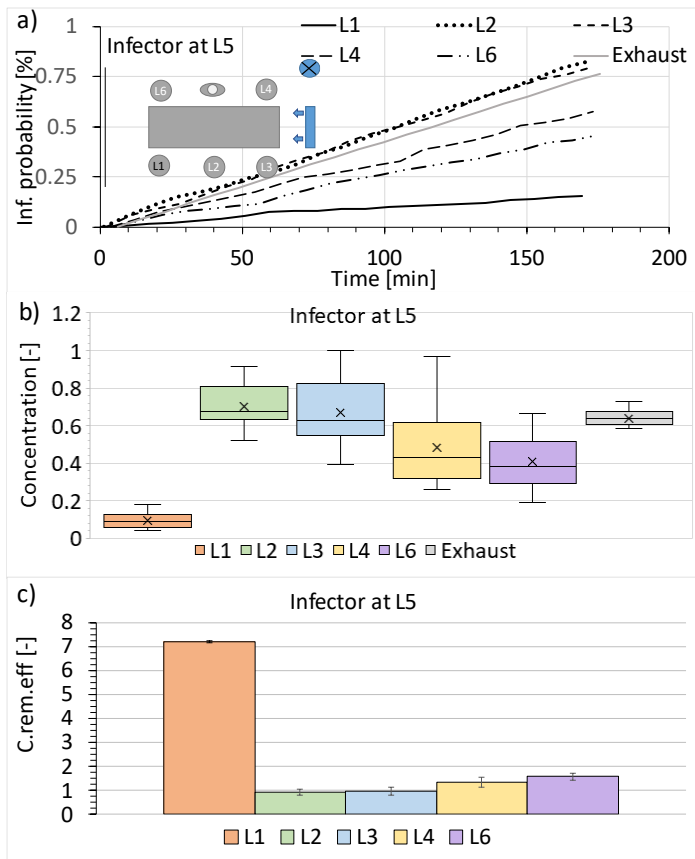
4.2.2.2 Kaksi henkilöä, lämpökuorma 60 W/m²

Kuva 31 esittää tilannetta, jossa infektoitunut on työpisteellä L4 ja altistuva on työpisteellä L1. Huoneen sisäinen lämpökuormataso on 60 W/m² ja ilmanvaihto on syrjäyttävä. Infektoitunut on tässä työpisteellä, joka on lähimpänä poistoilmalaitetta. Tulosten perusteella suurin konsentraatio muodostuu infektoituneen kanssa samalle puolelle pöytää oven puoleiseen päätyyn. Samassa paikassa konsentraatio myös vaihteli runsaasti ajan funktiona. Epäpuhtauksien poistotehokkuus on altistuvan työpisteellä L1 peräti n. 8, kun taas muualla huoneessa jäädään yhden tuntumaan. Altistuva henkilö on tässä kaukana infektoituneesta, joten konsentraatio on loogisesti pienimmillään tämän työpisteellä. Infektoriski jää altistuvan työpisteellä varsin matalaksi (< 0,2 %), ja heikoimmillaankin alle yhden prosentin suurimman epäpuhtauskonsentraation alueella.



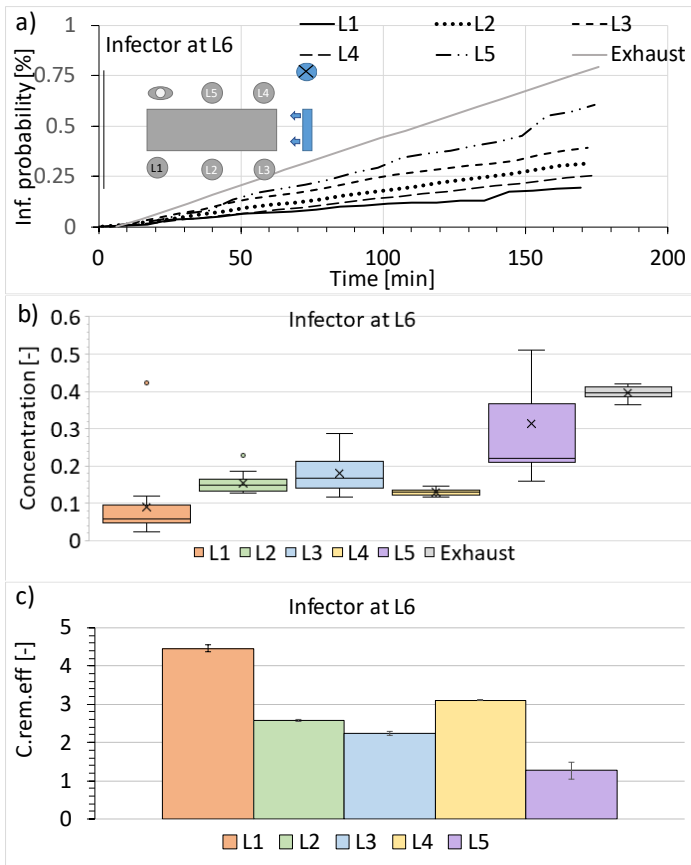
Kuva 31. Mittaustuloksia syrjäyttävällä ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä 4, altistuva on työpisteellä 1 ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 60 W/m^2 : a) Infektorisikin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtausien poistotehokkuus.

Kuva 32 esittää tilannetta, jossa infektoitunut on työpisteellä L5 ja altistuva on työpisteellä L1. Huoneen sisäinen lämpökuormatase on 60 W/m^2 ja ilmanvaihto on syrjäyttävä. Tuloksista nähdään, että suurin konsentraatio muodostuu infektoitunutta vastapäätä olevalle alueelle pöydän toiselle puolelle. Pienin konsentraatio on tässäkin tapauksessa altistuvan työpisteellä L1. Konsentraatio vaihtelee työpistettä L1 lukuun ottamatta kaikkialla melko runsaasti. Epäpuhtausien poistotehokkuus on altistuvan työpisteellä vähän yli 7 ja muualla yhden luokkaa. Infektorisiki jää kaikkialla reilusti alle yhden prosentin, ollen alimmillaan altistuvan työpisteellä n. 0,2 %.



Kuva 32. Mittaustuloksia syrjäyttävällä ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä 5, altistuva on työpisteellä 1 ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 60 W/m^2 : a) Infektoriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtausien poistotehokkuus.

Kuva 34 esittää tilannetta, jossa infektoitunut on työpisteellä L6 ja altistuva tätä vastapäätä työpisteellä L1. Huoneen sisäinen lämpökuormataseo on 60 W/m^2 ja ilmanvaihto on syrjäyttävä. Tulosten perusteella suurin konsentraatio muodostuu infektoituneen viereen, jossa myös pitoisuuden vaihtelu on suurinta. Epäpuhtausien poistotehokkuus on tällä alueella vähän yli 1 ja muualla 2–4,5 välillä. Infektoriski jää kaikkialla varsin matalaksi ollen suurimmillaankin vain hieman yli 0,5 %.



Kuva 33. Mittaustuloksia syrjäyttävällä ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä 6, altistuva on työpisteellä 1 ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 60 W/m²: a) Infektoriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtausien poistotehokkuus.

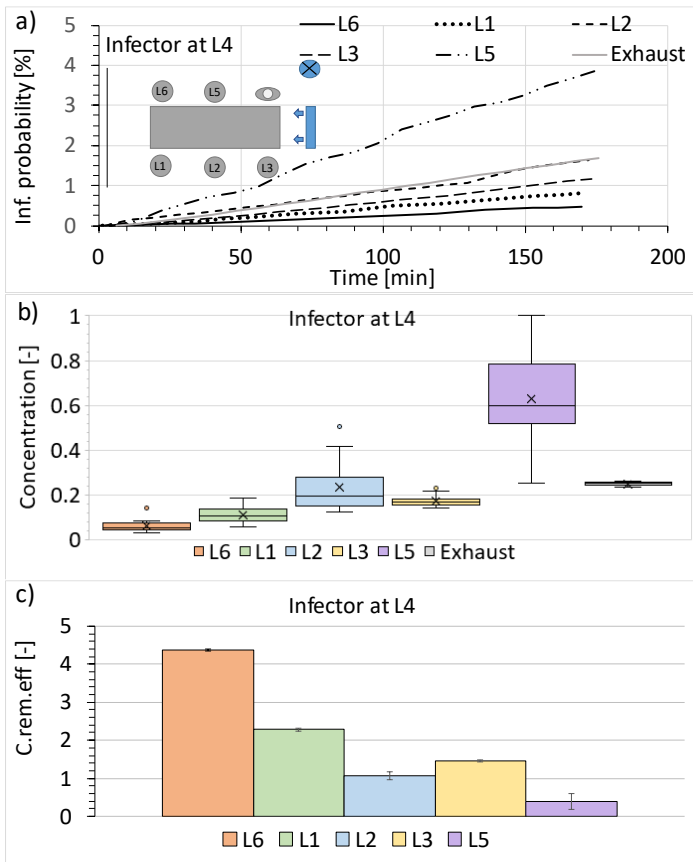
Taulukko 19 esittää dimensiottoman konsentraation (0...1) tuloksista laskettuja tilastollisia muuttujia altistuneiden hengitysvyöhykkeellä sekä poistoilmassa, kun infektoitunut on työpisteillä L4, L5 tai L6. Tuloksista nähdään, että keskimääräinen konsentraatio oli vertailutyöpisteellä L1 suurimmillaan infektoituneen ollessa työpisteellä L5 tai L6. Matalin konsentraatio mitattiin työpisteellä L1 silloin, kun infektoitunut oli työpisteellä L4. Kaikissa tapauksissa konsentraatio oli selvästi alempi kuin poistoilmassa eli syrjäyttävä ilmanjako pystyi suojaamaan altistuvaa hyvin, kun tämä oli työpisteellä L1. Kyseinen työpiste oli myös tässä 60 W/m² tapauksessa alimman konsentraation alue, mutta kiitos suuremman ilmamäärän, pitoisuudet olivat myös muualla huoneessa pienet. Huomionarvoinen seikka on se, että vaikka keskimääräiset pitoisuudet olivat pienet, niissä oli paljon ajallista vaihtelua.

Taulukko 19. Konsentraatio [-] työpisteellä L1 ja poistossa, kun infektoitunut on työpisteellä L4, L5 tai L6. Sekoittava ilmanjako, lämpökuorma 60 W/m², kaksi henkilöä huoneessa.

Infektoitunut	L6	L6	L5	L5	L4	L4
Vertailupiste	L1	Exhaust	L1	Exhaust	L1	Exhaust
Arvojen lkm	14	14	14	14	14	14
Keskiarvo avg	0.09	0.40	0.09	0.64	0.03	0.20
Min	0.02	0.36	0.04	0.58	0.01	0.16
Max	0.42	0.42	0.18	0.73	0.05	0.24
sd	0.10	0.02	0.04	0.04	0.01	0.02
sd/avg	1.11	0.04	0.46	0.06	0.48	0.10
C-index-1 [-]	0.53	2.26	0.20	1.35	0.16	1.18
C-index-2 [-]	-0.49	-	-0.52	-	-0.49	-
ε_p^c	4.46	1.00	7.19	1.00	8.09	1.00

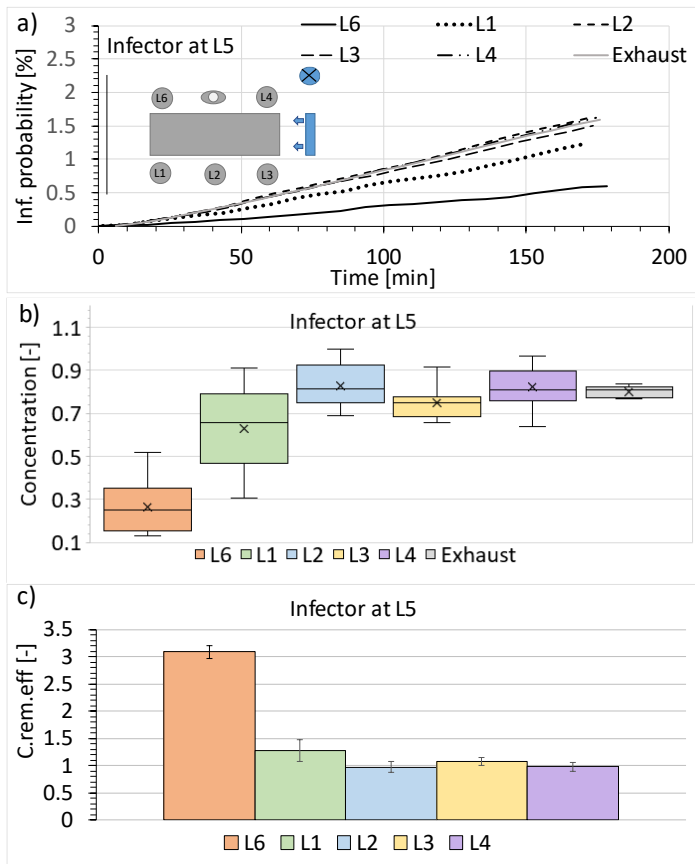
4.2.2.3 Kuusi henkilöä, lämpökuorma 38 W/m²

Kuva 34 esittää tilannetta, jossa infektoitunut on työpisteellä L4 ja huoneen sisäisten lämpökuormien painopistettä on siirretty pöydän ympärille siten, että jokaisessa työpisteessä on henkilöä jäljittelevä lämpömalli. Tässä tapauksessa huoneessa on maltillinen noin 40 W/m² lämpökuorma ja ilmanvaihto on syrjäyttävä. Tulosten perusteella suurin konsentraatio oli työpisteellä L5 eli infektoituneen vieressä. Pienin konsentraatio mitattiin työpisteeltä L6. Konsentraation vaihtelu oli työpisteellä L5 suurta, mutta muualla maltillista. Epäpuhtauksien poistotehokkuudessa oli suuria paikallisia eroja; työpisteellä L5 se oli n. 0,5 ja työpisteellä L6 lähes 4,5 muiden työpisteiden asettuessa näiden väliin. Infektoriski oli työpisteellä L5 lähes 4 %, kun taas muualla pysyttiin 0,5–1,5 % välillä.



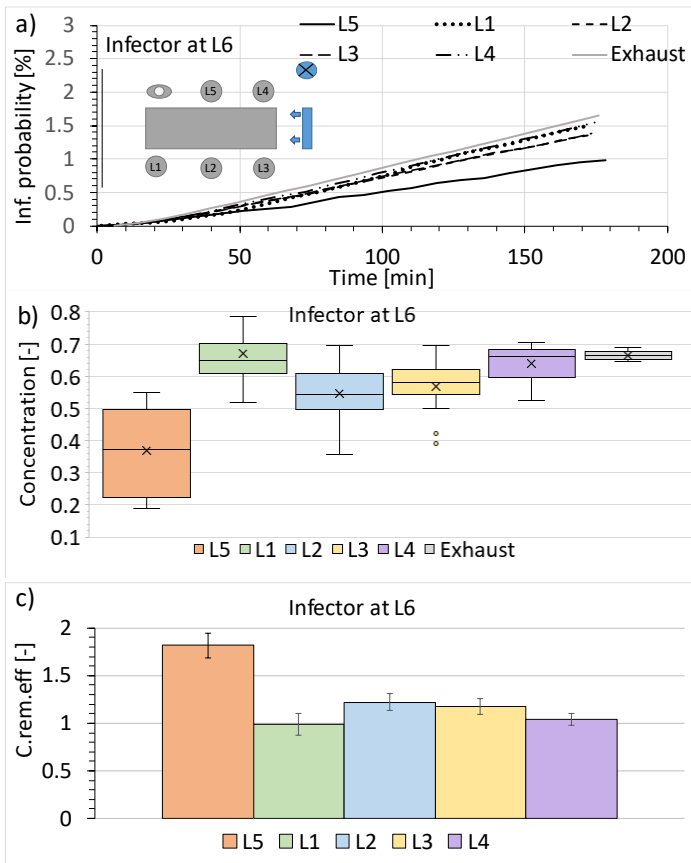
Kuva 34. Mittaustuloksia syrjäyttävällä ilmanjaolla, kun infektioitunut on työpisteellä 4, altistuvia on kaikilla muilla työpisteillä ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 38 W/m^2 : a) Infektioriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtauspoistotehokkuus.

Kuva 35 esittää tilannetta, jossa infektioitunut on työpisteellä L5 ja huoneen sisäisten lämpökuormien painopistettä on siirretty pöydän ympärille siten, että jokaisessa työpisteessä on henkilöä jäljittelevä lämpömalli. Tässä tapauksessa huoneessa on maltillinen noin 40 W/m^2 lämpökuorma ja ilmanvaihto on syrjäyttävä. Tulosten perusteella konsentraatio oli pienin työpisteellä L6 ja kaikkialla muualla ml. poisto suunnilleen samalla tasolla. Konsentraatio vaihteli poistoa lukuun ottamatta kaikkialla kohtalaisen paljon. Epäpuhtauspoistotehokkuudessa työpiste L1 erottui edukseen lukemalla 3 muiden ollessa hieman yli yhden. Infektioriski oli työpisteellä L6 hieman yli 0,5 %, kun muualla oltiin 1,0–1,5 % välillä.



Kuva 35. Mittaustuloksia syrjäyttävällä ilmanjaolla, kun infektioitunut on työpisteellä 5, altistuvia on kaikilla muilla työpisteillä ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 38 W/m^2 : a) Infektoriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtauksien poistotehokkuus.

Kuva 36 esittää tilannetta, jossa infektioitunut on työpisteellä L6 ja huoneen sisäisten lämpökuormien painopistettä on siirretty pöydän ympärille siten, että jokaisessa työpisteessä on henkilöä jäljittelevä lämpömalli. Tässä tapauksessa huoneessa on maltillinen noin 40 W/m^2 lämpökuorma ja ilmanvaihto on syrjäyttävä. Tulosten perusteella pienin konsentraatio oli työpisteellä L5 eli infektioituneen vieressä. Muualla konsentraatiot olivat samaa tasoa poistoilman kanssa. Pitoisuustasot vaihtelivat poistoa lukuun ottamatta kaikkialla jonkin verran. Epäpuhtauksien poistotehokkuus oli työpisteellä L5 hieman alle 2 ja muualla reilun yhden luokkaa. Infektoriski oli työpisteellä L5 1 % ja muualla 1,5 % tienoilla.



Kuva 36. Mittaustuloksia syrjäyttävällä ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä 6, altistuvia on kaikilla muilla työpisteillä ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 38 W/m^2 : a) Infektoriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtauksien poistotehokkuus.

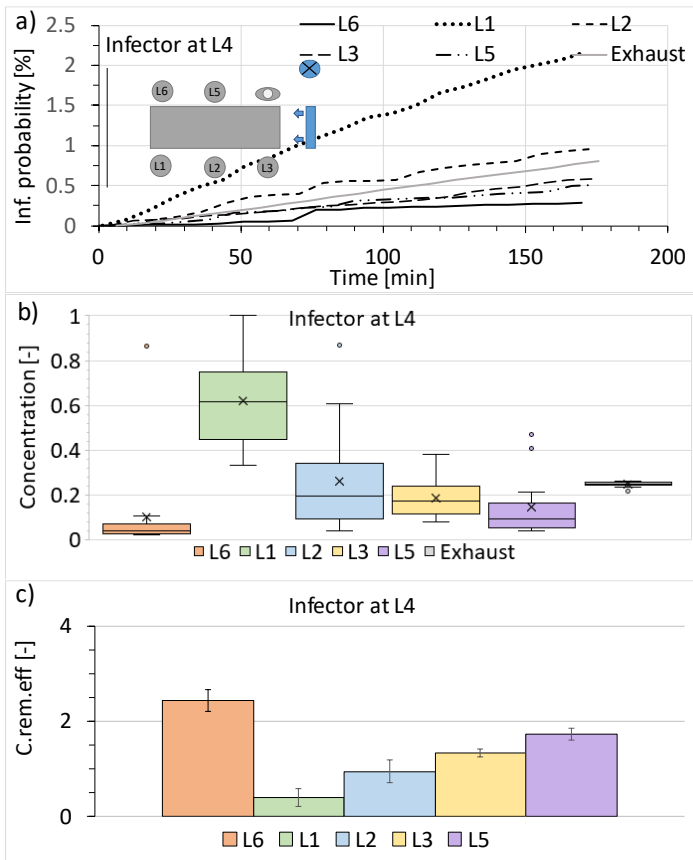
Taulukko 20 esittää dimensiotoman konsentraation (0...1) tuloksista laskettuja tilastollisia muuttujia altistuneiden hengitysvyöhykkeellä sekä poistoilmassa, kun infektoitunut on työpisteillä L4, L5 tai L6. Tuloksista nähdään, että keskimääräinen konsentraatio oli vertailutyöpisteellä L1 suurimmillaan infektoituneen ollessa työpisteellä L5 tai L6. Selvästi matalin konsentraatio mitattiin työpisteellä L1 silloin, kun infektoitunut oli työpisteellä L4. Infektoituneen ollessa työpisteellä L6 pitoisuus työpisteellä L1 oli käytännössä sama kuin poistoilmassa, mutta muissa kahdessa tapauksessa alempi.

Taulukko 20. Konsentraatio vertailutyöpisteellä L1, suurimman (max) ja pienimmän (min) konsentraation työpisteellä sekä poistoilmassa (Ex). Infektoitunut on työpisteellä L4, L5 tai L6. Syrjäyttävä ilmanjako, lämpökuorma 38 W/m², kuusi henkilöä huoneessa, tilastollinen arvojoukko 14 mittausarvoa.

C [-]	L1 (ref)	L1(max) /L5(min)	Ex.	L1 (ref)	L2(max) /L6(min)	Ex.	L1 (ref)	L5(max) /L6(min)	Ex.
Infect.	L6	L6	L6	L5	L5	L5	L4	L4	L4
avg	0.67	0.67 / 0.37	0.67	0.63	0.83 / 0.27	0.80	0.11	0.63 / 0.06	0.25
min	0.52	0.52 / 0.19	0.65	0.31	0.69 / 0.13	0.77	0.06	0.25 / 0.03	0.23
max	1.00	1 / 0.55	0.69	0.91	1 / 0.52	0.84	0.19	1 / 0.14	0.26
sd	0.12	0.12 / 0.13	0.01	0.20	0.1 / 0.12	0.02	0.04	0.2 / 0.03	0.01
ε_p^c	0.99	0.99 / 1.82	1.00	1.28	0.97 / 3.09	1.00	2.29	0.39 / 4.37	1.00

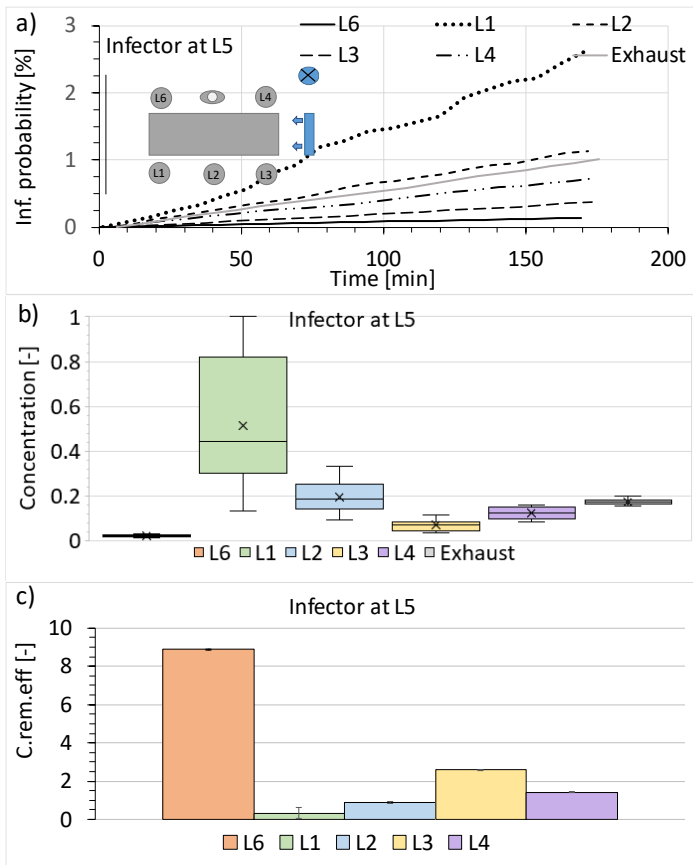
4.2.2.4 Kuusi henkilöä, lämpökuorma 60 W/m²

Kuva 37 esittää tilannetta, jossa infektoitunut on työpisteellä L4 ja huoneen sisäisten lämpökuormien painopistettä on siirretty pöydän ympärille siten, että jokaisessa työpisteessä on henkilöä jäljittelevä lämpömalli. Tässä tapauksessa huoneessa on 60 W/m² lämpökuorma ja ilmanvaihto on syrjäyttävä. Tulosten perusteella suurin konsentraatio oli työpisteellä L1 ja pienin työpisteellä L6. Konsentraation vaihteli etenkin työpisteillä L1 ja L2 runsaasti. Epäpuhtauksien poistotehokkuus oli suurimmillaan hiukan yli 2 työpisteellä L6 ja pienimmillään n. 0,5 työpisteellä L1 muiden kolmen työpisteen asettuessa aika tasaisesti näiden väliin. Infektioriski oli työpisteellä L1 selvästi suurin, hieman yli 2 %, kun muualla pysyttiin selvästi alle yhden prosentin.



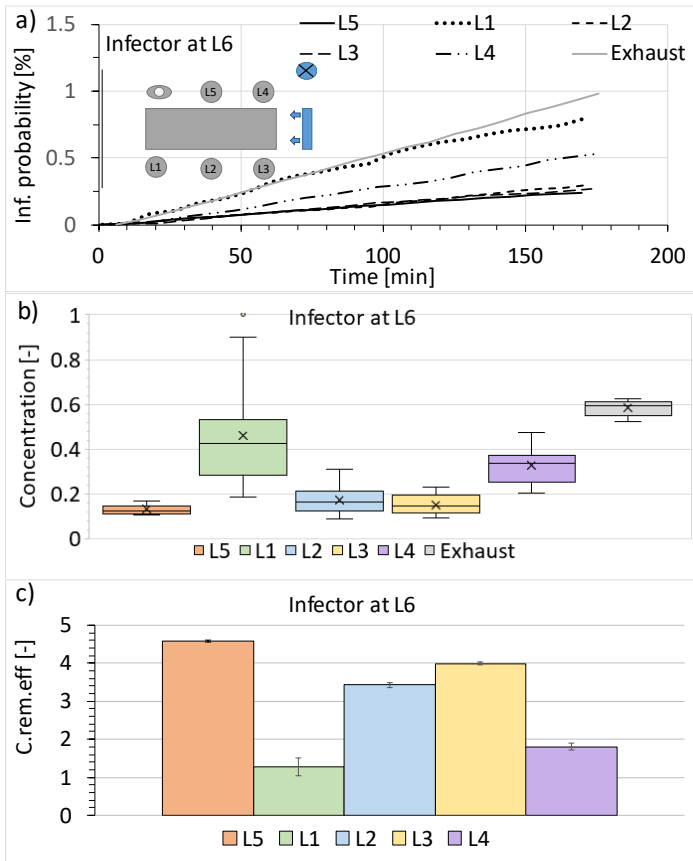
Kuva 37. Mittaustuloksia syrjäyttävällä ilmanjaolla, kun infektioitunut on työpisteellä 4, altistuvia on kaikilla muilla työpisteillä ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 60 W/m^2 : a) Infektioriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtausien poistotehokkuus.

Kuva 38 esittää tilannetta, jossa infektioitunut on työpisteellä L5 ja huoneen sisäisten lämpökuormien painopistettä on siirretty pöydän ympärille siten, että jokaisessa työpisteessä on henkilöä jäljittelevä lämpömalli. Tässä tapauksessa huoneessa on 60 W/m^2 lämpökuorma ja ilmanvaihto on syrjäyttävä. Tulosten perusteella suurin konsentraatio oli työpisteellä L1. Pienin konsentraatio mitattiin tässäkin tapauksessa työpisteeltä L6. Konsentraation vaihtelu oli työpisteellä L1 suurta, mutta muualla maltillista. Epäpuhtausien poistotehokkuudessa työpiste L6 oli selkeästi paras lähes 9:n lukemalla, kun huonoin paikka L1 jäi alle 0,5:n. Infektioriski oli työpisteellä L6 oli vain 0,2 % luokkaa, kun työpisteellä L1 oltiin 2,5 % tuntumassa.



Kuva 38. Mittaustuloksia syrjäyttävällä ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä 5, altistuvia on kaikilla muilla työpisteillä ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 60 W/m²: a) Infektoriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtausien poistotehokkuus.

Kuva 39 esittää tilannetta, jossa infektoitunut on työpisteellä L6 ja huoneen sisäisten lämpökuormien painopistettä on siirretty pöydän ympärille siten, että jokaisessa työpisteessä on henkilöä jäljittelevä lämpömalli. Tässä tapauksessa huoneessa on 60 W/m² lämpökuorma ja ilmanvaihto on syrjäyttävä. Tulosten perusteella suurin konsentraatio oli poistoilmassa eli tässä tilanteessa ilmanvaihto toimi varsin hyvin. Pienin konsentraatio mitattiin työpisteeltä L5 infektoituneen vierestä. Konsentraation vaihtelu oli työpisteellä L1 suurta, mutta muualla maltillista. Epäpuhtausien poistotehokkuus oli erinomainen työpisteillä L5 (4,5), L3 (4,0) sekä L2 (3,5), ja heikoin työpiste (L1) pääsi yli yhden. Infektoriski oli vastaavasti kaikkialla pieni; huonoimmillaan työpisteellä L1 0,75 % ja parhaillaan työpisteillä L2,L3 sekä L5 0,25 % luokkaa.



Kuva 39. Mittaustuloksia syrjäyttävällä ilmanjaolla, kun infektoitunut on työpisteellä 6, altistuvia on kaikilla muilla työpisteillä ja huoneen sisäinen lämpökuorma on 60 W/m^2 : a) Infektioriskin kehittyminen ajan suhteen. b) Työpisteiden konsentraatio. c) Paikallinen epäpuhtauksien poistotehokkuus.

Taulukko 21 esittää dimensiottoman konsentraation (0...1) tuloksista laskettuja tilastollisia muuttujia altistuneiden hengitysvyöhykkeellä sekä poistoilmassa, kun infektoitunut on työpisteillä L4, L5 tai L6. Tuloksista nähdään, että keskimääräinen konsentraatio oli vertailutyöpisteellä L1 suunnilleen samalla tasolla kaikissa tapauksissa. Ainoastaan silloin, kun infektoitunut oli työpisteellä L6, työpisteen L1 konsentraatio oli pienempi kuin poistoilman. Tällöinkin pitoisuuden vaihtelu oli merkittävää ja suurimmillaan pitoisuus oli suurempi kuin poistossa.

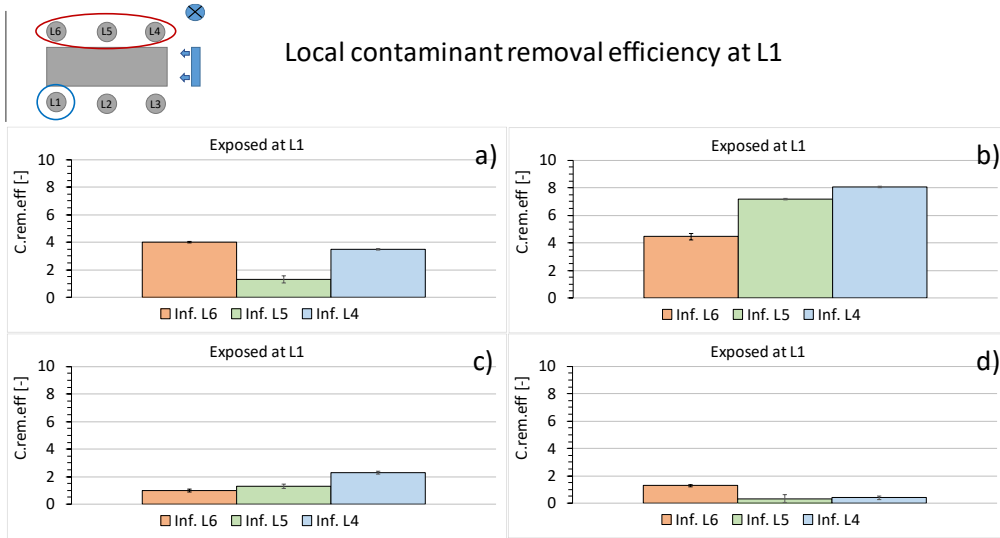
Taulukko 21. Konsentraatio vertailutyöpisteellä L1, suurimman (max) ja pienimmän (min) konsentraation työpisteellä sekä poistoilmassa (Ex). Infektoitunut on työpisteellä L4, L5 tai L6. Syrjäyttävä ilmanjako, lämpökuorma 60 W/m², kuusi henkilöä huoneessa, tilastollinen arvojoukko 14 mittausarvoa.

C [-]	L1 (ref)	L1(max) /L5(min)	Ex.	L1 (ref)	L1(max) /L6(min)	Ex.	L1 (ref)	L1(max) /L6(min)	Ex.
infect.	L6	L6	L6	L5	L5	L5	L4	L4	L4
avg	0.46	0.46 / 0.13	0.59	0.51	0.51 / 0.02	0.17	0.62	0.62 / 0.1	0.25
min	0.19	0.19 / 0.1	0.52	0.13	0.13 / 0.01	0.15	0.33	0.33 / 0.02	0.21
max	1.00	1 / 0.17	0.63	1.00	1 / 0.03	0.20	1.00	1 / 0.87	0.26
sd	0.24	0.24 / 0.02	0.03	0.28	0.28 / 0.01	0.01	0.19	0.19 / 0.22	0.01
ϵ_p^c	1.28	1.28 / 4.58	1.00	0.33	0.33 / 8.9	1.00	0.40	0.4 / 2.43	1.00

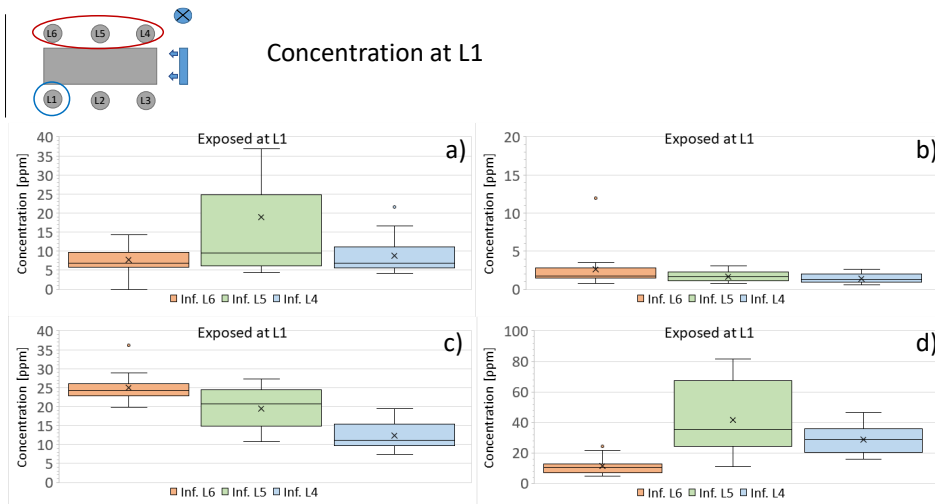
4.2.2.5 Eri lämpökuormien ja henkilömäärien vertailu

Kuva 26 on esitetty epäpuhtauksien paikallinen poistotehokkuus referenssityöpisteellä L1 eri lämpökuormilla ja henkilömäärillä infektoituneen henkilön ollessa työpisteellä L4, L5 tai L6. Kuvasta huomataan, että henkilömäärän kasvattaminen heikentää epäpuhtauksien poistotehokkuutta selkeästi. Lämpökuorman kasvattaminen puolestaan parantaa tilannetta kahden henkilön tapauksessa, mutta kuuden henkilön tapaus isommalla lämpökuormalla on selvästi heikoin kaikista.

Kuva 27 esittää absoluuttiset merkkiainekonsentraatiot vastaavista testitapauksista ja siitä voidaan nähdä, että syrjäyttävä ilmanjako toimii selvästi parhaiten tilanteessa, jossa huoneessa on vain kaksi henkilöä ja lämpökuorma (+ ilmavirta) ovat suuret. Henkilömäärän kasvattaminen puolestaan kääntää tilanteen päällelleen ja kaikkein suurimmat pitoisuudet työpisteellä L1 mitattiin silloin, kun infektoitunut oli työpisteellä L5, huoneessa kuusi henkilöä ja lämpökuorma suuri.



Kuva 40. Paikallinen epäpuhtauksien poistotehokkuus, syrjäyttävä ilmanjako: a) Huoneessa kaksi henkilöä, lämpökuorma 38 W/m². b) Huoneessa kaksi henkilöä, lämpökuorma 60 W/m². c) Huoneessa kuusi henkilöä, lämpökuorma 38 W/m². d) Huoneessa kuusi henkilöä, lämpökuorma 60 W/m².



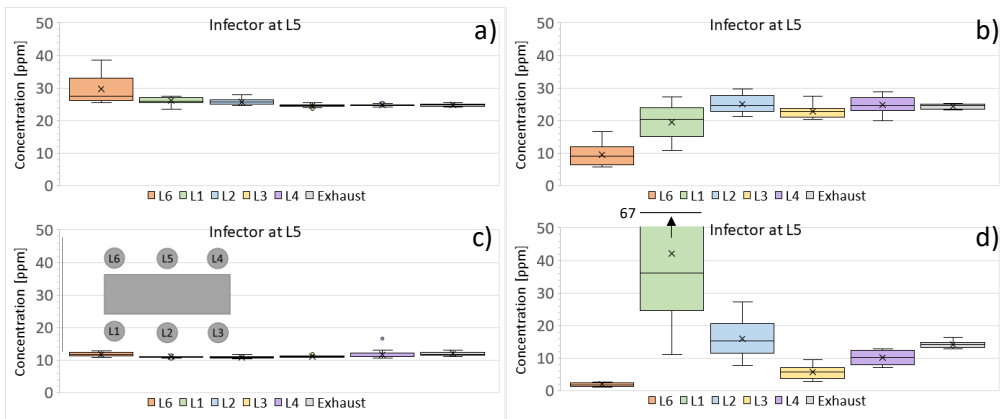
Kuva 41. Konsentraatio altistuvan hengitysvyöhykkeellä työpisteellä L1, syrjäyttävä ilmanjako: a) Huoneessa kaksi henkilöä ja lämpökuorma 38 W/m². b) Huoneessa kaksi henkilöä ja lämpökuorma 60 W/m². c) Huoneessa kuusi henkilöä ja lämpökuorma 38 W/m². d) Huoneessa kuusi henkilöä ja lämpökuorma 60 W/m².

4.2.3 Yhteenveto

Tutkimuksessa tarkasteltiin merkkiainemittausten avulla, miten tilan lämpökuorma, henkilömäärä ja sairaan henkilön sijainti vaikuttavat epäpuhtaustasoihin ja tätä kautta infektorisikiin eri puolilla tilaa. Sairasta mallintavan nuken merkkiainesyöttö pidettiin samana kaikissa mittauksissa. Kuva 42 on esitetty kootusti merkkiainepitoisuudet eri työpisteillä kuuden henkilön testitapauksissa kahdella eri ilmanjaolla (sekoittava, syrjäyttävä) sekä kahdella eri lämpökuormalla (38 W/m^2 , 60 W/m^2) sairaan henkilön ollessa työpisteellä L5.

Kuvasta voidaan havaita, että molempien ilmanjakojen tapauksessa suuremmalla lämpökuormalla oli pienemmät pitoisuudet, mikä selittyy suuremmalla ilmamäärällä. Sekoittavalla ilmanjaolla pitoisuudet olivat melko tasaiset eri puolilla huonetta, joten ilma oli hyvin sekoittunut. Syrjäyttävällä ilmanjaolla vaihtelua oli huomattavasti enemmän etenkin suuremman lämpökuorman (ja ilmamäärän) tapauksessa. Tällöin pöydän oven puoleisessa päädyssä olevat tuloilmalaitteesta kauimpana sijaitsevat työpisteet erottuivat selvästi muista. Pisteessä L6 pitoisuus oli hyvin pieni, kun taas pisteessä L1 huomattavasti suurempi kuin missään muualla. Henkilömäärällä (ei kuvassa) ei sekoittavan ilmanjaon tapauksessa ollut pitoisuustasoihin suurta vaikutusta, kun taas syrjäyttävän ilmanjaon kohdalla henkilömäärän kasvattaminen lisäsi sekä keskimääräisiä pitoisuuksia että niiden vaihtelua.

Yhteenvetona tuloksista voidaan todeta, että sekoittavalla ilmanjaolla epäpuhtausten hallinta on huomattavasti helpompaa kuin syrjäyttävällä, mutta jos syrjäyttävä ilmanjako on hyvin toteutettu, sillä voidaan päästä pienempiin pitoisuuksiin ainakin osassa huonetta. Tämän tutkimuksen mittauksissa pahin tilanne todettiin suurella (60 W/m^2) lämpökuormalla kuuden henkilön tapauksessa työpisteellä L5, kun käytössä oli syrjäyttävä ilmanjako ja sairaan henkilö oli työpisteellä L4 (Kuva 34). Tällöin infektorisiki kolmen tunnin altistumisen jälkeen oli lähes 4 % eli lähes kaksikymmenkertainen verrattuna parhaisiin testitapauksiin. Muutkin pahimmat yksittäistapaukset olivat syrjäyttävällä ilmanjaolla, joten sitä käytettäessä tulisi olla tarkkana ilmavirtojen suuntauksen kanssa.



Kuva 42. Konsentraatio altistuvan hengitysvyöhykkeellä, huoneessa 6 hlö: a) Sekoittava ilmanjako, lämpökuorma 38 W/m^2 . b) Syrjäyttävä ilmanjako, lämpökuorma 38 W/m^2 . c) Sekoittava ilmanjako, lämpökuorma 60 W/m^2 . d) Syrjäyttävä ilmanjako, lämpökuorma 60 W/m^2 .

5. Virusmittaukset

5.1 Menetelmät

Virusmittauksissa tehtiin kolme koetta käyttäen MS2-bakteriofagia. Alun perin suunnitelmissa oli tehdä virusmittauksia Otaniemessä samassa koehuoneessa kuin aerosolimittaukset, mutta lopulta kaikki kokeet toteutettiin Itä-Suomen yliopiston Kuopion kampuksella, jotta kerätyistä viruksista mahdollisimman suuri osa säilyisi elinkykyisinä analyysiä varten. Kokeessa 1 selvitettiin virusaerosolin tuoton tasaisuutta kahden tunnin generoinnin aikana sekä 1-2 vrk:n säilytyksen vaikutusta virusten elinkykyyn. Kokeessa 2 tarkasteltiin virusaerosolin pitoisuutta ja leviämistä huonetilassa ilmanvaihdon ollessa päällä. Kokeessa 3 puolestaan tutkittiin huoneilmanpuhdistimen vaikutusta viruspitoisuuteen ilmanvaihdon ollessa päällä. Kokeissa 2 ja 3 mallinnettiin tilannetta, jossa sairas ihminen on huoneessa ja viruspitoisuus kasvaa ilmanvaihtuvuuden mukaiseen tasapainotilanteeseen.

5.1.1 Virusaerosolin tuotto

Ilmavälitteisen taudinaiheuttajan malliksi valittiin yleisesti indikaattoriviruksena käytetty MS2 -bakteriofagi, joka infektoi *E. coli*-bakteeria (ATCC 15597). Steriiliin veteen laimennettua virussuspensiota (pitoisuus $2,1 \times 10^9$ #/ml, V=25 ml) generoitiin Collison Nebulizerilla (BGI, Inc., USA) (Kuva 43) dynaamisessa koejärjestelyssä ilmavirtaukseen ilmanvaihtokanavaan (Koe 1) ja tutkimustiloihin 1 ja 2 (Kokeet 2 ja 3) $6 \text{ dm}^3/\text{min}$ tilavuusvirralla. Generaattorin virussuspensio vaihdettiin tuoreeseen 1,5–2 tunnin välein.



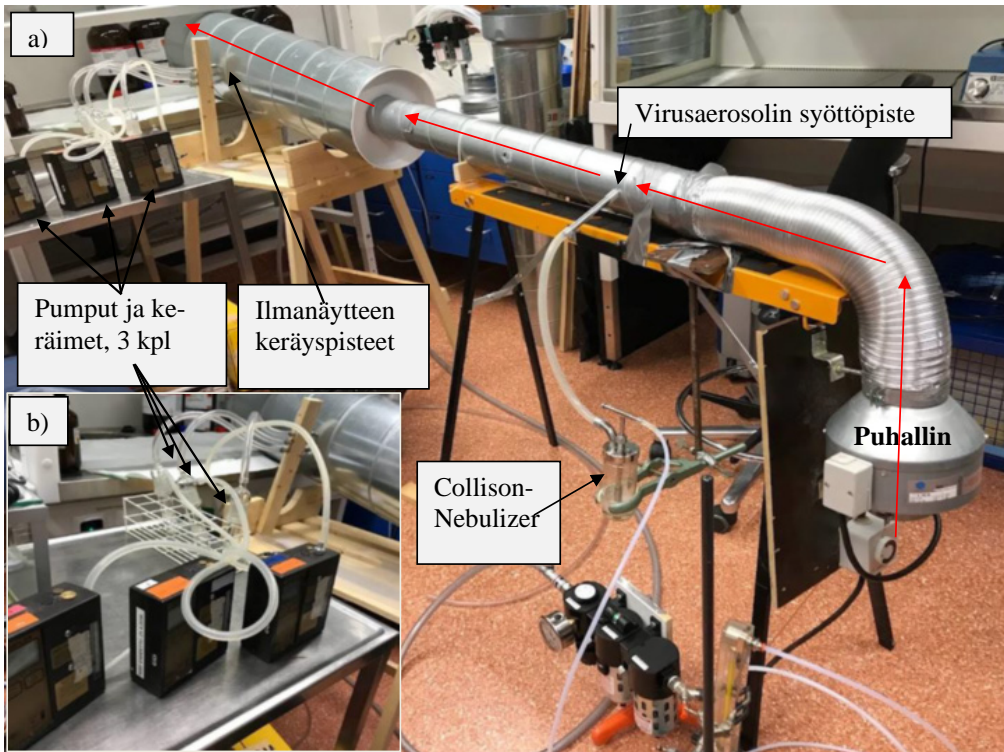
Kuva 43. Collison Nebulizer (https://chtechusa.com/Manuals/MRE_Collison_Manual_MESA.pdf).

5.1.2 Viruspitoisuuden määrittäminen

Viruksenäytteet kerättiin ilmasta Impinger- tai BioSampler-keräimillä fosfaattipuskuriin. Tartuttavien virusten pitoisuus (plakkia muodostavaa yksikköä/m³ ilmaa, pfu/m³) analysoitiin kaksikerrosagar-tekniikalla kahtena tai kolmena rinnakkaisena. Termostoituihin (48 °C) faagi-THG-pehmeäagarputkiin lisättiin 1,0 ml näytettä, 0,1 ml TTC-liuosta ja 0,2 ml logaritmisessa kasvuvaiheessa olevia *E. coli* (ATCC 15597) -isäntäbakteereja. Putken sisältö valettiin faagi-THG-kova-agarmaljalle, ja hyyytyneitä viljelmiä inkuboitiin 37 ±1 °C:ssa yön yli. Inkuboinnin jälkeen laskettiin *E. coli* (ATCC 15597) -kasvustoon muodostuneiden plakkien eli bakteriofagivirusten tekemien aukkojen lukumäärät ja laskettiin tutkimustilan bakteriofagitiheys (pfu/m³).

5.1.3 Koe 1: viruksen tuotto ja säilytyksen vaikutus elinkykyyn

Virusta generoitiin Collison Nebulizerilla (ks. luku 5.1.1) halkaisijaltaan 100 mm ilmanvaihtokanavaan ja ohjattiin laajempaan halkaisijaltaan 250 mm kanavaan (Kuva 44 a ja b). Putken alku- eli tulopäähän asennettiin 100 mm kanavapuhallin, jolla generoitu virusaerosoli ohjattiin kulkemaan putkessa eteenpäin pienellä 8,7–10,7 dm³/s tilavuusvirralla. Putken poistopää sijoitettiin vetokaappiin, jolla estettiin viruksen leviämistä tutkimustilaan.



Kuva 44. a) Virusaerosolin generointi- ja keräysjärjestelmä. Punaiset nuolet kuvaavat ilman virtausta puhaltimen kautta putken poistopäähän, ja b) lähikuva keräyspumpuista ja Impinger-keräimistä (3 kpl).

Näytteet kerättiin kolmesta rinnakkaisesta pisteestä hyödyntäen putkeen asennettuja metallisia lämpivientejä, joilla näytteet saatiin kerättyä isokineettisesti putken sisältä. Keräys toteutettiin Impinger-keräimillä generoinnin alussa ($T_0 = 5\text{--}10$ min), tunti generoinnin aloituksesta (T_1) sekä kaksi tuntia generoinnin aloituksesta (T_2), jotta saatiin tietoa tuotetun virusaerosolin pitoisuuden säilymisestä tasanaisena generoinnin aikana ja tarpeesta vaihtaa tuore virussuspensio generointiin, mikäli pitoisuus laskee generointiajan funktiona. Näytteenkeräysaika oli 45 minuuttia $1\text{ dm}^3/\text{min}$ tilavuusvirralla, jolloin näytetilavuudeksi saatiin 45 dm^3 . Generointi näytteenottoineen toistettiin kolmena eri päivänä (G1.1, 1.2 ja 1.3).

Eri aikapisteistä otetut näytteet viljeltiin (ks. luku 5.1.2) näytteenottopäivänä ($t = 0$ vrk), seuraavana päivänä, kun näytteitä oli säilytetty yön yli jääkaapissa ($t = 1$ vrk) ja kun näytteitä oli säilytetty kaksi vuorokautta jääkaapissa ($t = 2$ vrk) seuraavasti:

- **Generointi 1 ja 3:** Kaikki näytteet t_0 , t_1 ja t_2 viljeltiin generointipäivänä ($t = 0$ vrk). Lisäksi tunnin generoinnin jälkeen otettu näyte (t_1) säilytettiin jääkaapissa ja viljeltiin 1 ja 2 vuorokauden säilytyksen jälkeen.
- **Generointi 2:** Kaikki näytteet t_0 , t_1 ja t_2 viljeltiin generointipäivänä ($t = 0$ vrk) ja yhden ja kahden vuorokauden säilytyksen jälkeen.

5.1.4 Koe 2: Virusaerosolin pitoisuus ja leviäminen huonetilassa ilmanvaihdon ollessa päällä

Koe suoritettiin Itä-Suomen yliopiston Snellmania-rakennuksen pukuhuoneen suihkutilassa ($V = 30,1\text{ m}^3$) ilmanvaihdon ollessa päällä (IV-kerroin $4,6\text{ 1/h}$). Virusta generoitiin Collison Nebulizerilla (ks. luku 5.1.1) tilaan 1 h ajan pitoisuuden tasaamiseksi ennen ensimmäistä näytteenottoa. Näytteet kerättiin saman aikaisesti kolmesta pisteestä A, B ja C (Kuva 45) 45 minuutin ajan Impinger-keräimillä, jotka oli kytketty samaan pumppuun. Keräinten tilavuusvirta oli $1\text{ dm}^3/\text{min}$, jolloin kerätyn ilmanäytteen tilavuudeksi saatiin 45 dm^3 . Generointi näytteenottoineen toistettiin kolme kertaa saman päivän aikana (G2.1, 2.2 ja 2.3).



Kuva 45. Suuntaa antava kuva koejärjestelystä. Näytteenottopisteet A, B ja C ovat keskellä kuvaa kolmella jalustalla ja viruksen tuotto Collison Nebulizerilla kuvan etualalla.

5.1.5 Koe 3: Ilmanpuhdistimen vaikutus viruspitoisuuteen huoneessa ilmanvaihdon ollessa päällä

Koe suoritettiin 30.11.22 ja toistettiin 7.12.2022 Itä-Suomen yliopiston Snellmania-rakennuksen laboratoriossa SN4415 ($V = 34,3 \text{ m}^3$) ilmanvaihdon ollessa päällä ($Q = 161 \text{ m}^3/\text{h}$, IV-kerroin 4,7 1/h). Virusta generoitiin Collison Nebulizerilla (ks. luku 5.1.1) tilaan 110 minuuttia. Kun pitoisuus saavutti halutun tason, Collison Nebulizerin virussuspensio vaihdettiin tuoreeseen ja generointia jatkettiin 30 min ennen ensimmäistä näytteenottoa. Tilan ilmaa sekoitettiin pöytätuulettimella, jotta varmistettiin ilman täydellinen sekoittuminen.

Näytteet kerättiin BioSampler-keräimellä ($12,5 \text{ dm}^3/\text{min}$, 15 min, $V=187,5 \text{ dm}^3$) ensin ilman ilmanpuhdistinta ($t=140 \text{ min}$) (Näyte 1). Tämän jälkeen ilmanpuhdistin (LAS302 Smart Air Purifier + sterilizer) kytkettiin etänä päälle ($t=148 \text{ min}$) ja näyte 2 kerättiin, kun ilmanpuhdistin oli ollut päällä 30 min ($t=178 \text{ min}$ generoinnin aloituksesta). Näytteet 1 ja 2 haettiin tilasta samaan aikaan ja viljeltiin välittömästi (0 vrk). Tutkimustilan lämpötila oli $21 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ja suhteellinen kosteus 23 %. Puhdistimen teho oli 75 % maksimista ja ilman tilavuusvirtaus $327 \text{ m}^3/\text{h}$.

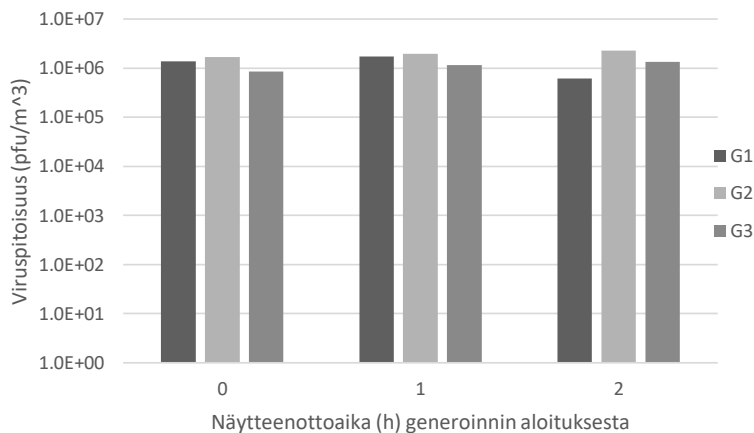


Kuva 46. Koejärjestely. Etualalla oleva tuuletin edisti ilman sekoittumista tilaan, ja kokeessa käytetty ilmanpuhdistin oli sijoitettu virusaerosolin syöttöpisteen ja näytteenottopisteen väliin.

5.2 Tulokset

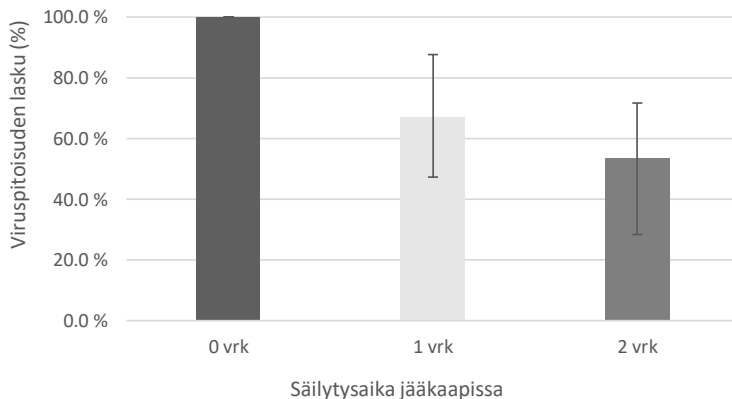
5.2.1 Koe 1

Generoinnin kestolla ei ollut merkittävää vaikutusta viruspitoisuuteen (Kuva 47). Keskimääräinen viruspitoisuus oli generoinnin alussa $1.3 \pm 0.4 \cdot 10^6$ pfu/m³, tunnin generoinnin jälkeen $1.6 \cdot 10^6 \pm 0.4$ pfu/m³ ja kahden tunnin jälkeen $1.4 \pm 0.9 \cdot 10^6$ pfu/m³.



Kuva 47. Virusaerosolin pitoisuus (pfu/m³) kolmen näytteen keskiarvoina tutkimusputkessa 0, 1 ja 2 h generoinnin jälkeen eri generointikerroilla (G1-3). Y-akseli on logaritminen.

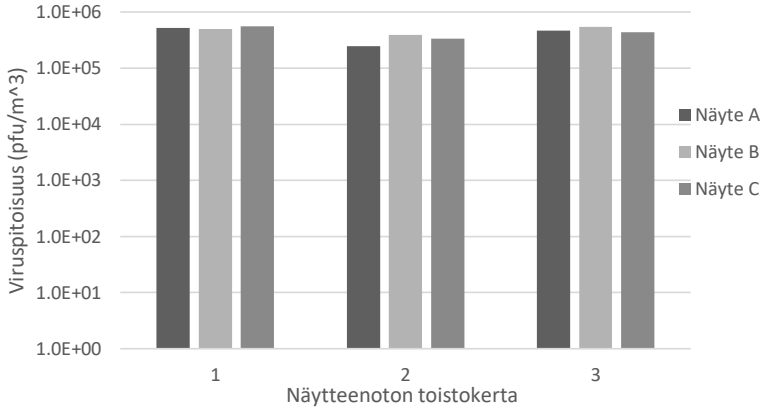
Virusnäytteiden säilyttäminen keräyssuspensiossa jääkaapissa vaikutti kerättyjen näytteiden viruspitoisuuksiin (Kuva 48). Viruspitoisuus laski keskimäärin 67 %:iin alkuperäisestä pitoisuudesta yhden vuorokauden säilytyksen jälkeen. Vuorokauden jälkeen pitoisuudet olivat suurimmillaan 88 % alkuperäisestä, kun taas pienimmillään pitoisuudet olivat 47 % alkuperäisestä. Jääkaappisäilytyksen jatkuessa kahden vuorokauden ajan viruspitoisuudet laskivat keskimäärin 54 %:iin alkuperäisestä pitoisuudesta vaihdellen 28 %:n ja 72 %:n välillä alkuperäisestä pitoisuudesta.



Kuva 48. Viruspitoisuuden keskimääräinen lasku (%) viiden näytteen keskiarvoina vaihteluvälineen yhden ja kahden jääkaapissa säilytetyn vuorokauden jälkeen.

5.2.2 Koe 2

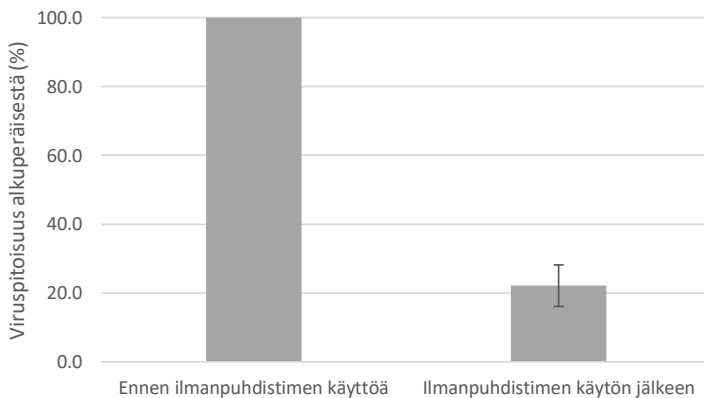
Virusaerosolia pystyttiin tuottamaan suuri, tasainen pitoisuus tutkimustilaan, keskimääräisten pitoisuuksien ollessa ensimmäisellä näytteenotokerralla $5,3 \times 10^5$ pfu/m³, toisella näytteenotokerralla $3,2 \times 10^5$ pfu/m³ ja kolmannella näytteenotokerralla $4,8 \times 10^5$ pfu/m³ (Kuva 49). Myöskään eri näytteenotto pisteiden A, B ja C pitoisuuksissa ei ollut havaittavissa merkittäviä eroavaisuuksia.



Kuva 49. Viruspitoisuudet (pfu/m³) kolmesta eri näytteenotto pisteestä (A–C) kolmena toistona 1–3). Y-akseli on logaritminen.

5.2.3 Koe 3

Tutkimustilan ($V = 34$ m³) ilman viruspitoisuus nousi lukemaan $5,7\text{--}9,7 \times 10^5$ pfu/m³. Kun ilmanpuhdistin oli ollut päällä 30 min, (teho 75 %, $Q = 327$ m³/h), ilman viruspitoisuus laski keskimäärin 78 % ollen $1,0\text{--}2,6 \times 10^5$ pfu/m³ (Kuva 50). Mittaukset tehtiin kahtena eri päivänä.



Kuva 50. Viruspitoisuuden keskimääräinen lasku (%; $n = 2$) 34 m³ tilassa ilmanpuhdistimen ja ilmanvaihdon ollessa päällä.

5.3 Yhteenveto

Itä-Suomen yliopiston tiloissa tehdyt kokeet 1–3 osoittivat, että valitulla menetelmällä voidaan tuottaa huoneilmaan tasaista virusaerosolia ainakin kahden tunnin ajan (Koe 1). Tutkimuksen keston ollessa pidempi, voidaan virustuotto pitää stabiilina vaihtamalla Collison Nebulizerin virussuspensio tuoreeseen vähintään kahden tunnin välein.

Koe 1 osoitti myös Collison Nebulizerilla ilmaan tuotetun ja Impinger-keräimillä kerätyn viruksen elinkyky heikkenee, jos virussuspensiota joudutaan säilyttämään viileässä 1–2 vuorokauden ajan ennen analysointia. Bioaerosolin tuottamis- ja keräysprosessit ja huoneilmassa leijuminen ovat stressaavia biologisille hiukkasille ja voivat mm. vähentää niiden selviytymistä (mm. Hogan Jr ym. 2005).

Kokeessa 2 tuotettiin virusta n. 30 m³ tilaan, jossa oli ilmanvaihto päällä. Tulosten mukaan käytetyllä Collison Nebulizer- generaattorilla saadaan tuotettua suuri ja tasainen (10⁵ pfu/m³) viruspitoisuus ilmanvaihdolliseen tilaan. Lisäksi Impinger-keräin 1 dm³/min tilavuusvirralla ja 45 minuutin keräysajalla osoittautui soveltuvaksi keräysmenetelmäksi kokeen 2 tutkimustilassa vallinneisiin olosuhteisiin.

Kokeessa 3 selvitettiin ilmanpuhdistimen vaikutusta huonetilan viruspitoisuuksiin, kun tilan ilmanvaihto (IV-kerroin 4,7 1/h) on päällä. Koe osoitti, että n. 34 m³ tilan viruspitoisuus vähenee noin 78 % käytetyn ilmanpuhdistimen (LAS302 Smart Air Purifier + sterilizer) tehoasetuksen ollessa 75 %.

6. Ilmanvaihdon ja ilmanpuhdistuksen tehokkuus

6.1 Johdanto

Huoneilman virtausmallinnuksella (CFD, Computational fluid dynamics) voidaan tuottaa lisätietoa mitatun tiedon tueksi. Tietokonesimuloinnilla huoneilman virtauskentästä saadaan yksityiskohtainen kuva, kun taas mittauspisteitä on yleensä vain muutamasta kohdasta huonetilaa. Periaatteena huonevirtauskentän simuloinnissa on se, että aluksi luodaan matemaattinen malli, joka luonnehtii annettua fysikaalista ilmiötä huonetilassa. Matemaattiseen malliin sisällytetään tärkeimmät huonevirtauksiin vaikuttavat tekijät, joten malliin on tehty yksinkertaistuksia verrattuna todellisuuteen. Matemaattinen malli muodostetaan osittaisdifferentiaaliyhtälöistä, jotka kuvaavat fysikaalisten suureiden muutosta säilymisyhtälöissä (Pantakar, 1980). Näitä yhtälöitä ovat esimerkiksi massan, liikemäärän ja energian säilymisyhtälöt sekä skalaarien kuljetusyhtälöt. Tilojen sisäilman virtauskenttää on mallinnettu esimerkiksi monikomponenttivirtauksena, joka sisältää ilmaa, vesihöyryä ja hiilidioksidia. Virtausdynamiikassa ulkoisten voimien vaikutus on olennaisia, koska ne ohjaavat virtauselementtien liikettä (Ferziger and Peric, 2002). Virtauskenttä on jaettu erillisiin pisteisiin, joissa laskentamallista muodostettuja yhtälöitä lasketaan. Ajasta riippuvassa laskennassa yhtälöissä on myös aikatermi, jolloin virtauskenttää lasketaan aika-askelilla. Laskennan tuloksena saadaan virtauskenttä annetuilla reuna- ja alkuehdoilla. Tuloksen luotettavuutta pystytään parantamaan, kun reuna- ja alkuehdoissa käytetään mitattua tietoa. Lisäksi laskentatulokset on hyvä validoida mittauksiin avulla. 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 on käytetty tehdyissä virtaussimuloinneissa.

Taudinaiheuttajien ilmapölyisyydessä pienhiukkaset ovat vallitsevia (Ai et al., 2020) ja aerosolin koko on merkittävä tekijä yleensä yli 10 μm :n hiukkasilla (Chen and Zhao, 2010). Periaatteessa aerosolien mallinnuksessa voidaan käyttää partikkelimalleja Eulerian tai Lagrangian lähestymistavalla tai erilaisilla yhdistelmillä (Chen et al., 2010; Dai and Zhao, 2022). Silloin virtauskenttää mallinnetaan monifaasivirtauksena, mikä monimutkaistaa laskentaa. Turbulenttisen virtauksen monifaasilaskenta vaatii tiheän laskentahilan ja pienen aika-askelen, jotta fysikaalisten suureiden suuret erotusomäärät ja pienen mittakaavan virtaukset saadaan riittävän tarkasti mallinnettua. Näitä edellä mainittuja virtausmekaniikan ilmiöitä ovat esimerkiksi pisaroiden hajoaminen, niiden törmäilyt ja haihtuminen (Sheikhnejad et al., 2022). Esimerkiksi Chen and Zhao (2010) ja Zhang and Chen (2006) käyttivät simuloinneissaan Lagrangian menetelmää, kun taas Holmberg and Li (1998), Lai and Cheng

(2007) ja Gao et al. (2008) käyttivät Eulerian menetelmää. Zhang and Chen (2006) saivat ajasta riippuvassa tilanteessa jossain määrin parempia tuloksia Lagrangian-mallilla kuin Eulerian-mallilla laskettuna, mutta ajasta riippumattomassa tapauksessa molemmat mallit tuottivat kohtuullisia tuloksia. Drift-flux-partikkelimallista (Eulerian-menetelmä) on monia mainintoja kirjallisuudessa. Drift-flux mallissa otetaan huomioon partikkelin nopeus, joka kiihtyy tai hidastuu jonkun muun kuin konvektiovoiman (ilman liike) avulla eli käytännössä gravitaatio- tai diffuusiovoimilla (Lai and Cheng, 2007). Drift-flux mallin etuna on, että siihen voidaan sisällyttää useita eri hiukkaskokoja (Holmberg and Li, 1998; Murakami et al., 1992).

Aiemmissa tutkimuksissa on kuitenkin todettu, että pienet hiukkaset voidaan mallintaa passiiviskalaareina (passive scalar), jotka kulkeutuvat ilmavirran mukana (Zhao et al., 2009; Murakami et al., 1992), mikä yksinkertaistaa laskentaa. Partikkelimallit voivat kuitenkin olla tarpeellisia, jos hiukkasten pinnoille kertymisestä (deposition) tulee merkittävä tekijä tarkasteltavassa alueessa. Tällainen tilanne voisi olla esimerkiksi silloin kun tarkastellaan kapeaa ikkuna- tai ovirakoa (Ai et al., 2020) tai silloin kun ilmanvaihto huonetilassa on pientä (Holmberg and Li, 1998). Sen vuoksi passiiviskalaarit voivat olla monessa suhteessa varsin kohtuullinen valinta toimistoympäristön aerosolien ilmajälkitteilyyden mallinnukselle. Skalaarien kuljetusyhtälönä voidaan tällöin käyttää esimerkiksi konvektio-diffusio-yhtälöä, joka ottaa huomioon ilmavirran mukana kulkeutumisen ja pitoisuuseroja tasoittavan diffuusion, jotka ovat periaatteessa tärkeimmät tekijät huoneilman pitoisuusjakauman muodostumisessa. Virtauslaskentaan voidaan myös yhdistää tartuntariskiä kuvaavia yhtälöitä kuten Wells-Riley-yhtälö (Qian et al., 2009).

6.2 Menetelmät

6.2.1 CFD-simulointi

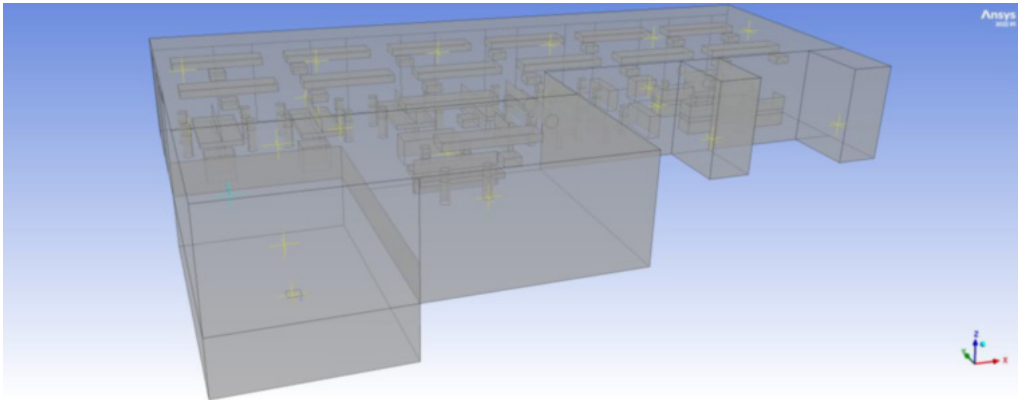
CFD-simuloinneissa käytettiin ANSYS ICEM CFD-ohjelmistoa (ANSYS, 2019a) tilageometrian ja laskentaverkon muodostamisessa. Testitapausten laskentamallit ja reunaehdot määritettiin ANSYS CFX-ohjelmistolla (ANSYS, 2019c), jolla myös tehtiin virtauskentän numeerinen laskenta. Tulosten jälkikäsittelyssä käytettiin ANSYS CFD-Post-ohjelmistoa (ANSYS, 2019b). Mallinnuksessa käytettiin ajasta riippumatonta RANS-simulointia (Reynolds-Averaged Navier-Stokes simulation), jossa virtauskenttä aikakeskiarvoistetaan. 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. Tulosten esittämisessä käytettiin aiemmissa tutkimuksissa esitettyjä visualisointikeinoja (Chen and Srebric, 2002; Nielsen ym., 2007; Chen, 2009; Li ja Nielsen, 2011; Nielsen, 2015; Zhu et al., 2022).

6.2.2 Avotoimiston CFD-malli

Kuva 511 esittää avotoimistotilan CFD-simulointimallia. CFD-malli tehtiin koekohteen pohjakuvien ja leikkauskuvien perusteella. Avotoimiston pitkä ikkunajulkisivu oli itään. Avotoimiston ilmanvaihtojärjestelmä oli sekoittava ilmanjako kattovyöhykkeeltä, jolloin kaksi poistoilman

päätelaitetta oli laitettu avotoimiston sisävyöhykkeelle. Tarkasteltavan alueen ilmanvaihto oli 640 L/s. Huoneessa on 16 tuloilmalaitetta, joiden ilmavirta on 40 L/s per laite. Avotoimiston pinta-ala oli noin 320 m², jolloin ilmanvaihdon tuloilmavirta oli 2,0 L/m². Huoneessa on kaksi poistoilmalaitetta (390 L/s ja 250 L/s). Toimistorakennuksen lämmitys ja jäähdytys hoidettiin säteilypaneeleilla.

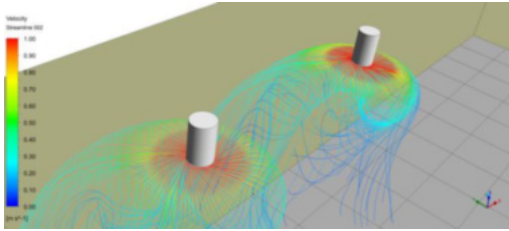
Avotoimistotilan oleskeluvyöhykkeen kalusteet muodostuivat pääasiassa erilaisista pöytäryhmistä, tuoleista ja hyllyköistä. Avotoimistotilassa oli neljä pöytäryhmää neljälle henkilölle tilan pohjoispuolella (Kuva 511, vasen puoli). Lisäksi tilan keskivyöhykkeellä oli kolme kahden hengen pöytää ja kolme yhden hengen pöytää. Sen lisäksi avotoimiston eteläpäädyssä oli kaksi kolmen hengen pöytää (Kuva 511, oikea puoli). Tarkasteltavan alueen työpisteiden kokonaismäärä oli siten 31, jolloin ilmanvaihdon tuloilmavirta oli 20 L/s per henkilö. Lisäksi avotoimiston pohjoispuolen nurkkauksessa on avointa tilaa alempaan kerrokseen.



Kuva 51. Avotoimiston CFD-malli.

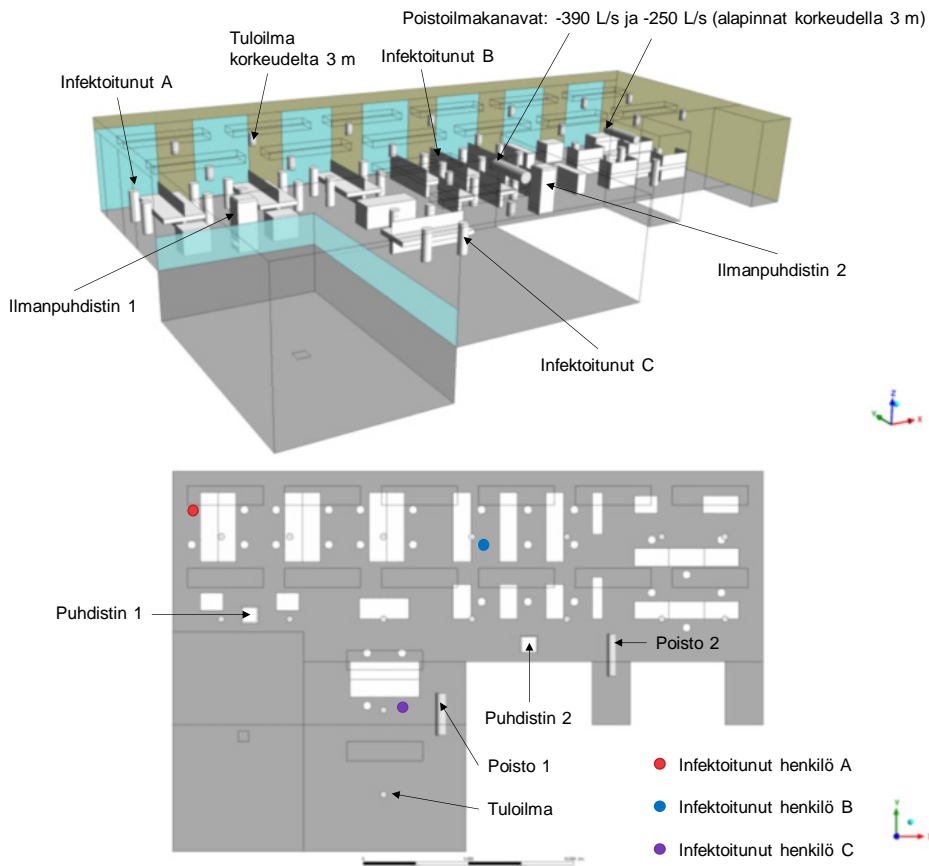
CFD-mallin laskentaverkko muodostui tetraedrinmuotoisista elementeistä. Lisäksi pintojen lähellä oli prismanmuotoisista elementeistä tehty seinämätihennys. Laskentahilan kokoluokka oli noin 10-20 cm ilmatilavuudessa ja tätä pienempiä elementtejä oli virtausesteiden, lämmönlähteiden, tuloilmasuihkujen ja ihmismallien kohdalla, jossa fysikaalisten suureiden derivaattojen arvot saattoivat kasvaa muuta ilmatilavuutta suuremmaksi.

Seinämien reunaehtoina käytettiin tyypillisiä lämmityksen ja jäähdytyksen välikauden lämpötiloja, jossa hyödynnettiin koekohteessa mitattua tietoa. Laskennan avotoimistossa oletuksena oli, että tulo- ja poistoilmalaitteiden massavirrat olivat tasapainossa, eikä huonetila ollut yli- tai alipaineinen ympäröiviin tiloihin nähden. Tuloilmalaitteiden reunaehtoina käytettiin Halton Oy:n tuloilmalaitteiden nopeusreunaehtoja, jotka perustuvat mitattuun tietoon. Poistoilmalaitteissa varmistettiin todenmukainen massavirta laskennan aikana, jolloin nopeusreunaehtoien aiheuttama massavirran muutos korjattiin tuloilmalaitteisiin vastaavasti. Päätelaitteen (Kuva 52) halkaisija oli 300 mm, puhallusaukon korkeus 1,5 cm, tuloilman tilavuusvirta 40 L/s, tuloilman lämpötila 18°C ja tuloilman pyöreäkulma 53° verrattuna puhalluspinnan normaalikomponenttiin. Huoneilman lämpötila oli 23°C.



Kuva 52. Ilmanjaon tuloilman päätelaitteena käytetyn pyörrevirtahajottajan tuloilman virtaviivat huonetilaan.

Avotoimiston paikallista epäpuhtauspitoisuuden konsentraatiota tarkasteltiin infektoituneen kolmella eri sijainneilla, siten että tilassa oli kuitenkin kerrallaan yksi infektoitunut henkilö. Avotoimistossa oli yhteensä 31 työpistettä. Kuva 53 esittää infektoituneen henkilön kolme eri sijaintikohtaa, pöytäryhmät sekä ilmanjaon ja huoneilman puhdistimet. Taulukko 22 puolestaan esittää avotoimiston lämpökuormat sekä ilmanjakolaitteiden ja ilmanpuhdistuksen toimintaparametrit.



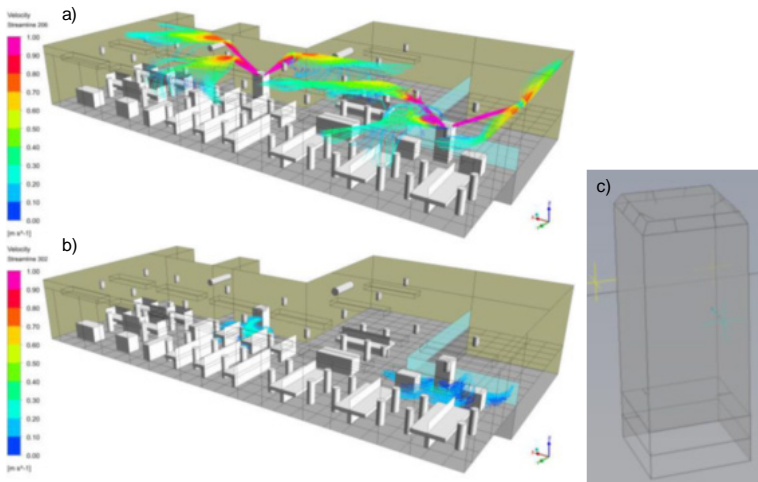
Kuva 53. Infektoituneiden henkilöiden, pöytäryhmät sekä tuloilma (16 kpl) - ja poistolaitteiden (2 kpl) sekä ilmanpuhdistimien (2 kpl) sijainnit.

Taulukko 22. Avotoimiston lämpökuormat ja ilmanvaihdon toimintaparametrit. Tilassa on sekoittavat kattohajottajat ja säteilypaneelit. Tarkasteltavan alueen pinta-ala on 323 m² ja tilavuus 1294 m³ kun huonekorkeus on 4 m. Taulukon suureiden epävarmuus on noin ±5 %.

Lämpökuorma	Lämpökuorma	Lämpökuorma	Ilmanvaihto	Ilmanvaihto	Ilmanvaihto
Henkilö, 31 kpl	2,5 kW	7,7 W/m ²	Henkilötiheys	31 kpl	0,1 hlö/m ²
Monitori, 31 kpl	1,6 kW	4,8 W/m ²	Tuloilma	640 L/s	2,0 L/s,m ²
tietokone, 31 kpl	1,6 kW	4,8 W/m ²	T_tuloilma	18 °C	
Valaisin, 10 kpl	0,9 kW	2,8 W/m ²	T_huone	23 °C	
Ikkuna	1,6 kW	4,9 W/m ²	ACH (h=4 m)	1,78 1/h	
			Jäähdytys, ilma	-3,9 kW	-12,0 W/m ²
Jäähd.paneeli_ T_tulo	17,0 °C		Ilmanpuhdistin	2x320 L/s	suodattaa 90%
Jäähd.paneeli T_meno	17,7 °C		Jäähdytyspaneelit	14 kpl	
Vesijähd_qm_vesi	0,1 kg/s		Jäähdytyspaneeli	-4,2 kW	-13,0 W/m ²
Lämpöteho yht.	8,1 kW	25,0 W/m²	Jäähdytys yht.	-8,1 kW	-25,0 W/m²

Jokaisen huoneessa olevan henkilön uloshengityksen tilavuusvirta oli 6 L/min ja uloshengitysilman lämpötila oli 35°C. Infektoituneen henkilön mallinnus tehtiin siten, että taudinaiheuttajien dimensioton konsentraatio oli infektoituneen uloshengityksessä 1 ja puhtaassa ilmassa 0 (massaosuus $x = \{0...1\}$ [kg/kg]). Näin ollen konsentraation suhteellinen muutos infektoituneen lähiympäristössä esitetään suoraan simulointituloksesta. Avotoimiston geometriset mitat olivat varsin suuret, jolloin henkilöitä jäljittelevien lämpömallien halkaisijaltaan noin 1 cm:n suuaukon geometrinen mallintaminen ei ollut käytännöllistä sylinterinmuotoisessa henkilöä kuvaavassa virtuaalilämpömallissa. Sen sijaan henkilön lämpömalliin tehtiin suurempi, halkaisijaltaan 3 cm:n suuaukko, jolloin hengitysilman nopeus suuaukossa on pienempi kuin todellisuudessa. Sen vuoksi hengitysilman nopeus kiihdytettiin lisättyllä liikemäärälähteellä oikeaan suuruusluokkaan (~1 m/s) suuaukon edessä. Tämä yksinkertaistus katsottiin sopivaksi stationääritilanteen simuloinnissa. Henkilön tuottama lämpöteho 80 W mallinnettiin lämpövuona sylinterin pinnassa. Tietokoneiden ja näyttöjen lämpöteho laitettiin tasaisesti pöydän yläpintaan ja vastaavasti ikkunasta tuleva lämpövirta ikkunaa mallintavaan pintaan. Valaisimet ja jäähdytyspaneelit mallinnettiin kattovyöhykkeelle, jolloin ne toimivat samalla todellisuutta vastaavina virtausesteinä.

Huoneilmanpuhdistimet (ulkomitat 0,8 x 0,8 x 2,0 m³) mallinnettiin siten, että niissä kierrätettävä huoneilman kokonaisilmavirta (2x320 L/s) oli yhtä suuri kuin ilmanvaihdon ilmavirta 640 L/s. Puhdistimen ilman sisäänottoaukko oli särmiönmuotoisen geometrisen mallin juuressa ja puhtaan ilman puhallus toteutettiin särmiön yläosasta 3-suuntaan. Puhallus oli lisäksi käännetty 30 astetta yläviistoon pystysuoraan tasoon nähden (Kuva 54).



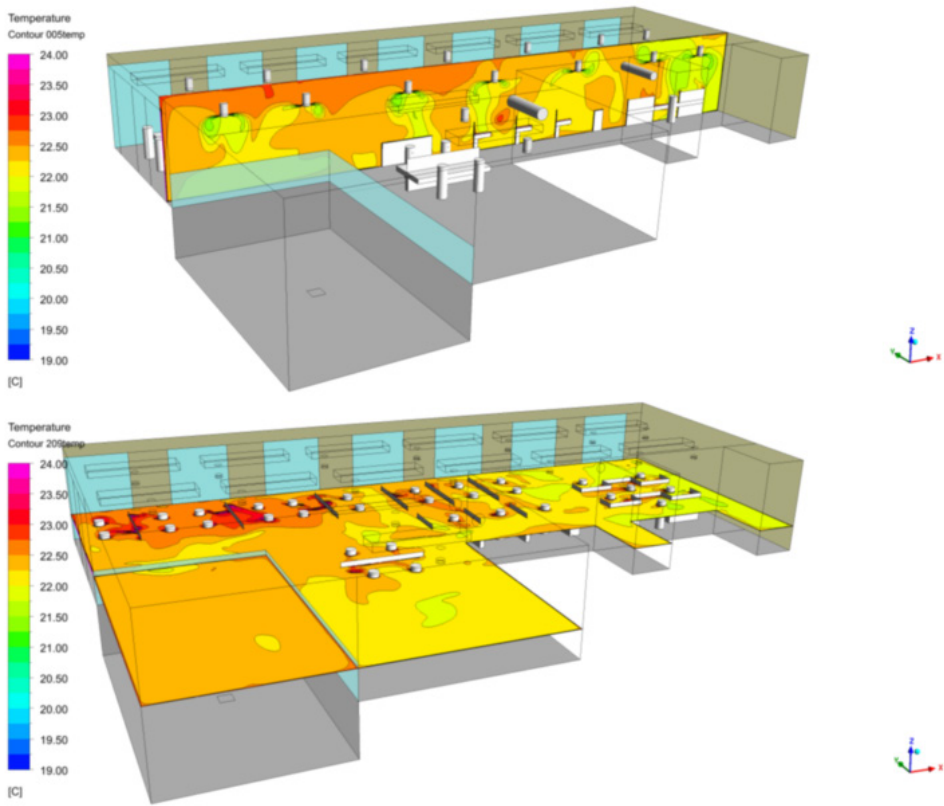
Kuva 54. Ilmanpuhdistimien toimintaperiaate ilmanliikkeen virtaviivoilla esitettynä: a) Puhtaan ilman puhallus 3-suuntaan. b) Huoneilman sisäänotto puhdistimen alaosasta. c) Huoneilmanpuhdistimen CFD-malli.

6.3 Infektioriski avotoimistossa

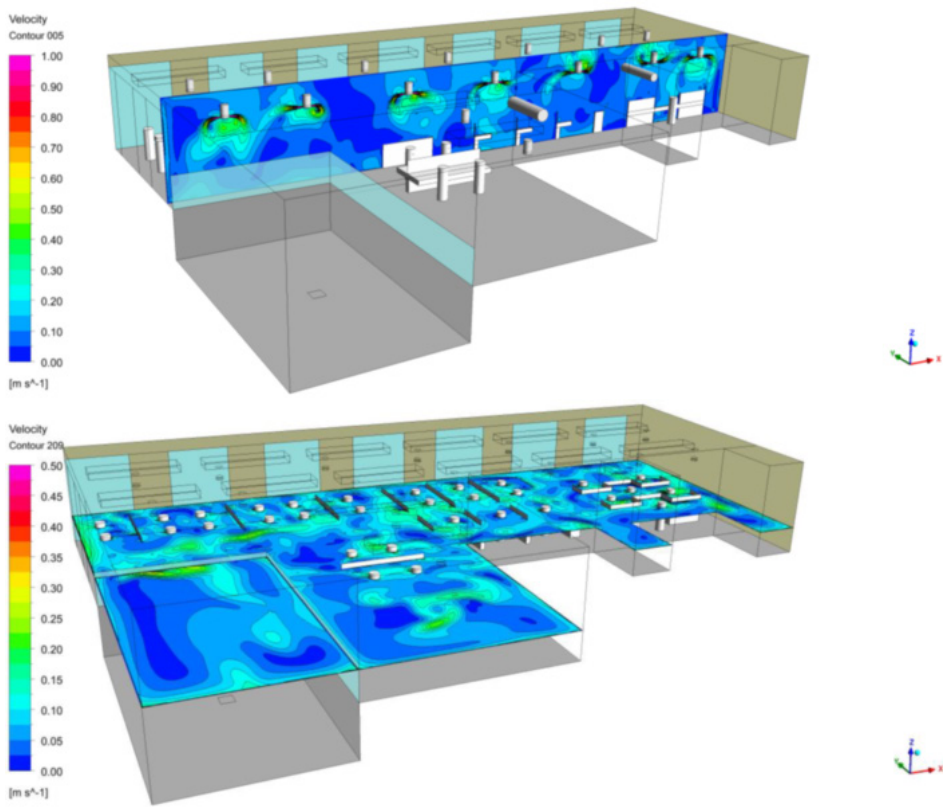
Infektoituneesta henkilöstä hengityksen kautta tapahtuvaa epäpuhtauspitoisuuden leviämistä simuloitiin. Tällä tutkittiin, kuinka pitoisuus vaihteli eri kohdassa avotoimistoa. Simuloinnissa infektoitunut henkilön sijainti oli kolmessa eri kohdassa toimistoa (kulmassa lähellä ikkunaseinää, keskellä ikkunaseinän puolella ja käytävän puolella lähellä kohdepoistoa). Tarkastelussa epäpuhtauksia poistettiin pelkästään perusilmanvaihdon avulla tai sitten tehostetusti ilmanvaihdon lisäksi yhdessä ilmanpuhdistimen avulla.

6.3.1 Lämpö- ja nopeusolosuhteet

Avotoimiston huoneilman lämpötilat pysty- ja vaakaleikkaukskohdissa esitetään kuvassa 55, josta on nähtävissä se, että tila on hyvin sekoittunut ja huoneilman lämpötila on varsin tasainen 22-23 °C koko oleskeluvyöhykkeellä. Ainoastaan lähellä ikkunaseinää, jossa on suurempi henkilötiheys, huoneilman lämpötila on hieman yli 23 °C ja vastaavasti käytäväalueella, jossa on vähän henkilöitä, huoneilman lämpötila on hieman alle 22 °C. Lisäksi ilman nopeudet oleskeluvyöhykkeellä ovat varsin pieniä (<0,15 m/s) ja ne täyttävät parhaan sisäilmaluokan vaatimukset (kuva 56). Voidaankin todeta, että simuloidussa tapauksessa tuloilmalaitteiden suihkut ja tilassa olevien lämmönlähteiden konvektiovirtaukset eivät aiheuta erityisen voimakasta virtauskenttää, joilla olisi vaikutusta epäpuhtauksien leviämiseen huonetilassa.



Kuva 55. Ilman lämpötila pysty- ja vaakapinnalla (h=1,1 m).

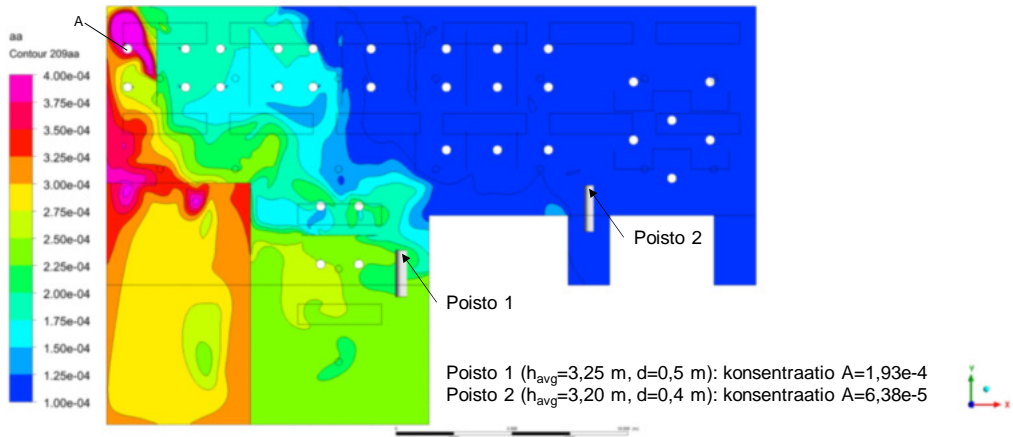


Kuva 56. Ilman nopeus pysty- ja vaakapinnalla ($h=1,1$ m).

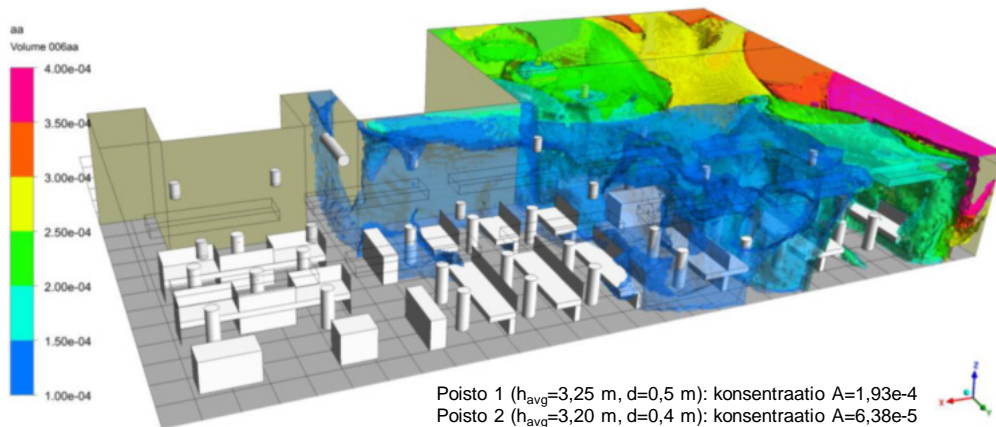
6.3.2 Epäpuhtauksien leviäminen perusilmanvaihhdolla

Kuvassa 57 esitetään epäpuhtauskenttä, kun infektoitunut henkilö (A) sijaitsee avotoimiston kulmassa ensimmäisessä rivissä ikkunaseinä puolella. Tarkastelukorkeudeksi on valittu 1,1 m, joka edustaa toimistossa istuvan henkilön hengitysvyöhykettä. Uloshengityksen tasoa suurempi konsentraatio (0,035 %) yltää maksimissaan 1,3 m päähän infektoituneesta henkilöstä, joka vastaa varsin hyvin yleisesti esitettyä 1,5 m suojaetäisyyttä henkilöiden välillä. Lisäksi sivuseinän puolella, jossa ei ole henkilöitä, esiintyy muuta toimistoa selvästi suurempia konsentraatiotasoja. Syynä tähän huonetilan virtauskenttä, joka kääntää tässä kuormitustilanteessa henkilöstä lähtevän epäpuhtausvirtauksen sivuseinälle.

Huomattava on, että oikeanpuoleisessa avotoimistossa epäpuhtauspitoisuus ei nouse ja suurempia pitoisuuksia esiintyy ainoastaan poistokohdan 1:n vasemmalla puolella. Epäpuhtauksien leviäminen infektoituneen henkilön (A) kanssa ilmatilavuudessa on nähtävissä kuvassa 58, josta selvästi havaitaan keskimääräisesti pienempi pitoisuus ikkunaseinän lähellä olevissa työpisteissä kuin käytäväseinän puolella. Ilmatilavuutta havainnollistavasta kuvasta havaitaan myös, että osa epäpuhtauksista leviää leikkaustason 1,1 m yläpuolelle keskivyohtyöhykkeelle, mutta kuitenkin poistuu sitten toisella puolella avotoimistoa olevasta poistosta (poisto 2), jonka pitoisuus on huomattavasti poistoa 1 pienempi.

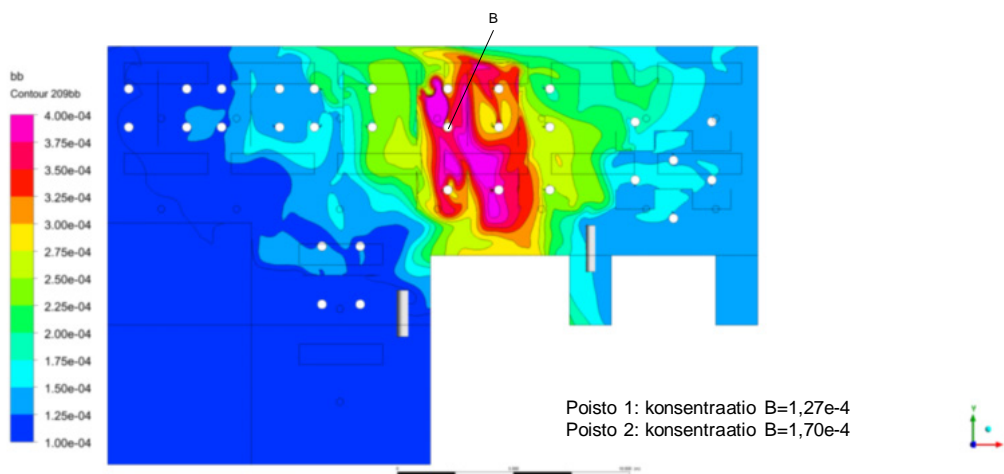


Kuva 57. Infektoituneen henkilön A aiheuttama konsentraatiojakauma korkeudella 1,1 m.

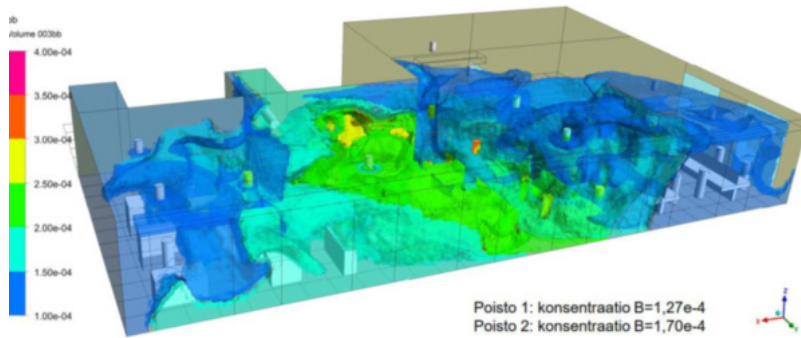


Kuva 58. Infektoituneen henkilön A aiheuttama konsentraatiojakauma avotoimiston ilmatilavuudessa.

Kuvassa 59 esitetään epäpuhtauskenttä, kun infektoitunut henkilö (B) sijaitsee avotoimiston keskiosassa toisessa rivissä ikkunaseinän puolella. Oloshengityksen tasoa suurempi konsentraatio (0,035 %) esiintyy keskialueella suhteellisen laajalla alueella. Keskialueella olevat henkilöt, jotka istuvat ikkunaseinän 1.-3. rivissä noin 3 m etäisyydellä, ovat suuren pitoisuuden vyöhykkeessä. Suuren konsentraation kenttä jää poistokohtien 1 ja 2 väliin ja pitoisuus molempien sivuseinien läheisyydessä on selvästi pienempi. Poistoissa 1 ja 2 pitoisuustasot ovat suhteellisen lähellä toisiaan. Lisäksi vasemmalla käytävän puolella kaukana ikkunaseinästä pitoisuudet ovat hyvin pienet. Tämä on myös selvästi havaittavissa konsentraatiokenttää ilmatilavuudessa havainnollistavassa kuvassa 60.

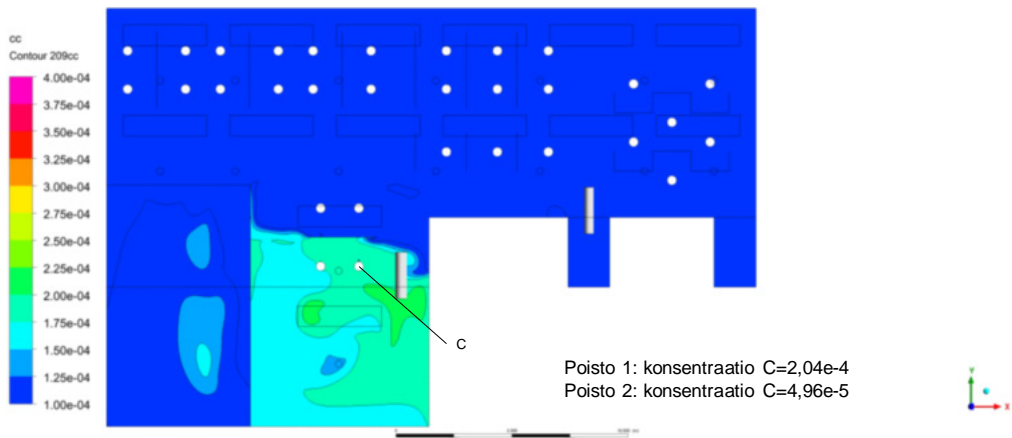


Kuva 59. Infektoituneen henkilön B aiheuttama konsentraatiojakauma korkeudella 1,1 m.

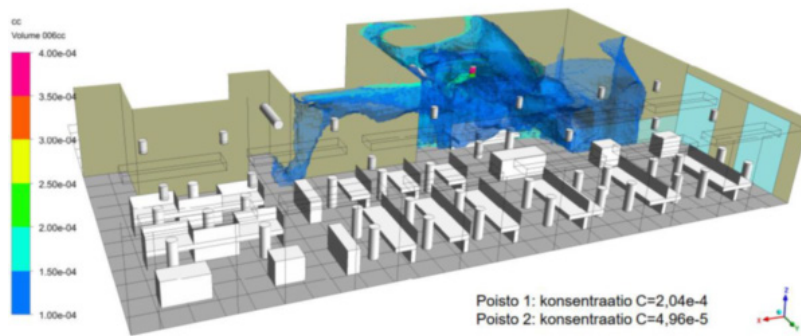


Kuva 60. Infektoituneen henkilön B aiheuttama konsentraatiojakauma avotoimiston ilmatilavuudessa.

Infektoituneen henkilön (C) sijainti poistokohdan 1 läheisyydessä laskee pitoisuuksia koko avotoimiston alueella (kuva 61). Uloshengityksen tasoa suurempi konsentraatio (0,025 %) esiintyy ainoastaan infektoituneen henkilön lähellä olevissa muutamassa työpisteessä. Pitoisuus ikkunaseinän läheisissä työpisteissä on selvästi pienempi. Poistoissa 1 on pitoisuus poistoa 2 selvästi suurempi. Matalat pitoisuudet ja hieman suuremmat pitoisuudet lähellä poistoa 1 ovat nähtävissä kuvassa 62.



Kuva 61. Infektoituneen henkilön C aiheuttama konsentraatiojakauma korkeudella 1,1 m.

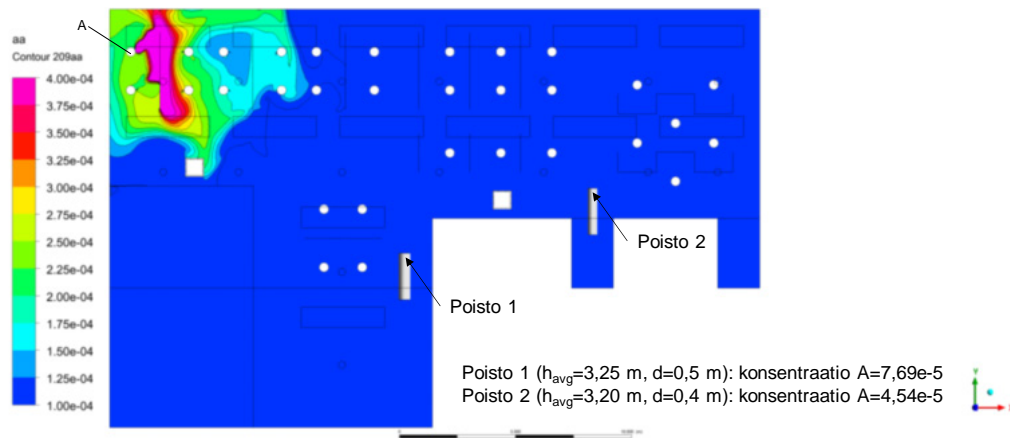


Kuva 62. Infektoituneen henkilön C aiheuttama konsentraatiojakauma avotoimiston ilmatilavuudessa.

6.3.3 Epäpuhtauksien leviäminen perusilmanvaihdon ja ilmanpuhdistimen kanssa

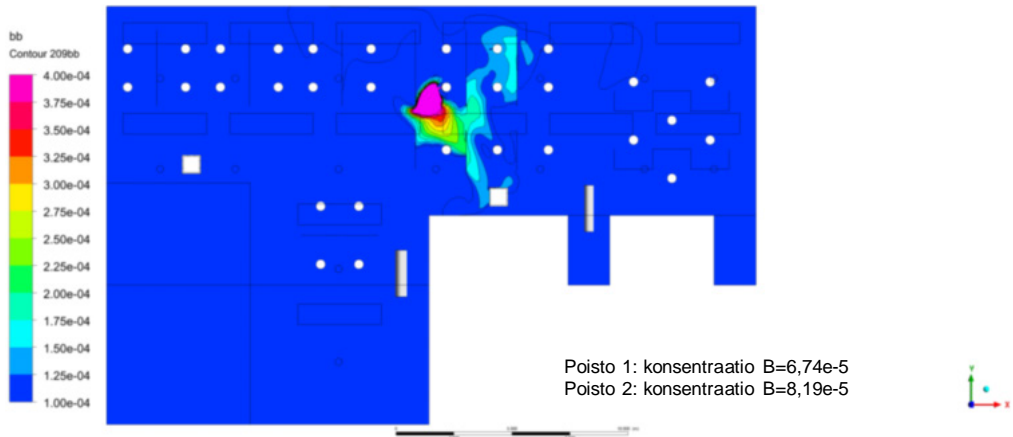
Edellisessä luvussa esitetyt tapaukset simuloitiin myös siten, että huonetilassa oli kaksi ilmanpuhdistinta. Simuloinnissa mallinnettiin markkinoilla oleva ilmanpuhdistin. Useissa suosituksissa on esitetty CADR- arvon 2,5 käyttämistä eli 2,5 kertaa suurempi kiertoilma puhdistimen läpi kuin perusilmanvaihto. Tässä tutkimuksessa huonepuhdistimen ilmavirraksi valittiin kuitenkin sama ilmavirta kuin huonetilan perusilmanvaihto (CADR 1), koska usein CADR- arvon 2,5 käyttäminen ei ole käytännössä mahdollista mm. laitteiden suuren fyysisen koon takia.

Kuvassa 63 esitetään ilmanpuhdistimen vaikutus, kun infektoitunut henkilö (A) sijaitsee avotoimiston kulmassa ja lähin ilmanpuhdistin (puhdistin 1) on noin 10 m etäisyydellä infektoituneesta henkilöstä. Ilmapuhdistimen vaikutuksesta suuren epäpuhtauspitoisuuden alue rajoittuu aivan infektoituneen henkilön lähimpien työpisteiden väliseen alueeseen. Työpisteissä, jotka ovat kaukana infektoituneesta henkilöstä, ovat epäpuhtauspitoisuudet pieniä.



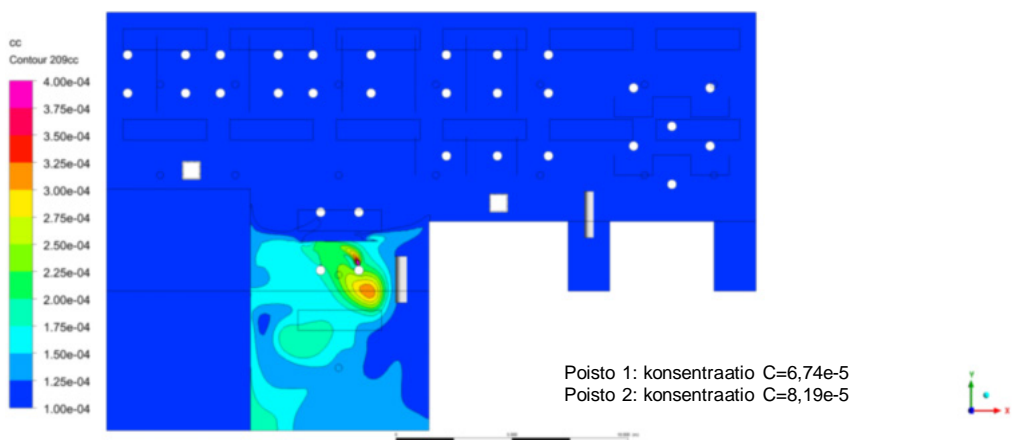
Kuva 63. Infektoituneen henkilön A aiheuttama konsentraatiojakauma korkeudella 1,1 m.

Kuvassa 64 esitetään ilmanpuhdistimen vaikutus, kun infektoitunut henkilö (B) on avotoimiston keskivaiheilla ja lähin ilmanpuhdistin (puhdistin 2) on noin 10 m päässä infektoituneesta henkilöstä. Ilmanpuhdistin rajaa tässäkin suuren epäpuhtauspitoisuuden alueen aivan infektoituneen henkilön läheisyyteen. Toimiston keskivyöhykkeellä suuren pitoisuuden työpisteiden alue pienenee merkittävästi verrattuna tilanteeseen, jossa on käytössä pelkkä perusilmanvaihto.



Kuva 64. Infektoituneen henkilön B aiheuttama konsentraatiojakauma korkeudella 1,1 m.

Kuvassa 65 esitetään ilmanpuhdistimen vaikutus, kun infektoitunut henkilö (C) istuu lähellä poistoilmalaitetta. Tässä tilanteessa ilmanpuhdistimen hyöty on edellisiin tapauksiin A ja B nähden selvästi pienempi. Ilmanpuhdistin rajaa kuitenkin hieman suuren pitoisuuden aluetta pelkkään ilmanvaihdon käyttöön nähden.



Kuva 65. Infektoituneen henkilön C aiheuttama konsentraatiojakauma korkeudella 1,1 m.

6.3.4 Yhteenveto

Simuloituissa tilanteissa, joissa tuloilmasuihkujen ja huonetilassa olevien lämpökuormien synnyttämien konvektiovirtausten vaikutus epäpuhtauksien leviämiseen on pieni, on infektoituneen henkilön sijainnilla huonetilassa merkittävä vaikutus epäpuhtauskenttään. Infektoituneen henkilön sijainti keskellä on hankalin, koska epäpuhtaudet leviävät joka suuntaan sairastuneesta henkilöstä. Kulmassa olevan henkilön epäpuhtauksilla on taipumus levitä seinäpintoja seuraten työpistealueen ulkopuolella. Pienimmät pitoisuudet esiintyvät, kun infektoitunut henkilö on aivan poistopisteen läheisyydessä. Huomattava on myös, että kohdepoistoilla voidaan rajata epäpuhtauksien leviämistä tietylle alueelle, joka on nähtävissä tapauksessa, jossa infektoitunut henkilö oli kohdepoistojen välissä.

Ilmanpuhdistin pienentää huomattavasti taudinaiheuttajien pitoisuutta puhdistimen lähivyöhykkeellä ja näin myös rajaa suuren konsentraation aluetta tehokkaasti. Näin on mahdollista aikaansaada pienempiä konsentraatioita, vaikka ilmanpuhdistimen ilmavirtaa ei olekaan mitoitettu optimaalisesti suurelle ilmavirralle (CADR 2,5). Simuloinneissa CADR- arvolla 1,0 saatiin jo merkittävä vaikutus pitoisuuksien alenemassa.

Työpisteen paikalliset ilmavirtaukset vaikuttavat siihen, mihin taudinaiheuttajien konsentraatio kuluu infektoituneen lähelle. Tällöin sermit ja muut mahdolliset virtausesteet vaikuttavat konsentraation leviämiseen avotoimiston oleskeluvyöhykkeellä. Lisäksi henkilön oma konvektiovirtaus vaikuttaa usein merkittävästi sisäänhengitysilmaan.

7. Toimistotilojen tarpeenmukaisen suojaamisen toimintamalli

Toimintamalli on tarkoitettu toimistorakennusten käyttäjäorganisaatioille ja siinä on esitetty oleellisia toimenpiteitä infektion leviämisen kannalta. Esitetyt toimenpiteet tähtäävät työpisteiden turvalliseen käyttöön. Toimenpiteissä esitetään keinoja, jotka on helppo ottaa käyttöön ilman, että tarvitsee tehdä kiinteitä muutoksia järjestelmiin. Ohessa on listattu toimenpiteet:

1. Noudatetaan THL:n yleisiä suosituksia epidemiatilanteessa.
2. Epidemiatilanteessa tehdään mahdollisuuksien mukaan etätyötä.
3. Työtehtävien mahdollistaessa pidetään taukoja, joiden aikana tila tuuletetaan säännöllisesti, mikäli ikkunatuuletus on mahdollinen.
4. Noudatetaan REHVA:n ja Sisäilmayhdistyksen suosituksia ilmanvaihtojärjestelmien käytöstä ja toiminnan tarkastuksesta epidemiatilanteessa.
5. Jos etätyö ei ole mahdollista, henkilöiden lukumäärä tilassa rajoitetaan siten, että 1,5 m suoja-etäisyydet toteutuvat
6. Em. sijoitus huomioon ottaen henkilöt sijoitetaan ensin poistoilmalaitteen lähelle.
7. Huoneessa seurataan CO₂- pitoisuutta, joka ei saa ylittää 800 ppm, jolloin varmistetaan, että ulkoilmavirta on vähintään 10 L/s per henkilö.
8. Kaikki toimistotilojen käyttäjät käyttävät epidemiatilanteessa hengityssuojainta.
9. Huoneeseen asennetaan ilmanpuhdistin, joka sijoitetaan keskelle tilaan ja mitoitetaan riittävän suurelle ilmavirtasuhteelle (CADR) suhteessa ulkoilmavirtaan. CADR tulisi olla yli 1 ja mieluiten lähellä 2,5.

Edellä esitetyt toimenpiteet tulee ottaa huomioon, kun tilojen käyttöä tarkennetaan epidemiatilanteissa.

8. Pohdinta

8.1 Tulosten merkittävyys ja sovellettavuus lääketieteen kannalta

Vuoden 2020 alussa alkanut koronapandemia on muuttanut tapaamme tehdä töitä ja etätöiden määrä on lisääntynyt. On kuitenkin paljon työtehtäviä, jotka vaativat läsnäoloa ja tapaamisia. Keinot varmistaa turvallinen työskentely toimisto-olosuhteissa ovat tarpeen. Kun tietämys SARS-CoV-2 -viruksen tartuntatavoista on lisääntynyt ja aerosolivälitteisen tarttumisen mahdollisuus todistettu, on tärkeää kiinnittää huomiota työntekijöiden suojaamiseen ilmajälitteisiä taudinaiheuttajia vastaan. Koronavirus ei ole ainoa ilmajälitteisesti leviävä taudinaiheuttaja, vaan sellaisia ovat myös esim. influenssavirukset, *Mycobacterium tuberculosis* (tuberkuloosin aiheuttaja) ja tuhkarokkovirus. On myös oletettavaa, että tulevaisuudessa tulee uusia ilmajälitteisesti tarttuvia taudinaiheuttajia, jotka vaativat suojautumista.

Tarkkaa sairauden aiheuttavaa tartunnanaiheuttajan määrää ilmassa ei monissa ilmajälitteisissä infektioiden tunnetta, mutta tiedetään, että tartuntaan vaikuttaa niin taudinaiheuttajan virulenssi, sairastuneen kyky erittää taudinaiheuttajaa, altistuneen immuunipuolustuksen toiminta kuin kaikki huoneilman taudinaiheuttajan pitoisuuteen vaikuttavat tekijät. Sairastuneen taudin vaikeusaste, sen sijainti keuhkoissa (joista taudinaiheuttajaa erittyy), äänenkäyttö, hengitystaajuus ja erilaiset hengitysteihin liittyvät toiminnot vaikuttavat yksilön erittämään taudinaiheuttajamäärään. Mm. yskiminen, aivastelu ja laulaminen ovat toimintoja, jotka lisäävät merkittävästi ilmaan leviävän aerosolin määrää normaaliin hengitykseen verrattuna.

SUOJAILMA-hankkeessa on selvitelty aerosolivälitteistä tartuntaa erilaisilla mittauksilla toimistoympäristöä vastaavissa olosuhteissa. Laboratorio-olosuhteissa tehdyissä mittauksissa on selvitelty niin pidemmän tilassa oleskelun, hengittämisen ja yskimisen vaikutusta aerosolimäärään. Maskien, ilman-suodattimien ja sermien vaikutusta aerosolin leviämiseen on selvitelty kokeellisesti. Tärkeänä selvityskohteena on ollut ilmanjaon ja lämpökuormien vaikutus aerosolien pitoisuusjakaumaan huoneillassa. Lisäksi on tehty mittauksia viruksilla ja hyödynnetty tietokonesimulointia ilmajälitteisyyden analysoinnissa. Tutkimuksen tarkoituksena on tuottaa tietoa ilmajälitteisiltä tartunnanaiheuttajilta suojautumiseen toimistoympäristöissä.

Tutkijat ovat käyttäneet hengittävää lämpönukkea esittämään niin sairastunutta tartunnanlevittäjää kuin altistunutta. Menetelmä sinällään on mielenkiintoinen ja hyödyllinen ilmajälitteisyyden tutkimisessa. Toisaalta tietokonemallinnuksilla saadaan kattavaa tietoa aerosolin käyttäytymisestä ja jakautumisesta huoneilmaan.

Pienessä toimistohuoneessa, jossa on sekoittava ilmajälite, sermeillä ei ole juurikaan merkitystä hengityksessä vapautuvien aerosolien leviämisen kannalta eli niitä ei voida pitää suojaava antavina muille tilassa työtä tekeville pidempiaikaisessa työtilassa oleskelussa. On kuitenkin huomattava, että sermit

estävät yskimisen yhteydessä pisaroiden leviämisen työpisteiden välillä. HEPA- ja elektronisen suodattimen sisältävä huoneilman puhdistin, jonka kierrätysilmavirta oli 2,5- kertainen tuloilmavirtaan nähden puolitti pitoisuuden. Huonepuhdistimella on käytännön merkitystä työntekijöiden suojaamisessa, mutta sekään ei poista kaikkea taudinaiheuttajaa huoneilmasta. Henkilökohtainen ilmanpuhdistin pienensi pitoisuutta noin 20 %, joten sen suojavaikutus on rajallinen.

FFP2-maskin suojavaikutus oli odotetusti melko hyvä. Ohivuotoa tapahtui kuitenkin herkästi maskin sivuilta. Tämä on tärkeä havainto myös kliinisesti ja käytännön tilanteisiin. Jotta FFP2-maskista olisi hyötyä, pitää se osata pukea tiiviisti. Esimerkiksi terveydenhuollossa vaarallisille taudinaiheuttajille altistuttaessa maskin oikeaoppinen käyttö ja tiiviystestaukset käyttäjille on työsuojelusyistä työnantajan velvollisuutena järjestää. Kun tutkimuksessa maskin reunat teipattiin nukan kasvoihin, suojausteho parani, mutta siltikään se ei ollut sataprosenttinen. Jotta FFP2-maskista saataisiin toimisto-olosuhteissa optimaalinen hyöty, pitäisi sen käyttöä harjoitella ohjatusti.

Tutkittaessa sairastuneen sijoittumista kokouspöydän ympärillä suhteessa altistuvaan, todettiin, että optimaalinen paikka olisi samalla puolella kuin sairastunut, mutta pöydän toisessa päässä. Tällä yksinkertaisella sijoittelulla esim. kahden henkilön lyhytaikaisissa tapaamisissa voidaan saavuttaa suojaa, joka on helposti toteutettavissa eikä lisää kustannuksia.

Yksittäisten yskimistilanteiden tutkiminen antaa tietoa käytännön sovellettavuuteen tilanteissa, joissa sairaalla on yskäoire ja kohtaamiset ovat lyhytaikaisia. Kun sairaalla yskivällä henkilöllä on FFP2-maski, molemmilla (sairas ja altistuva) mikä hyvänsä maski (myös kirurginen suojaa tällöin) tai yskivällä on visiiri tai matala sermi yskivän ja altistuvan välillä pöydällä, saadaan suojavaikutusta. Tällainen suojavaikutus tulee siis tilanteissa, joissa altistus on lyhytaikaista ja huoneilma ei ole vielä sekoittunut. Nämä tiedot ovat käytännön lyhytaikaisiin altistumistilanteisiin hyödyllisiä. Visiiri terveellä altistuvalla ei antanut suojaa eli sen merkitys yksilön suojautumiseksi on hyvin vähäinen. Tämä tärkeä löydös vahvistaa aiempia tietoja.

Tehdyillä tutkimuksilla on lääketieteellistä merkitystä. Ne vahvistavat jo aiemmin tutkittua ja tiedettyä, ja mahdollistavat selkeiden ohjeiden antamisen toimistotyyppisessä työssä altistumisen välttämiseen ja työntekijöiden suojaamiseen. Eri suojaustapojen yhdistäminen on tehokkain keino vähentää aerosolin määrää hengitysilmassa ja siten tartunnan todennäköisyyttä. Mikään yksittäinen keino ei anna täydellistä suojaa, mutta sopivilla suojauskeinoilla voidaan vähentää tartunnan todennäköisyyttä. Tästä huolimatta ei tartunnan mahdollisuus poistu täysin eikä voida varmuudella tietää vaikutusta tietyn taudinaiheuttajan ominaisuuksista johtuvan variaation vuoksi.

8.2 Virusmittausten haasteet

Hankkeessa oli alun perin tarkoitus tutkia infektioriskiä MS2-bakteriofagia käyttäen samassa Aalto-yliopiston koehuoneessa, jossa muutkin mittaukset toteutettiin. Itä-Suomen yliopiston tutkijat tekivät mittauksia Otaniemessä kahteen otteeseen, mutta kummallakin kerralla tuloksissa oli mikrobiologisiin tutkimuksiin liittyvää vaihtelua ja toistojen määrää ei voitu nostaa riittäväksi luotettavien tulosten saamiseksi. Tulosten tarkastelun sekä näytteiden säilytyksen ja kuljetuksen tuomien epävarmuustekijöiden vuoksi kokeet päädyttiin tekemään lopulta Kuopiossa, jotta em. vaihtelu ja mahdollisten virhelähteiden vaikutus saataisiin minimoitua. Viruksilla ja muilla mikrobeilla näytteiden säilyvyys rajoittaa tulosten luotettavuutta, mikäli näytteenoton ja viljelyyn perustuvan analyysin välillä on useita vuorokausia. Näin tulokset eivät välttämättä enää kuvaa mittaushetken tilannetta. Mittausten onnistumisen kannalta on siis tärkeää, että a) tilaan saadaan tuotettua mittaushetkellä riittävän suuri määrä elinkelpoista virusaerolia, b) virusaerolia saadaan kerättyä näytteenottoon riittävästi ja c) näytteiden analysointi saadaan aloitettua ennen kuin niissä olevat viruspopulaatiot

merkittävästi pienenevät. Vaikka kokonaishiukkaspitoisuutta voidaan seurata hiukkaslaskurilla, elinkelpoisten virusten määrää ei pystytä mittaamaan reaaliajassa.

Näytteenottoon ja -käsittelyyn liittyvien seikkojen lisäksi viruksiin perustuvissa mittauksissa on haasteena analyysien toistettavuus. Vaikka koeasetelman kokeet onnistuisivat teknisesti hyvin, viruspitoisuuden määrittämisessä on menetelmistä johtuvaa epävarmuutta ja toistojen jäädessä vähäiseksi epävarmuuden suuruus voi olla kymmenien prosenttien luokkaa. Tästä syystä esimerkiksi samaan aikaan eri paikoista mitattujen virusnäytteiden vertailussa ilmenee pitoisuuseroja. Luonnollisen vaihtelun pystyy suodattamaan pois tekemällä riittävän suuren määrän toistomittauksia, mutta tästä muodostuu puolestaan aikahaaste, sillä yksittäisen viruskokeen tekeminen kestää n. 2–3 tuntia tämän kaltaisessa täyden mittakaavan kokeessa.

8.3 Ilmanvaihdon kehitystarpeet

Henkilöiden keskinäisen etäisyyden ollessa alle 1,5 m tilan perusilmanvaihdon ei voida juuri vaikuttaa aerosolien leviämiseen henkilöiden välillä. Sen sijaan tilan keskimääräiseen epäpuhtauspitoisuuden ilmanvaihdon voidaan vaikuttaa merkittävästi. On kuitenkin huomattava, että ainoastaan keskitetyssä poistossa konsentraatiotaso vastaa keskimääräistä epäpuhtauspitoisuutta, ja suurissa huone-tiloissa epäpuhtauspitoisuuksissa voi olla hyvinkin suuria eroavuuksia eri kohdissa oleskeluvyöhykettä. Tulosten perusteella huoneilman puhdistin ja hengityssuojaimet olivat tehokkaita taudinaiheuttajien suojaamisessa yhdessä tilan perusilmanvaihdon kanssa. Toisaalta esimerkiksi toimistosermillä oli vain vähäinen vaikutus infektoituneen henkilön hengityksestä tulevia aerosoleja vastaan. Sermeillä oli kuitenkin merkittävä vaikutus yskimisen pisarasuihkua vastaan, koska sermi estää pisaroita leviämistä muihin työpisteisiin. Infektoituneen henkilön sijainti huoneessa vaikuttaa siihen, kuinka laajalle alueelle aerosolit leviävät hengityksen välityksellä. Keskellä avointa huonetilaa työskentelevä henkilö levittää aerosoleja laajemmalle alueelle, koska aerosolit voivat levitä vapaammin useampaan suuntaan. Lähellä seinäpintaa työskentelevän henkilön aerosolit leviävät seinäpintojen suuntaisesti, joko yhteen tai kahteen suuntaan. Lisäksi työpisteiden väliset sermit voivat osaltaan ohjata aerosolien leviämistä infektoituneen henkilön lähiympäristössä. Tämän lisäksi huonetilan tuloilmasuihkut, huonetilan painesuhteet ympäröiviin tiloihin nähden ja lämpimien pintojen synnyttävät konvektiovirtaukset vaikuttavat merkittävästi aerosolien leviämiseen. Kaiken kaikkiaan huonetilan virtauskentän tarkka arviointi on useissa tapauksissa vaikeaa ja virtauskenttä voi muuttua ajasta riippuvasti mm. huonetilan henkilömäärän ja jäädytystarpeen mukaan.

Ilmanvaihdon suunnittelussa tuloilmavaihdon lisäksi tulisi miettiä poiston sijoittamista. Epäpuhtauksien tehokkaan poiston kannalta infektoituneen henkilön optimaalinen sijainti on lähellä poistoa. Tällöin epäpuhtaudet voidaan poistaa suurelta osin suoraan kohdepoiston kautta ennen kuin ne pääsevät leviämään huonetilaan. Isoissa avotoimistossa voidaan poistojen sijoittamisella myös rajoittaa epäpuhtauksien leviämistä, ja esimerkiksi kahta poistokohtaa käytettäessä epäpuhtauksien leviämistä voidaan osittain rajoittaa em. mainittujen poistokohtien väliselle alueelle.

Avotoimistossa henkilöiden sijoittamisessa suojaetäisyyden lisäksi tulisi miettiä heidän työpisteiden sijoitusta poistoon ja seinäpintoihin nähden sekä miettiä onko avotoimistotiloissa mahdollista osastoida alueita esimerkiksi poistojen, tuloilmasuihkujen ja painesuhteiden hallinnan avulla. Osastoimalla voidaan rajoittaa suuren konsentraation aluetta vain tietylle halutulle alueelle. Epäpuhtauksien tarkempi hallinta edellyttää henkilökohtaisten laitteiden käyttöä. Paikallisesti henkilökohtaisen tuloilma-

laitteen tai ilmanpuhdistimen avulla voidaan tuoda puhdasta ilmaa hengitysvyöhykkeelle ja näin pienentää merkittävästi infektioriskiä. Tutkittua tietoa löytyy henkilökohtaisten laitteiden toiminnasta, mutta kaupallisia sovelluksia on vielä kovin vähän. Henkilökohtaisten puhtasilmaratkaisujen käyttäminen edellyttää hieman ratkaisuista riippuen ainakin jonkin verran rakenne- ja järjestelmätekniisiä muutoksia, joka voi olla osasyynä kustannuksien lisäksi siihen, että toteutuneita kohteita ei juuri ole. Paikallisten ratkaisujen toiminta saadaan parhaiden varmistettua kiinteissä työpisteissä, kuten esimerkiksi asiakaspalvelupiste. Nykyisin toimistoissa tapahtuu usein muutoksia ja kehitettävien ratkaisujen tulisi myös hyvin soveltua esimerkiksi, kun tilan työpisteiden sijoitusta muutetaan.

9. Yhteenveto ja johtopäätökset

Koronaepidemian aikana ilmajälitteisen altistumisen merkitys on korostunut toimistotyöntekijöillä yhtenä mahdollisena tartuntareittinä. Työsuojelurahaston tutkimushankkeessa tutkittiin laboratoriossa koejärjestelyin ja tietokonemallinnuksella ilmanpuhdistimien, hengityssuojaimien ja ilmanjaon vaikutusta taudinaiheuttajille altistumiseen, kun infektoitunut henkilö levittää joko yskimällä tai hengityksen välityksellä aerosoleja huoneessa. Aerosolien levittämisessä ja niiden vastaanotossa käytettiin yskimiskonetta ja hengittävää lämpönukkea. Ilmajälitteisiä taudinaiheuttajia jäljittelivät MS2-virukset ja parafiiniöljystä muodostetut aerosolit, joilla tutkittiin erilaisten suodatus- ja puhdistusratkaisujen tehokkuutta. Ilmanvaihdon tehokkuutta ja epäpuhtauksien poistotehokkuutta tutkittiin SF6-merkkiaineikaasun avulla.

Tulosten uutuusarvo tulee ilmanjaon ja erilaisten ilmanpuhdistimien ja hengityssuojaimien mitausta suojaustehokkuuksista ilmajälitteisiä taudinaiheuttajia vastaan toimistoympäristössä. Simulointien avulla tarkasteltiin lisäksi, miten infektoituneen henkilön sijainti suhteessa altistuviin henkilöihin vaikutti eri kohdissa huonetta oleviin aerosolipitoisuuksiin. Niin ikään simuloimalla tarkasteltiin ilmanpuhdistimen tehokkuutta avotoimistossa, kun puhdistimen ilmavirta oli yhtä suuri kuin tilan ilmavirta.

Infektoituneen henkilön hengittäessä huoneessa aerosolimittaukset osoittivat, että suodatuksen perustuvat suojausratkaisut (huoneilmanpuhdistin, henkilökohtainen ilmanpuhdistin, erilaiset maskit) olivat tehokkaita ehkäisemään taudinaiheuttajien pääsyä altistuvan henkilön hengitysvyöhykkeelle. FFP2-maski altistuvalla henkilöllä antoi parhaan (n. 60 %) suojaustehokkuuden, mutta tähän päästiin vain eliminoimalla maskin reunavuodot teippaamalla se huolellisesti nukun naamalle. Ilman teippausta suojaus oli 20 %-yksikköä heikompi. Huoneilmanpuhdistin oli myös varsin tehokas hengitettyjä aerosoleja vastaan pienessä neuvotteluhuoneessa ja tarjosi n. 50 % suojaustehokkuuden, kun puhdistimen ilmavirta oli 2,5-kertainen perusilmanvaihtoon nähden. Sekoittavalla ilmanjaolla varustetussa toimistossa virtausesteinä toimivien sermien vaikutus oli varsin vähäinen, alle 10 % luokkaa riippumatta sermien korkeudesta ja määrästä. Altistuvan henkilön istumapaikan vaikutus oli niin ikään vähäinen, joskin n. 20 % suojaus saavutettiin tilanteessa, jossa altistuva ja infektoitunut istuivat samalla puolella pöytää kaukana toisistaan.

Kun infektoitunut henkilö levitti aerosolia hengittämisen sijaan yskimällä, tilanne oli varsin erilainen. Testeissä altistunutta henkilöä mallintava nukke istui yskijää vastapäätä ja käytössä olivat muutoin samat suojausratkaisut kuin hengitystapauksessakin, mutta lisänä oli vielä suojavisiiri. Yskäisyitä vastaan tehokkaita olivat virtauksen kulkua estävät menetelmät eli kasvomaskit, sermit ja visiiri. Paras suojaus saatiin infektoituneen käyttäessä FFP2-maskia, molempien käyttäessä mitä tahansa maskia sekä käyttämällä korkeaa sermiä pöydän keskellä. Matalampi sermi ja infektoituneen käyttämä kirurginen maski tai visiiri suojasivat altistunutta yskimispisaroilta jonkin verran. Maskit ja visiiri yksinomaan altistuvalla henkilöllä eivät suojanneet käytännössä lainkaan, mikä viittaa siihen, että kasvojen eteen päätyneestä yskäisyistä pääsee taudinaiheuttajia hengitysvyöhykkeelle ohivirtauksen kautta. Myöskään ilmanpuhdistimista ei ollut yskimisen kohdalla suoranaista apua, sillä yskäisyiden mukana taudinaiheuttajat päätyvät suoraan suurella nopeudella altistuvan luo, eivätkä puhdistinlaitteet pysty niitä matkalta kaappaamaan.

Merkkiainemittauksissa tarkasteltiin ilmanjaon, lämpökuormien ja henkilömäärän vaikutusta altistumiseen ja epäpuhtauspoistotehokkuuteen. Käytössä oli kaksi eri ilmanjakoa (sekoittava, syrjäyttävä) ja kaksi lämpökuormatasoa (38 ja 60 W/m²). Kokeita tehtiin sekä kahden että kuuden henkilön läsnäoloa mallintavissa tilanteissa. Kummallakin ilmanjaolla suuremman lämpökuorman tapauksissa oli pienemmät merkkiainepitoisuudet, mikä selittyy suuremmalla ilmamäärällä. Sekoittavalla ilmanjaolla pitoisuudet eri puolilla huonetta olivat melko tasaiset, joten ilma oli hyvin sekoittunutta. Henkilömäärä ei sekoittavalla ilmanjaolla juurikaan vaikuttanut pitoisuustasoihin. Syrjäyttävällä ilmanjaolla pitoisuusvaihteluita oli runsaasti etenkin suuremmalla lämpökuormalla. Erityisesti kauimpana tuloilmalaitteesta pöydän päädyssä olevat työpisteet erottuivat muista merkittävästi, ja niistä yhdessä oli tyypillisesti koko huoneen alin pitoisuus, kun taas toisessa oli suurin. Henkilömäärän kasvattaminen aiheutti syrjäyttävän ilmanjaon ollessa käytössä sekä pitoisuuksien kasvua että lisääntyneitä vaihteluja. Koko tutkimuksen suurimmat, ja toisaalta myös pienimmät paikalliset pitoisuudet mitattiin syrjäyttävän ilmanjaon tapauksissa.

Virusmittauksilla oli suunnitelman mukaan tarkoitus tarkastella samantyyppisiä suojausratkaisuja kuin aerosoleilla ja vertailla tuloksia, sillä esimerkiksi osa ilmanpuhdistinten suodatintarvikkeista perustuu elollisten organismien neutraloimiseen ja niiden tehoa ei pysty öljypohjaisella aerosolilla havaitsemaan. Mittauksissa ilmenneiden haasteiden vuoksi päädyttiin MS2-virusella mittaamaan ainoastaan tilanne, jossa käytössä oli huoneilmanpuhdistin. Mittaus tehtiin eri tilassa kuin aerosolimittaukset ja virusmittauksissa tilaan tuotu ilmamäärä (IV-kerroin 4,7 1/h) oli lähes kolminkertainen verrattuna aerosolimittauksiin (1,7 1/h), joten tulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia. Viruskokeessa puhdistimen suodatustehokkuudeksi saatiin n. 78 %, joka oli selkeästi parempi kuin aerosoleilla (50 %). Puhdistimen ilmamäärä oli noin kaksinkertainen tilan ilmanvaihtoon verrattuna.

CFD-simuloinneilla mallinnettiin epäpuhtauspitoisuuksien käyttäytymistä suurehkoissa (320 m²) avotoimistossa, jossa oli kolme infektoitunutta henkilöä. Perustapauksen lisäksi mallinnettiin tapaus, jossa tilassa oli kaksi ilmanpuhdistinta. Puhdistinten yhteenlaskettu ilmavirta oli sama kuin tilan tuloilmavirta eli CADR-luku oli suositellun 2,5:n sijaan 1,0. Mallinnusten tuloksena todettiin, että epäpuhtauspoistuksen kannalta hankalin tilanne on se, jossa infektoitunut henkilö on tilan keskellä. Tällöin epäpuhtaudet pääsevät leviämään vapaasti kaikkiin suuntiin. Infektoituneen ollessa tilan kulmassa epäpuhtaudet lähtevät seuraamaan seinäpintoja työpistealueen ulkopuolella. Paras tilanne oli odotetusti silloin, kun infektoitunut oli hyvin lähellä poistopistettä. Ilmanpuhdistimilla pystyttiin kaikissa tapauksissa rajaamaan suuren epäpuhtauskonsentraation alueen kokoa tehokkaasti ja täten parantamaan tilannetta, vaikka ne olivatkin tilan ilmamäärään nähden alimitoitettuja.

Koko hankkeen tuloksista voidaan johtopäätöksenä todeta, että ilmapöly- ja taudinaiheuttajilta suojautumiseen on olemassa useita tehokkaita keinoja, joita yhdistelemällä saadaan paras lopputulos. Kasvomaskilla pystytään vähentämään tilaan päätyvien taudinaiheuttajien määrää, kun taas ilmanpuhdistimilla kyetään tehokkaasti poistamaan siellä jo olevia tai tilaan syntyviä epäpuhtauksia. Sermit ym. virtausesteet ovat hyviä estämään yskimisen ja aivastamisen myötä ilmaan päätyviä taudinaiheuttajia pääsemästä altistuvan luo. Ilmanjaon merkitystä ei sitäkään sovi vähätellä, vaan järkevällä ilmanvaihdon suunnittelulla epäpuhtaudet pystytään kuljettamaan pois oleskeluvyöhykkeeltä. Ilmanjaon osalta on toisaalta todettava, että väärin toteutettuna se voi myös

pahentaa tilannetta, eli järjestelmän huolellinen testaus ja suunnitellun mukaisen toiminnan toteaminen kaikissa tilanteissa on ensiarvoisen tärkeää.

Julkaisuluettelo

Zhao, W., Kilpeläinen, S., Kosonen, R., Lestinen, S. (2022). Exploring the potentials of micro-environment ventilation in mitigating airborne transmission risk. In proceedings of Indoor air 2022, the 17th International Conference of the International Society of Indoor Air Quality & Climate, June 12th to 16th Kuopio, Finland. Contribution ID: 314.

Lestinen, S., Kilpeläinen, S., Kosonen, R., Pasanen, P. (2022). Human exposure against airborne pathogens in an office environment. In proceedings of Indoor air 2022, the 17th International Conference of the International Society of Indoor Air Quality & Climate, June 12th to 16th Kuopio, Finland. Contribution ID: 172.

Kilpeläinen, S., Lestinen, S., Kosonen, R. Assessment and mitigation of infection risk caused by a coughing person. In proceedings of Roomvent 2022, the 16th Roomvent conference: high performance ventilation for healthy and energy efficient buildings, September 16-19, 2022, Xi'an China.

Lestinen, S., Kilpeläinen, S., Kosonen, R., Pasanen, P. Temporal and spatial aerosol transmission from the exhalation of an infected person in an office environment. In proceedings of Roomvent 2022, The 16th Roomvent conference: high performance ventilation for healthy and energy efficient buildings, September 16-19, 2022, Xi'an China.

Wu, Y., Mustakallio, P., Kosonen, R., Kaukola, T., Chen, J., Liu, H., & Li, B. (2021). Experimental study of five different VAV air terminal devices under variable heat gain conditions in simulated office and meeting rooms. *Building and Environment*, 108641.

Lähdeluettelo

- Aganovic, A., Bi, Y., Cao, G., Drangsholt, F., Kurnitski, J., & Wargocki, P. (2021). Estimating the impact of indoor relative humidity on SARS-CoV-2 airborne transmission risk using a new modification of the Wells-Riley model. *Building and environment*, 205, 108278.
- Aganovic, A., Bi, Y., Cao, G., Kurnitski, J., & Wargocki, P. (2022). Modeling the impact of indoor relative humidity on the airborne transmission of several respiratory viruses risk using a modified Wells-Riley model. In proceedings of CLIMA 2022 conference, Rotterdam, Netherlands.
- Ai, Z., Mak, C. M., Gao, N., & Niu, J. (2020). Tracer gas is a suitable surrogate of exhaled droplet nuclei for studying airborne transmission in the built environment. In *Building Simulation* (Vol. 13, No. 3, pp. 489-496). Tsinghua University Press.
- Ai, Z. T., & Melikov, A. K. (2018). Airborne spread of expiratory droplet nuclei between the occupants of indoor environments: A review. *Indoor air*, 28(4), 500-524.
- Ai, Z., Hashimoto, K., & Melikov, A. K. (2019). Airborne transmission between room occupants during short-term events: Measurement and evaluation. *Indoor air*, 29(4), 563-576.
- Aliabadi, A. A., Rogak, S. N., Bartlett, K. H., & Green, S. I. (2011). Preventing airborne disease transmission review of methods for ventilation design in health care facilities. *Advances in preventive medicine*, 2011.
- Almstrand, A. C., Bake, B., Ljungström, E., Larsson, P., Bredberg, A., Mirgorodskaya, E., & Olin, A. C. (2010). Effect of airway opening on production of exhaled particles. *Journal of applied physiology*, 108(3), 584-588.
- 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.
- Armstrong, T. W., & Haas, C. N. (2007). A quantitative microbial risk assessment model for Legionnaires' disease: Animal model selection and dose-response modeling. *Risk Analysis: An International Journal*, 27(6), 1581-1596.
- Asadi, S., Bouvier, N., Wexler, A. S., & Ristenpart, W. D. (2020). The coronavirus pandemic and aerosols: Does COVID-19 transmit via expiratory particles?. *Aerosol Science and Technology*, 54:6, 635-638, DOI: 10.1080/02786826.2020.1749229.
- Asadi, S., Wexler, A. S., Cappa, C. D., Barreda, S., Bouvier, N. M., & Ristenpart, W. D. (2019). Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. *Scientific reports*, 9(1), 1-10.
- ASHRAE. 2020. ASHRAE position document on infectious aerosols. Atlanta, USA.
- ASHRAE. (2021a). Core-recommendations-for-reducing-airborne-infectious-aerosol-exposure. Technical resources. <https://www.ashrae.org/technical-resources/resources#statement>.
- ASHRAE. (2021b). In-room-air-cleaner-guidance-for-reducing-covid-19-in-air-in-your-space-or-room. Technical resources. <https://www.ashrae.org/technical-resources/resources#statement>.
- Bake, B., Larsson, P., Ljungkvist, G., Ljungström, E., & Olin, A. C. (2019). Exhaled particles and small airways. *Respiratory research*, 20(1), 1-14.
- Bahl, P., de Silva, C. M., Chughtai, A. A., MacIntyre, C. R., & Doolan, C. (2020). An experimental framework to capture the flow dynamics of droplets expelled by a sneeze. *Experiments in Fluids*, 61(8), 1-9.

- Balachandar, S., Zaleski, S., Soldati, A., Ahmadi, G., & Bourouiba, L. (2020). Host-to-host airborne transmission as a multiphase flow problem for science-based social distance guidelines. *International Journal of Multiphase Flow*, 132, 103439.
- Bar-On, Y. M., Flamholz, A., Phillips, R., & Milo, R. (2020). Science Forum SARS-CoV-2 (COVID-19) by the numbers. *elife*, 9, e57309.
- Bask, W. (2019). Confirming the Functionality of Variable Air Volume Ventilation Systems with Field Studies. Master's Thesis. Aalto University.
- 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.
- Bhagat, R. K., Wykes, M. D., Dalziel, S. B., & Linden, P. F. (2020). Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19. *Journal of Fluid Mechanics*, 903.
- 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.
- Bloch, A. B., Orenstein, W. A., Ewing, W. M., Spain, W. H., Mallison, G. F., Herrmann, K. L., & Hinman, A. R. (1985). Measles outbreak in a pediatric practice: airborne transmission in an office setting. *Pediatrics*, 75(4), 676-683.
- Blocken, B., van Druenen, T., Ricci, A., Kang, L., van Hooff, T., Qin, P., ... & Brombacher, A. C. (2021). Ventilation and air cleaning to limit aerosol particle concentrations in a gym during the COVID-19 pandemic. *Building and Environment*, 193, 107659.
- Bolashikov, Z. D., & Melikov, A. K. (2009). Methods for air cleaning and protection of building occupants from airborne pathogens. *Building and Environment*, 44(7), 1378-1385.
- Bolashikov, Z., Melikov, A., Spilak, M., Nastase, I., & Meslem, A. (2014). Improved inhaled air quality at reduced ventilation rate by control of airflow interaction at the breathing zone with lobed jets. *Hvac&R Research*, 20(2), 238-250.
- 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.
- Bourouiba, L. (2020). Turbulent gas clouds and respiratory pathogen emissions potential implications for reducing transmission of COVID-19. *Jama*, 323(18), 1837-1838.
- Bourouiba, L., Dehandschoewercker, E., & Bush, J. W. (2014). Violent expiratory events on coughing and sneezing. *Journal of Fluid Mechanics*, 745, 537-563.
- Brehmer, C., Norris, C., Barkjohn, K. K., Bergin, M. H., Zhang, J., Cui, X., . . . Schauer, J. J. (2019). The impact of household air cleaners on the chemical composition and children's exposure to PM_{2.5} metal sources in suburban shanghai. *Environmental Pollution*, 253, 190-198. doi:10.1016/j.envpol.2019.07.003.
- Britigan, N., Alshawa, A., & Nizkorodov, S. A. (2006). Quantification of ozone levels in indoor environments generated by ionization and ozonolysis air purifiers. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(5), 601-610.
- Brohus, H., & Nielsen, P. V. (1996). Personal exposure in displacement ventilated rooms. *Indoor Air*, 6(3), 157-167.
- Buonanno, G., Morawska, L., & Stabile, L. (2020). Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection prospective and retrospective applications. *Environment international*, 145, 106112.
- Buonanno, G., Stabile, L., & Morawska, L. (2020). Estimation of airborne viral emission Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment. *Environment international*, 141, 105794.
- Butz, A. M., Matsui, E. C., Breyse, P., Curtin-Brosnan, J., Eggleston, P., Diette, G., . . . Rand, C. (2011). A randomized trial of air cleaners and a health coach to improve indoor air quality for inner-city children with asthma and secondhand smoke exposure. *Archives of Pediatrics and Adolescent Medicine*, 165(8), 741-748. doi:10.1001/archpediatrics.2011.111.

- Cao, G., Nielsen, P. V., Jensen, R. L., Heiselberg, P., Liu, L., & Heikkinen, J. (2015). Protected zone ventilation and reduced personal exposure to airborne cross-infection. *Indoor Air*, 25(3), 307-319.
- CDC. (2015). Hierarchy of Controls. Centers for Disease Control and Prevention.
- CDC (2020) Scientific Brief: SARS-CoV-2 and Potential Airborne Transmission. <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/more/scientific-brief-sars-cov-2.html> (Accessed 12.5.2022)
- CDC. (2021). Employer Information for Office Buildings. Centers for Disease Control and Prevention.
- CEN. (2015a). European Standard EN ISO 14644-1: Cleanrooms and associated controlled environments. Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration. Brussels, Belgium.
- CEN. (2015b). European Standard EN ISO 14644-2: Cleanrooms and associated controlled environments. Part 2: Monitoring to provide evidence of cleanroom performance related to air cleanliness by particle concentration. Brussels, Belgium.
- CEN. (2019a). European Standard EN 1822-1:2019 High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA). Part 1: Classification, performance testing, marking. Brussels, Belgium.
- CEN. (2019b). European Standard EN ISO 14644-3: Cleanrooms and associated controlled environments. Part 3 Test methods. Brussels, Belgium.
- CEN. (2019c). European Standard EN ISO 16798-1: Energy performance of buildings. Ventilation for buildings. Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Module M1-6. Brussels, Belgium.
- Chan, J. F. W., Yuan, S., Kok, K. H., To, K. K. W., Chu, H., Yang, J., ... & Yuen, K. Y. (2020). A familial cluster of pneumonia associated with the 2019 novel coronavirus indicating person-to-person transmission a study of a family cluster. *The Lancet*, 395(10223), 514-523.
- Chen, Q. (1995). Comparison of different k-ε models for indoor air flow computations. *Numerical Heat Transfer, Part B Fundamentals*, 28(3), 353-369.
- Chen, Q. (2009). Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. *Building and environment*, 44(4), 848-858.
- Chen, Q. and Srebric, J. (2002). A procedure for verification, validation, and reporting of indoor environment CFD analyses. *HVAC&R Research*, 8(2), 201-216.
- Chen, C., and Zhao, B. (2010). Some questions on dispersion of human exhaled droplets in ventilation room answers from numerical investigation. *Indoor Air*, 20(2), 95-111.
- Chen, L., Jin, X., Yang, L., Du, X., & Yang, Y. (2017). Particle transport characteristics in indoor environment with an air cleaner: The effect of nonuniform particle distributions. In *Building simulation* (Vol. 10, No. 1, pp. 123-133). Tsinghua University Press.
- Chen, W., Zhang, N., Wei, J., Yen, H. L., & Li, Y. (2020). Short-range airborne route dominates exposure of respiratory infection during close contact. *Building and Environment*, 176, 106859.
- Chen, C., Zhao, B., Cui, W., Dong, L., An, N., & Ouyang, X. (2010). The effectiveness of an air cleaner in controlling droplet aerosol particle dispersion emitted from a patient's mouth in the indoor environment of dental clinics. *Journal of the Royal Society Interface*, 7(48), 1105-1118.
- Chung, K. C., & Hsu, S. P. (2001). Effect of ventilation pattern on room air and contaminant distribution. *Building and Environment*, 36(9), 989-998.
- Coleman, K. K., Tay, D. J. W., Tan, K. S., Ong, S. W. X., Koh, M. H., Chin, Y. Q., ... & Tham, K. W. (2021). Viral load of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) in respiratory aerosols emitted by patients with coronavirus disease 2019 (COVID-19) while breathing, talking, and singing. *Clinical Infectious Diseases*, Volume 74, Issue 10, 15 May 2022, Pages 1722–1728, <https://doi.org/10.1093/cid/ciab691>
- Correia, G., Rodrigues, L., Da Silva, M. G., & Gonçalves, T. (2020). Airborne route and bad use of ventilation systems as non-negligible factors in SARS-CoV-2 transmission. *Medical hypotheses*, 141, 109781.

- Cortellessa, G., Stabile, L., Arpino, F., Faleiros, D. E., Van Den Bos, W., Morawska, L., & Buonanno, G. (2021). Close proximity risk assessment for SARS-CoV-2 infection. *Science of the Total Environment*, 794, 148749.
- Coyle, J. P., Derk, R. C., Lindsley, W. G., Boots, T., Blachere, F. M., Reynolds, J. S., ... & Noti, J. D. (2022). Reduction of exposure to simulated respiratory aerosols using ventilation, physical distancing, and universal masking. *Indoor air*, 32(2), e12987.
- Dai, H., & Zhao, B. (2020). Association of the infection probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces. In *Building simulation* (Vol. 13, No. 6, pp. 1321-1327). Tsinghua University Press.
- Dai, H., & Zhao, B. (2022). Reducing airborne infection risk of COVID-19 by locating air cleaners at proper positions indoor Analysis with a simple model. *Building and Environment*, 213, 108864.
- Danilenko, I., Gorban, O., da Costa Zaragoza de Oliveira Pedro, P.M., Viegas, J., Shapovalova, O., Akhkozov, L., . . . Lyubchik, S. (2020). Photocatalytic composite nanomaterial and engineering solution for inactivation of airborne bacteria. *Topics in Catalysis*, doi:10.1007/s11244-020-01291-2.
- Dick, E. C., Jennings, L. C., Mink, K. A., Wartgow, C. D., & Inborn, S. L. (1987). Aerosol transmission of rhinovirus colds. *Journal of Infectious Diseases*, 156(3), 442-448.
- Domingo, J. L., Marquès, M., & Rovira, J. (2020). Influence of airborne transmission of SARS-CoV-2 on COVID-19 pandemic. A review. *Environmental research*, 188, 109861.
- van Doremalen, N., Bushmaker, T., Morris, D. H., Holbrook, M. G., Gamble, A., Williamson, B. N., ... & Munster, V. J. (2020). Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. *New England journal of medicine*, 382(16), 1564-1567.
- ECDC. (2020). Heating, ventilation and air-conditioning systems in the context of COVID-19. 10 November 2020. Stockholm.
- ECDC. (2021a). Public health impact of SARS-CoV-2 variants of concern: scoping review protocol. Technical report, 18 May 2021, Stockholm.
- ECDC. (2021b). Partial COVID-19 vaccination, vaccination following SARS-CoV-2 infection and heterologous vaccination schedule: summary of evidence. Technical report, 22 July 2021.
- Escombe, A. R., Oeser, C., Gilman, R. H., Navincopa, M., Ticona, E., Martínez, C., Caviedes, L., Sheen, P., Gonzalez, A., Noakes, C., Moore, D. A. J., Friedland, J. S., & Evans, C. A. (2007). The Detection of Airborne Transmission of Tuberculosis from HIV-Infected Patients, Using an In Vivo Air Sampling Model. *Clinical Infectious Diseases*, 44(10), 1349-1357.
- 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.
- Gao, N., Niu, J., & Morawska, L. (2008). Distribution of respiratory droplets in enclosed environments under different air distribution methods. In *Building simulation* (Vol. 1, No. 4, pp. 326-335). Springer Berlin Heidelberg.
- Geiss O. 2021. Effect of wearing face masks on the carbon dioxide concentration in the breathing zone. *Aerosol and Air Quality Research*, 21(2), 200403.
- Gelderblom, H. R. (1996). *Structure and classification of viruses*. Medical Microbiology. 4th edition.
- Gralton, J., Tovey, E., McLaws, M. L., & Rawlinson, W. D. (2011). The role of particle size in aerosolised pathogen transmission: a review. *Journal of Infection*, 62(1), 1-13.
- Grinshpun, S. A., Mainelis, G., Trunov, M., Adhikari, A., Reponen, T., & Willeke, K. (2005). Evaluation of ionic air purifiers for reducing aerosol exposure in confined indoor spaces. *Indoor Air*, 15(4), 235-245. doi:10.1111/j.1600-0668.2005.00364.x.
- Guan, W. J., Ni, Z. Y., Hu, Y., Liang, W. H., Ou, C. Q., He, J. X., ... & Zhong, N. S. (2020). Clinical characteristics of coronavirus disease 2019 in China. *New England journal of medicine*, 382(18), 1708-1720.

- Gupta, D., Dubey, D., Rai, D., Singh, D., & Jhunjhunwala, D. (2020). Desirable And Undesirable Effects Of Air Purifier In Clinical Settings During Covid-19 Pandemic. *European Journal of Molecular & Clinical Medicine*, 7(6), 233-236.
- Gupta, J. K., Lin, C. H., & Chen, Q. (2009). Flow dynamics and characterization of a cough. *Indoor air*, 19(6), 517-525.
- Gupta, J. K., Lin, C. H., & Chen, Q. (2010). Characterizing exhaled airflow from breathing and talking. *Indoor air*, 20(1), 31-39.
- Harder, T., Koch, J., Vygen-Bonnet, S., Külper-Schiek, W., Pilic, A., Reda, S., ... & Wichmann, O. (2021). Efficacy and effectiveness of COVID-19 vaccines against SARS-CoV-2 infection: interim results of a living systematic review, 1 January to 14 May 2021. *Eurosurveillance*, 26(28), 2100563.
- Haslbeck, K., Schwarz, K., Hohlfeld, J. M., Seume, J. R., & Koch, W. (2010). Submicron droplet formation in the human lung. *Journal of aerosol science*, 41(5), 429-438.
- He, X., Lau, E. H., Wu, P., Deng, X., Wang, J., Hao, X., ... & Leung, G. M. (2020). Temporal dynamics in viral shedding and transmissibility of COVID-19. *Nature medicine*, 26(5), 672-675.
- Heiselberg, P. and Nielsen, P. V. (1996). *Flow Element Models*. Aalborg: Dept. of Building Technology and Structural Engineering. (Indoor Environmental Technology; No. 65, Vol. R9657).
- Hodcroft, E. B., De Maio, N., Lanfear, R., MacCannell, D. R., Minh, B. Q., Schmidt, H. A., ... & Dessimoz, C. (2021). Want to track pandemic variants faster Fix the bioinformatics bottleneck. *Nature* 591, 30-33. doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-021-00525-x>.
- Holmberg, S., & Chen, Q. (2003). Air flow and particle control with different ventilation systems in a classroom. *Indoor air*, 13(2), 200-204.
- Holmberg, S., & Li, Y. (1998). Modelling of the indoor environment—particle dispersion and deposition. *Indoor air*, 8(2), 113-122.
- Horsfall, F. L., In Tamm, I., & Rivers, T. M. (1965). *Viral and rickettsial infections of man*. Philadelphia: Lippincott.
- Huang, C., Wang, Y., Li, X., Ren, L., Zhao, J., Hu, Y., ... & Cao, B. (2020). Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. *The lancet*, 395(10223), 497-506.
- Hyvärinen, A., Salmela, A., Tähtinen, K., Hartikainen, T., Pekkanen, J., Lampi, J., ... & Lindqvist, H. (2020). Suomen julkisen ja yksityisen rakennuskannan sisäilman laatu, nykytilanne ja kehitys (SisäNyt-selvitys). *Sisäilmayhdistys Raportti* 38.
- Janoszek, T., Lubosik, Z., Świerczek, L., Walentek, A., & Jaroszewicz, J. (2021). Experimental and CFD Simulations of the Aerosol Flow in the Air Ventilating the Underground Excavation in Terms of SARS-CoV-2 Transmission. *Energies*, 14(16), 4743.
- Jin, X., Yang, L., Du, X., & Yang, Y. (2016). Particle transport characteristics in indoor environment with an air cleaner. *Indoor and Built Environment*, 25(6), 987-996.
- Johnson, G. R., & Morawska, L. (2009). The mechanism of breath aerosol formation. *Journal of aerosol medicine and pulmonary drug delivery*, 22(3), 229-237.
- Johnson, G. R., Morawska, L., Ristovski, Z. D., Hargreaves, M., Mengersen, K., Chao, C. Y. H., ... & Corbett, S. (2011). Modality of human expired aerosol size distributions. *Journal of Aerosol Science*, 42(12), 839-851.
- Junjing, Y., Sekhar, C., Cheong, D., & Raphael, B. (2014). Performance evaluation of an integrated Personalized Ventilation—Personalized Exhaust system in conjunction with two background ventilation systems. *Building and environment*, 78, 103-110.
- van Kampen, J. J., van de Vijver, D. A., Fraaij, P. L., Haagmans, B. L., Lamers, M. M., Okba, N., ... & van der Eijk, A. A. (2021). Duration and key determinants of infectious virus shedding in hospitalized patients with coronavirus disease-2019 (COVID-19). *Nature communications*, 12(1), 1-6.
- Katellaris, A. L., Wells, J., Clark, P., Norton, S., Rockett, R., Arnott, A., ... & Bag, S. K. (2021). Epidemiologic evidence for airborne transmission of SARS-CoV-2 during church singing, Australia, 2020. *Emerging infectious diseases*, 27(6), 1677.

- 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.
- Kim, J., & Jang, J. (2018). Inactivation of airborne viruses using vacuum ultraviolet photocatalysis for a flow-through indoor air purifier with short irradiation time. *Aerosol Science and Technology*, 52(5), 557-566.
- Kim, S. H., Chang, S. Y., Sung, M., Park, J. H., Bin Kim, H., Lee, H., ... & Min, J. Y. (2016). Extensive viable Middle East respiratory syndrome (MERS) coronavirus contamination in air and surrounding environment in MERS isolation wards. *Reviews of Infectious Diseases*, 63(3), 363-369.
- Klompas, M., Baker, M. A., Griesbach, D., Tucker, R., Gallagher, G. R., Lang, A. S., ... & Rhee, C. (2021). Transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) from asymptomatic and presymptomatic individuals in healthcare settings despite medical masks and eye protection. *Clinical Infectious Diseases*, 73(9), 1693-1695.
- Knibbs, L. D., Morawska, L., Bell, S. C., & Grzybowski, P. (2011). Room ventilation and the risk of airborne infection transmission in 3 health care settings within a large teaching hospital. *American journal of infection control*, 39(10), 866-872.
- Kohanski, M. A., Lo, L. J., & Waring, M. S. (2020). Review of indoor aerosol generation, transport, and control in the context of COVID-19. In *International forum of allergy & rhinology* (Vol. 10, No. 10, pp. 1173-1179).
- Kolarik, B., Wargocki, P., Skorek-Osikowska, A., & Wisthaler, A. (2010). The effect of a photocatalytic air purifier on indoor air quality quantified using different measuring methods. *Building and Environment*, 45(6), 1434-1440. doi:10.1016/j.buildenv.2009.12.006.
- Kolarik, J., & Wargocki, P. (2010). Can a photocatalytic air purifier be used to improve the perceived air quality indoors *Indoor Air*, 20(3), 255-262.
- Koskela, H., Häggblom, 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., Lastovets, N., Mustakallio, P., da Graça, G. C., Mateus, N. M., & Rosenqvist, M. (2016). The effect of typical buoyant flow elements and heat load combinations on room air temperature profile with displacement ventilation. *Building and Environment*, 108, 207-219.
- Kosonen, R., Saarinen, P., Koskela, H. and Hole, A. (2010). Impact of heat load location and strength on air flow pattern with a passive chilled beam system. *Energy and Buildings*, 42(1), 34-42.
- Kujundzic, E., Zander, D. A., Hernandez, M., Angenent, L. T., Henderson, D. E., & Miller, S. L. (2005). Effects of ceiling-mounted HEPA-UV air filters on airborne bacteria concentrations in an indoor therapy pool building. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55(2), 210-218.
- Kulkarni, H., Smith, C. M., Lee, D. D. H., Hirst, R. A., Easton, A. J., & O'Callaghan, C. (2016). Evidence of respiratory syncytial virus spread by aerosol. Time to revisit infection control strategies?. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 194(3), 308-316.
- Kurnitski, J., Kiil, M., Wargocki, P., Boerstra, A., Seppänen, O., Olesen, B., & Morawska, L. (2021). Respiratory infection risk-based ventilation design method. *Building and Environment*, 206, 108387.
- Lai, A. C., & Cheng, Y. C. (2007). Study of expiratory droplet dispersion and transport using a new Eulerian modeling approach. *Atmospheric Environment*, 41(35), 7473-7484.
- Lai, A. C., & Nazaroff, W. W. (2000). Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces. *Journal of aerosol science*, 31(4), 463-476.
- Lai, A. C. K., & Nazaroff, W. W. (2005). Supermicron particle deposition from turbulent chamber flow onto smooth and rough vertical surfaces. *Atmospheric Environment*, 39(27), 4893-4900.
- Lai, J., Coleman, K. K., Tai, S., Sheldon, H., German, J., Hong, F., ... & Milton, D. K. (2022). Exhaled Breath Aerosol Shedding by Highly Transmissible Versus Prior SARS-CoV-2 Variants. *Clinical Infectious Diseases*.

- Lampi, J., Hyvärinen, A., Erhola, M., Haahtela, T., Haukipuro, K., Haverinen-Shaughnessy, U., ... & Pekkanen, J. (2020). Healthy people in healthy premises: the Finnish Indoor Air and Health Programme 2018–2028. *Clinical and translational allergy*, 10(1), 1-15.
- Laue, M., Kauter, A., Hoffmann, T., Möller, L., Michel, J., & Nitsche, A. (2021). Morphometry of SARS-CoV and SARS-CoV-2 particles in ultrathin plastic sections of infected Vero cell cultures. *Scientific reports*, 11(1), 1-11.
- Lednický, J. A., Lauzard, M., Fan, Z. H., Jutla, A., Tilly, T. B., Gangwar, M., ... & Wu, C. Y. (2020). Viable SARS-CoV-2 in the air of a hospital room with COVID-19 patients. *International Journal of Infectious Diseases*, 100, 476-482.
- Lee, S., Kim, T., Lee, E., Lee, C., Kim, H., Rhee, H., ... & Kim, T. H. (2020). Clinical course and molecular viral shedding among asymptomatic and symptomatic patients with SARS-CoV-2 infection in a community treatment center in the Republic of Korea. *JAMA internal medicine*, 180(11), 1447-1452.
- Lekshmi Mohan, V., Shiva Nagendra, S. M., & Maiya, M. P. (2019). Photocatalytic degradation of gaseous toluene using self-assembled air filter based on chitosan/activated carbon/TiO₂. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(6) doi:10.1016/j.jece.2019.103455.
- Leung, N., Chu, D., Shiu, E., Chan, K. H., McDevitt, J. J., Hau, B., Yen, H. L., Li, Y., Ip, D., Peiris, J., Seto, W. H., Leung, G. M., Milton, D. K., & Cowling, B. J. (2020). Respiratory virus shedding in exhaled breath and efficacy of face masks. *Nature medicine*, 26(5), 676–680. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0843-2>.
- Lewis, D. (2021). COVID-19 rarely spreads through surfaces. So why are we still deep cleaning?. *Nature* 590, 26-28. doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-021-00251-4>.
- Li, Y., Leung, G. M., Tang, J. W., Yang, X., Chao, C. Y., Lin, J. Z., ... & Yuen, P. L. (2007). Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment—a multidisciplinary systematic review. *Indoor air*, 17(1), 2-18.
- Li, Y., & Nielsen, P. V. (2011). CFD and ventilation research. *Indoor Air*, 21(6), 442-453.
- Licina, D., Melikov, A., Pantelic, J., Sekhar, C., & Tham, K. W. (2015). Human convection flow in spaces with and without ventilation: personal exposure to floor-released particles and cough-released droplets. *Indoor air*, 25(6), 672-682.
- Licina, D., Melikov, A., Sekhar, C., & Tham, K. W. (2015a). Transport of gaseous pollutants by convective boundary layer around a human body. *Science and Technology for the Built Environment*, 21(8), 1175-1186.
- Licina, D., Melikov, A., Sekhar, C., & Tham, K. W. (2015b). Human convective boundary layer and its interaction with room ventilation flow. *Indoor Air*, 25(1), 21-35.
- Licina, D., Pantelic, J., Melikov, A., Sekhar, C., & Tham, K. W. (2014). Experimental investigation of the human convective boundary layer in a quiescent indoor environment. *Building and Environment*, 75, 79-91. doi:10.1016/j.buildenv.2014.01.016.
- Lindsley, W. G., Beezhold, D. H., Coyle, J., Derk, R. C., Blachere, F. M., Boots, T., . . . Noti, J. D. (2021). Efficacy of universal masking for source control and personal protection from simulated cough and exhaled aerosols in a room. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 18(8), 409-422. doi:10.1080/15459624.2021.1939879.
- Lindsley, W. G., Blachere, F. M., Beezhold, D. H., Law, B. F., Derk, R. C., Hettick, J. M., ... & Noti, J. D. (2021). A comparison of performance metrics for cloth masks as source control devices for simulated cough and exhalation aerosols. *Aerosol Science and Technology*, 55(10), 1125-1142.
- Lindsley, W. G., Blachere, F. M., Law, B. F., Beezhold, D. H., & Noti, J. D. (2021). Efficacy of face masks, neck gaiters and face shields for reducing the expulsion of simulated cough-generated aerosols. *Aerosol Science and Technology*, 55(4), 449-457.
- Liu, L., Li, Y., Nielsen, P. V., Wei, J., & Jensen, R. L. (2017). Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people. *Indoor air*, 27(2), 452-462.
- Liu, Y., Ning, Z., Chen, Y., Guo, M., Liu, Y., Gali, N. K., ... & Lan, K. (2020). Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals. *Nature*, 582(7813), 557-560.

- Liu, S., & Novoselac, A. (2014). Transport of airborne particles from an unobstructed cough jet. *Aerosol Science and Technology*, 48(11), 1183-1194.
- Liu, X., & Zhai, Z. (2007). Identification of appropriate CFD models for simulating aerosol particle and droplet indoor transport. *Indoor and Built Environment*, 16(4), 322-330.
- Luongo, J. C., Fennelly, K. P., Keen, J. A., Zhai, Z. J., Jones, B. W., & Miller, S. L. (2016). Role of mechanical ventilation in the airborne transmission of infectious agents in buildings. *Indoor air*, 26(5), 666-678.
- Ma, J., Qi, X., Chen, H., Li, X., Zhang, Z., Wang, H., ... & Yao, M. (2021). Coronavirus disease 2019 patients in earlier stages exhaled millions of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 per hour. *Clinical Infectious Diseases*, 72(10), e652-e654.
- Melikov, A. K. (2015). Human body micro-environment: The benefits of controlling airflow interaction. *Building and Environment*, 91, 70-77.
- Melikov, A. K. (2016). Advanced air distribution: Improving health and comfort while reducing energy use. *Indoor air*, 26(1), 112-124.
- Melikov, A. K., Ai, Z. T., & Markov, D. G. (2020). Intermittent occupancy combined with ventilation An efficient strategy for the reduction of airborne transmission indoors. *Science of The Total Environment*, 744, 140908.
- Melikov, A. K., Cermak, R., & Majer, M. (2002). Personalized ventilation evaluation of different air terminal devices. *Energy and buildings*, 34(8), 829-836.
- Melikov, A. K., & Kaczmarczyk, J. (2007). Influence of geometry of thermal manikins on concentration distribution and personal exposure. *Indoor Air*, 17(1), 50-59.
- Melikov, A. K., Skwarczynski, M. A., Kaczmarczyk, J., & Zabecky, J. (2013). Use of personalized ventilation for improving health, comfort, and performance at high room temperature and humidity. *Indoor Air*, 23(3), 250-263.
- Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605.
- Milton, D. K., Fabian, M. P., Cowling, B. J., Grantham, M. L., & McDevitt, J. J. (2013). Influenza virus aerosols in human exhaled breath particle size, culturability, and effect of surgical masks. *PLoS pathogens*, 9(3), e1003205.
- Mittal, R., Ni, R., & Seo, J. H. (2020). The flow physics of COVID-19. *Journal of fluid Mechanics*, 894.
- Moradi Kashkooli, F., Soltani, M., Zargar, B., Ijaz, M. K., Taatizadeh, E., & Sattar, S. A. (2020). Analysis of an indoor air decontamination device inside an aerobiology chamber: a numerical-experimental study. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 13(3), 281-288.
- Morawska, L. (2006). Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection?. *Indoor air*, 16(5), 335-347.
- Morawska, L., Allen, J., Bahnfleth, W., Bluysen, P. M., Boerstra, A., Buonanno, G., ... & Yao, M. (2021). A paradigm shift to combat indoor respiratory infection. *Science*, 372(6543), 689-691.
- 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.
- Morawska, L., & Buonanno, G. (2021). The physics of particle formation and deposition during breathing. *Nature Reviews Physics*, 3(5), 300-301.
- Morawska, L., & Cao, J. (2020). Airborne transmission of SARS-CoV-2 The world should face the reality. *Environment international*, 139, 105730.
- Morawska, L. J. G. R., Johnson, G. R., Ristovski, Z. D., Hargreaves, M., Mengersen, K., Corbett, S., ... & Katoshevski, D. (2009). Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities. *Journal of aerosol science*, 40(3), 256-269.
- Morawska, L., & Milton, D. K. (2020). It is time to address airborne transmission of coronavirus disease 2019 (COVID-19). *Clinical Infectious Diseases*, 71(9), 2311-2313.

- Morawska, L., Tang, J. W., Bahnfleth, W., Bluyssen, P. M., Boerstra, A., Buonanno, G., ... & Yao, M. (2020). How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised?. *Environment international*, 142, 105832.
- Müller, D., Kandzia, C., Kosonen, R., Melikov, A. K., & 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.
- Mundt, M., Mathisen, H. M., Moser, M., & Nielsen, P. V. (2004). *Ventilation effectiveness: Rehva guidebook No 2*. REHVA. ISBN 2-9600468-0-3.
- Murakami, S., Kato, S., Nagano, S., & Tanaka, Y. (1992). Diffusion characteristics of airborne particles with gravitational settling in a convection-dominant indoor flow field. *Ashrae Transactions*, 98(1), 82-97.
- Mustakallio, P., Bolashikov, Z., Kostov, K., Melikov, A., & Kosonen, R. (2016). Thermal environment in simulated offices with convective and radiant cooling systems under cooling (summer) mode of operation. *Building and Environment*, 100, 82-91.
- Myatt, T. A., Johnston, S. L., Zuo, Z., Wand, M., Kebabdz, 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.
- Nazaroff, W. W. (2016). Indoor bioaerosol dynamics. *Indoor Air*, 26(1), 61-78.
- Nazaroff, W. W., Nicas, M., & Miller, S. L. (1998). Framework for evaluating measures to control nosocomial tuberculosis transmission. *Indoor Air*, 8(4), 205-218.
- Nembhard, M. D., Burton, D. J., & Cohen, J. M. (2020). Ventilation use in nonmedical settings during COVID-19 Cleaning protocol, maintenance, and recommendations. *Toxicology and industrial health*, 36(9), 644-653.
- Nicas, M., Nazaroff, W. W., & Hubbard, A. (2005). Toward understanding the risk of secondary airborne infection emission of respirable pathogens. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 2(3), 143-154.
- Nielsen, P. V. (2009). Control of airborne infectious diseases in ventilated spaces. *Journal of the Royal Society Interface*, 6(suppl_6), S747-S755.
- 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., & Schälén, A. (2007). *Computational fluid dynamics in ventilation design*. REHVA Guidebook no 10. ISBN 2-9600468-9-7.
- Nielsen, P. V., Vilsbøll, R. W., Liu, L. and Jensen, R. L. (2017). *Diffuse Ceiling Ventilation, Load Distribution and Ceiling Design*. In *Proceedings of Healthy Buildings Europe, July 2-5 2017*, Lublin, Poland. Paper ID: 0026.
- Noakes, C. J., Beggs, C. B., Sleigh, P. A., & Kerr, K. G. (2006). Modelling the transmission of airborne infections in enclosed spaces. *Epidemiology & Infection*, 134(5), 1082-1091.
- Noh, J. Y., Yoon, J. G., Seong, H., Choi, W. S., Sohn, J. W., Cheong, H. J., ... & Song, J. Y. (2020). Asymptomatic infection and atypical manifestations of COVID-19 comparison of viral shedding duration. *The Journal of infection*, 81(5), 816.
- Novoselac, A., & Siegel, J. A. (2009). Impact of placement of portable air cleaning devices in multizone residential environments. *Building and Environment*, 44(12), 2348-2356.
- Offermann, F. J., Sextro, R. G., Fisk, W. J., Grimsrud, D. T., Nazaroff, W. W., Nero, A. V., ... & Yater, J. (1985). Control of respirable particles in indoor air with portable air cleaners. *Atmospheric Environment* (1967), 19(11), 1761-1771.
- Park, J. H., Lee, T. J., Park, M. J., Oh, H., & Jo, Y. M. (2020a). Effects of air cleaners and school characteristics on classroom concentrations of particulate matter in 34 elementary schools in Korea. *Building and environment*, 167, 106437.
- Park, H., Park, S., & Seo, J. (2020b). Evaluation on air purifier's performance in reducing the concentration of fine particulate matter for occupants according to its operation methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(15), 5561.

- Patankar, S. V. (1980). Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. McGraw Hill. ISBN 0-89116-522-3.
- Pei, J., Dai, W., Li, H., & Liu, J. (2020). Laboratory and field investigation of portable air cleaners' long-term performance for particle removal to be published in Building and environment. Building and Environment, 181, 107100.
- Pei, G., Rim, D., Schiavon, S., & Vannucci, M. (2019). Effect of sensor position on the performance of CO₂-based demand controlled ventilation. Energy and Buildings, 202, 109358.
- Perna G., Cuniberti F., Daccò S., Nobile M. and Caldirola D. 2020. Impact of respiratory protective devices on respiration: Implications for panic vulnerability during the COVID-19 pandemic. Journal of Affective Disorders.
- Qian, H., Li, Y., Nielsen, P. V., & Huang, X. (2009). Spatial distribution of infection risk of SARS transmission in a hospital ward. Building and Environment, 44(8), 1651-1658.
- Qian, H., Miao, T., Liu, L., Zheng, X., Luo, D., & Li, Y. (2021). Indoor transmission of SARS-CoV-2. Indoor Air, 31(3), 639-645.
- REHVA. (2021). How to operate HVAC and other building service systems to prevent the spread of the coronavirus (SARS-CoV-2) disease (COVID-19) in workplaces. REHVA COVID-19 guidance document. Osoitteessa: https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_V4.1_15042021.pdf. Viitattu 10.8.2021.
- Riley, R. L., Mills, C. C., Nyka, W., Weinstock, N., Storey, P. B., Sultan, L. U., ... & Wells, W. F. (1959). Aerial dissemination of pulmonary tuberculosis. A two-year study of contagion in a tuberculosis ward. American Journal of Hygiene, 70(2), 185-96.
- Riley, E. C., Murphy, G., & Riley, R. L. (1978). Airborne spread of measles in a suburban elementary school. American journal of epidemiology, 107(5), 421-432.
- Rim, D., Novoselec, A., & Morrison, G. (2009). The influence of chemical interactions at the human surface on breathing zone levels of reactants and products. Indoor Air, 19(4), 324.
- Roberge, R. J. (2016). Face shields for infection control: A review. Journal of occupational and environmental hygiene, 13(4), 235-242.
- Ronen, A., Rotter, H., Elisha, S., Sevilia, S., Parizer, B., Hafif, N., & Manor, A. (2021). Investigation of the protection efficacy of face shields against aerosol cough droplets. Journal of occupational and environmental hygiene, 18(2), 72-83.
- Rosa, N., Jordão, M., Costa, J., Gaspar, A., Martinho, N., Gameiro Lopes, A., ... & Gameiro da Silva, M. (2022). Experimental and numerical evaluation of a new visor concept with aerodynamic sealing to protect medical professionals from contaminated droplets and aerosols. Indoor air, 32(9), e13114.
- Roy, C. J., & Milton, D. K. (2004). Airborne transmission of communicable infection - the elusive pathway. New England Journal of Medicine, 350(17), 1710-1712. doi:10.1056/NEJMp048051.
- Sachs, J. D., Karim, S. S. A., Aknin, L., Allen, J., Brosbøl, K., Colombo, F., Barron, G. C., Espinosa, M. F., Gaspar, V., Gaviria, A., Haines, A., Hotez, P. J., Koundouri, P., Bascuñán, F. L., Lee, J.-K., Pate, M. A., Ramos, G., Reddy, K. S., Serageldin, I., . . . Michie, S. (2022). The Lancet Commission on lessons for the future from the COVID-19 pandemic. The Lancet. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(22\)01585-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)01585-9)
- Salmela, A., Kulmala, I., Karvinen, A., Tallebot, V., Weiss, P., Gobert, T., ... & Pasanen, P. (2020). Measurement and simulation of biocontamination in an enclosed habitat. Aerosol Science and Engineering, 1-10.
- Salmela A, Tähtinen K, Hartikainen T, Pekkanen J, Lampi J, Jalkanen J, Niemi J, Lappalainen S, Lahtinen M, Sainio M, Manninen T, Wallenius K, Salmi K, Reijula K, Lindqvist H, Hyvärinen A (2019). Sisäilma ja terveys: kehitys, nykytilanne, seuranta ja vertailu eri maiden sekä julkisen ja yksityisen sektorin välillä. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2019:59. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-788-8>.
- Samet, JM., Prather, K., Benjamin, G., Lakdawala, S., ... & Marr, LC. (2021). Airborne transmission of SARS-CoV-2: What We Know. Clinical infectious diseases, 73(10), 1924-1926. <https://doi.org/10.1093/cid/ciab039>

- Sandberg, M. (2022). Ventilation as I see it. Keynote speech, Roomvent 2022, Xi'an, China.
- Schuit, M., Ratnesar-Shumate, S., Yolitz, J., Williams, G., Weaver, W., Green, B., ... & Dabisch, P. (2020). Airborne SARS-CoV-2 is rapidly inactivated by simulated sunlight. *The Journal of infectious diseases*, 222(4), 564-571.
- Seppänen, O. (1987). *Ilmastointiteknikka ja sisäilmasto*. LVI-kustannus, Helsinki. ISBN 951-96098-0-6.
- Seppänen, O. A., & Fisk, W. J. (2004). Summary of human responses to ventilation. *Indoor air*, 14(s7), 102-118.
- Setti, L., Passarini, F., De Gennaro, G., Barbieri, P., Perrone, M. G., Borelli, M., ... & Miani, A. (2020). Airborne transmission route of COVID-19 why 2 meters/6 feet of inter-personal distance could not be enough.
- Shao, X., & Li, X. (2020). COVID-19 transmission in the first presidential debate in 2020. *Physics of Fluids*, 32(11), 115125.
- Shaughnessy, R. J., Levetin, E., Blocker, J., & Sublette, K. L. (1994). Effectiveness of portable indoor air cleaners sensory testing results. *Indoor Air*, 4(3), 179-188.
- Shaughnessy, R. J., & Sextro, R. G. (2006). What is an effective portable air cleaning device A review. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 3(4), 169-181.
- Sheikhnejad, Y., Aghamolaei, R., Fallahpour, M., Motamedi, H., Moshfeghi, M., Mirzaei, P. A., & Bordbar, H. (2022). Airborne and Aerosol Pathogen Transmission Modeling of Respiratory Events in Buildings An Overview of Computational Fluid Dynamics. *Sustainable Cities and Society*, 103704.
- Shen, J., Kong, M., Dong, B., Birnkrant, M. J., & Zhang, J. (2021). A systematic approach to estimating the effectiveness of multi-scale IAQ strategies for reducing the risk of airborne infection of SARS-CoV-2. *Building and environment*, 200, 107926.
- Schumann, L., Cetin, Y. E., & Kriegel, M. (2022). Investigation of methods regarding the effectiveness of ventilation strategies in an operating room on the removal of airborne germs using tracer particles. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 356, p. 05072). EDP Sciences.
- Sisäilmäyhdistys. (2020). Perustietoa sisäilmasta: Epäpuhtaudet ja niiden torjunta. Osoitteessa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Perustietoa-sisailmasta/Epapuhtaudet-ja-niiden-torjunta>. Viitattu 26.1.2021.
- Smither, S. J., Eastaugh, L. S., Findlay, J. S., & Lever, M. S. (2020). Experimental aerosol survival of SARS-CoV-2 in artificial saliva and tissue culture media at medium and high humidity. *Emerging microbes & infections*, 9(1), 1415-1417.
- Stadnytskyi, V., Bax, C. E., Bax, A., & Anfinrud, P. (2020). The airborne lifetime of small speech droplets and their potential importance in SARS-CoV-2 transmission. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(22), 11875-11877.
- Su, W., Yang, B., Melikov, A., Liang, C., Lu, Y., Wang, F., ... & Kosonen, R. (2022). Infection probability under different air distribution patterns. *Building and Environment*, 207, 108555.
- Su Y., Liu G., Zhang L. (2018) Research on the Design of Human Settlement System and Personal Air Purification System Under the Background of Internet of Things. In: Georgakopoulos D., Zhang L.J. (eds) *Internet of Things – ICIOT 2018*. ICIOT 2018. Lecture Notes in Computer Science, vol 10972. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94370-1_8.
- Sun, H., Ullah, R., Chong, S., Ang, H. M., Tadó, M. O., & Wang, S. (2011). Room-light-induced indoor air purification using an efficient Pt/N-TiO₂ photocatalyst. *Applied Catalysis B: Environmental*, 108-109, 127-133. doi:10.1016/j.apcatb.2011.08.017.
- Sundell, J. (2004). On the history of indoor air quality and health. *Indoor air*, 14(s 7), 51-58.
- Sze To, G. N., & Chao, C. Y. H. (2010). Review and comparison between the Wells–Riley and dose-response approaches to risk assessment of infectious respiratory diseases. *Indoor air*, 20(1), 2-16.
- Säteri, J., & Ahola, M. (2018). *Sisäilmastoluokitus 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset*. Espoo: Sisäilmäyhdistys.

- Tang, J. W., Bahnfleth, W. P., Bluysen, P. M., Buonanno, G., Jimenez, J. L., Kurnitski, J., ... & Dancer, S. J. (2021). Dismantling myths on the airborne transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus (SARS-CoV-2). *Journal of Hospital Infection*.
- Tang, J. W., Liebner, T. J., Craven, B. A., & Settles, G. S. (2009). A schlieren optical study of the human cough with and without wearing masks for aerosol infection control. *Journal of the Royal Society Interface*, 6(suppl_6), S727-S736.
- Tang, S., Mao, Y., Jones, R. M., Tan, Q., Ji, J. S., Li, N., ... & Shi, X. (2020). Aerosol transmission of SARS-CoV-2 Evidence, prevention and control. *Environment international*, 144, 106039.
- Tang, J. W., Path, F. R. C., & Settles, G. S. (2008). Coughing and aerosols. *New England Journal of Medicine*, 359(15), e19.
- Tellier, R. (2006). Review of aerosol transmission of influenza A virus. *Emerging infectious diseases*, 12(11), 1657.
- THL. (2020a). Kansallinen sisäilma ja terveysterveys -ohjelma. Osoitteessa: <https://thl.fi/fi/-/kansallinen-sisailma-ja-terveys-ohjelmassa-saatiin-aikaan-paljon-vuonna-2020>. Viitattu 22.1.2021.
- THL. (2020b). Tarttuminen ja suojaaminen – koronavirus. Osoitteessa: <https://thl.fi/fi/web/infektiotaudit-ja-rokotukset/ajankohtaista/ajankohtaista-koronaviruksesta-covid-19/tarttuminen-ja-suojaaminen-koronavirus>. Viitattu 26.1.2021.
- THL. (2021a). Muuntunut koronavirus tarttuu herkemmin – pidä yli kahden metrin turvaväli. Osoitteessa: <https://thl.fi/fi/-/muuntunut-koronavirus-tarttuu-herkemmin-pida-yli-kahden-metrin-turvavali>. Viitattu 9.8.2021.
- THL. (2021b). Uusi hanke selvittää, millainen vaikutus ilmanpuhdistimilla on koulun sisäilmaan. Osoitteessa: <https://thl.fi/fi/-/uusi-hanke-selvittaa-millainen-vaikutus-ilmanpuhdistimilla-on-koulun-sisailmaan>. Viitattu 9.8.2021.
- TSR. (2020). Hiukkaset, mikrobit ja kemikaalit – ilmanpuhdistimien vaikutukset altistumiseen kouluissa (HiMiKKo). Osoitteessa: <https://www.tsr.fi/hankkeet-ja-tutkimustieto/hiukkaset-mikrobit-ja-kemikaalit-ilmanpuhdistimien-vaikutukset-altistumiseen-kouluissa-himikko/#tiivistelma>. Viitattu 22.1.2021.
- Ueki, H., Furusawa, Y., Iwatsuki-Horimoto, K., Imai, M., Kabata, H., Nishimura, H., & Kawaoka, Y. (2020). Effectiveness of face masks in preventing airborne transmission of SARS-CoV-2. *MSphere*, 5(5), e00637-20.
- Varga, Z., Flammer, A. J., Steiger, P., Haberecker, M., Andermatt, R., Zinkernagel, A., ... & Moch, H. (2020). Electron microscopy of SARS-CoV-2 a challenging task—Authors' reply. *The Lancet*, 395(10238), e100.
- Versoza, M., Heo, J., Ko, S., Kim, M., & Park, D. (2020). Solid Oxygen-Purifying (SOP) Filters A Self-Disinfecting Filters to Inactivate Aerosolized Viruses. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21), 7858.
- Vohra, A., Goswami, D. Y., Deshpande, D. A., & Block, S. S. (2006). Enhanced photocatalytic disinfection of indoor air. *Applied Catalysis B Environmental*, 64(1-2), 57-65.
- Vuorinen, V., Aarnio, M., Alava, M., Alopaeus, V., Atanasova, N., Auvinen, M., Balasubramanian, N., Bordbar, H., Erästö, P., Grande, R., Hayward, N., Hellsten, A., Hostikka, S., Hokkanen, J., Kaario, O., Karvinen, A., Kivistö, I., Korhonen, M., Kosonen, R., Kuusela, J., Lestinen, S., Laurila, E., Nieminen, H., Peltonen, P., Pokki, J., Puisto, A., Raback, P., Salmenjoki, H., Sironen, T., Österberg, M. (2020). Modelling aerosol transport and virus exposure with numerical simulations in relation to SARS-CoV-2 transmission by inhalation indoors. *Safety Science*, 130, 104866, doi:10.1016/j.ssci.2020.104866.
- Wang, C. C., Prather, K. A., Sznitman, J., Jimenez, J. L., Lakdawala, S. S., Tufekci, Z., & Marr, L. C. (2021). Airborne transmission of respiratory viruses. *Science*, 373(6558), eabd9149.
- Waring, M. S., Siegel, J. A., & Corsi, R. L. (2008). Ultrafine particle removal and generation by portable air cleaners. *Atmospheric environment*, 42(20), 5003-5014.
- Wei, J., & Li, Y. (2016). Airborne spread of infectious agents in the indoor environment. *American journal of infection control*, 44(9), S102-S108.

- Wells, W. F. (1955). Airborne Contagion and Air Hygiene. An Ecological Study of Droplet Infections. Airborne Contagion and Air Hygiene. An Ecological Study of Droplet Infections.
- WHO. (2014). Infection prevention and control of epidemic-and pandemic-prone acute respiratory infections in health care. World Health Organization.
- WHO. (2020a). Coronavirus disease (COVID-19) advice for the public. Osoitteessa: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-for-public>. Viitattu 2.2.2021.
- WHO. (2020b). Advice on the use of masks in the context of COVID-19: interim guidance. Geneva: World Health Organization.
- WHO. (2020c). Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions: scientific brief.
- WHO. (2020d). Considerations for public health and social measures in the workplace in the context of COVID-19. https://www.who.int/publications/i/item/WHO-2019-nCoV-Adjusting_PH_measures-Workplaces-2020.1.
- WHO. (2020e). Getting your workplace ready for COVID-19. https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/getting-workplace-ready-for-covid-19.pdf?sfvrsn=359a81e7_6.
- WHO. (2021). Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240021280>.
- Woolhouse, M. E., & Brierley, L. (2018). Epidemiological characteristics of human-infective RNA viruses. *Scientific data*, 5(1), 1-6.
- Wu, Z., & McGoogan, J. M. (2020). Characteristics of and important lessons from the coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak in China: summary of a report of 72 314 cases from the Chinese Center for Disease Control and Prevention. *Jama*, 323(13), 1239-1242.
- Wu, J., Weng, W., Fu, M., Li, Y., & Lan, M. (2022). Enhancement effect of human movement on the high risk range of viral aerosols exhaled by a sitting person. *Building and Environment*, 109136.
- Wölfel, R., Corman, V. M., Guggemos, W., Seilmaier, M., Zange, S., Müller, M. A., ... & Wendtner, C. (2020). Virological assessment of hospitalized patients with COVID-2019. *Nature*, 581(7809), 465-469.
- Xie, X., Li, Y., Chwang, A. T., Ho, P. L., & Seto, W. H. (2007). How far droplets can move in indoor environments--revisiting the Wells evaporation-falling curve. *Indoor air*, 17(3), 211-225.
- Xu, R., Cui, B., Duan, X., Zhang, P., Zhou, X., & Yuan, Q. (2020a). Saliva potential diagnostic value and transmission of 2019-nCoV. *International journal of oral science*, 12(1), 1-6.
- Xu, J., Guo, H., Zhang, Y., & Lyu, X. (2022). Effectiveness of personalized air curtain in reducing exposure to airborne cough droplets. *Building and Environment*, 208, 108586.
- Xu, C., Luo, X., Yu, C., & Cao, S. J. (2020b). The 2019-nCoV epidemic control strategies and future challenges of building healthy smart cities.
- Xu, C., Nielsen, P. V., Liu, L., Jensen, R. L., & Gong, G. (2018). Impacts of airflow interactions with thermal boundary layer on performance of personalized ventilation. *Building and Environment*, 135, 31-41.
- Xu, C., Wei, X., Liu, L., Su, L., Liu, W., Wang, Y., & Nielsen, P. V. (2020). Effects of personalized ventilation interventions on airborne infection risk and transmission between occupants. *Building and Environment*, 180, 107008.
- Xu, X., Wu, J., Weng, W., & Fu, M. (2020). Investigation of inhalation and exhalation flow pattern in a realistic human upper airway model by PIV experiments and CFD simulations. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, doi:10.1007/s10237-020-01299-3.
- Yang, S., Lee, G. W., Chen, C. M., Wu, C. C., & Yu, K. P. (2007). The size and concentration of droplets generated by coughing in human subjects. *Journal of Aerosol Medicine*, 20(4), 484-494.
- Yang, C. -, Liao, C. -, Liu, J. -, Den, W., Chou, Y. -, & Tsai, J. -. (2014). Construction and application of an intelligent air quality monitoring system for healthcare environment. *Journal of Medical Systems*, 38(2) doi:10.1007/s10916-014-0015-3.

- 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, J., Sekhar, C., Wai, D. C. K., & Raphael, B. (2013). Computational fluid dynamics study and evaluation of different personalized exhaust devices. *HVAC&R Research*, 19(8), 934-946.
- Yang, Z. (2021). The performance of a new type of personal air cleaning device to protect against the airborne diseases. Master's Thesis. Aalto University.
- Yao, S., Min, C., Ye, H., Fu, Q., Duan, Y., Feng, L., . . . Liu, J. (2017). Experimental study on flow behavior of breathing activity produced by a thermal manikin. *Building and Environment*, 123, 200-210. doi:10.1016/j.buildenv.2017.07.004.
- Yun, S., Zhong, S., Alavi, H. S., Alahi, A., & Licina, D. (2022). Proxy methods for detection of inhalation exposure in simulated office environments. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 1-11.
- Zhang, Z., & Chen, Q. (2007). Comparison of the Eulerian and Lagrangian methods for predicting particle transport in enclosed spaces. *Atmospheric environment*, 41(25), 5236-5248.
- Zhang, S., & Lin, Z. (2021). Dilution-based evaluation of airborne infection risk-Thorough expansion of Wells-Riley model. *Building and Environment*, 194, 107674.
- Zhang, Y., Mo, J., Li, Y., Sundell, J., Wargocki, P., Zhang, J., ... & Sun, Y. (2011). Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality. A literature review. *Atmospheric Environment*, 45(26), 4329-4343.
- Zhang, R., Li, Y., Zhang, A. L., Wang, Y., & Molina, M. J. (2020). Identifying airborne transmission as the dominant route for the spread of COVID-19. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(26), 14857-14863.
- Zhang, T. T., Wang, S., Sun, G., Xu, L., & Takaoka, D. (2010). Flow impact of an air conditioner to portable air cleaning. *Building and Environment*, 45(9), 2047-2056.
- Zhao, B., Chen, C., & Tan, Z. (2009). Modeling of ultrafine particle dispersion in indoor environments with an improved drift flux model. *Journal of Aerosol Science*, 40(1), 29-43.
- Zhao, B., Li, X., & Zhang, Z. (2004). Numerical study of particle deposition in two differently ventilated rooms. *Indoor and built environment*, 13(6), 443-451.
- Zhou, F., Yu, T., Du, R., Fan, G., Liu, Y., Liu, Z., ... & Cao, B. (2020). Clinical course and risk factors for mortality of adult inpatients with COVID-19 in Wuhan, China a retrospective cohort study. *The lancet*, 395(10229), 1054-1062.
- Zhou, R., Li, F., Chen, F., Liu, H., Zheng, J., Lei, C., & Wu, X. (2020). Viral dynamics in asymptomatic patients with COVID-19. *International Journal of Infectious Diseases*, 96, 288-290.
- Zhu, N., Zhang, D., Wang, W., Li, X., Yang, B., Song, J., ... & Tan, W. (2020). A novel coronavirus from patients with pneumonia in China, 2019. *New England journal of medicine*; 382:727-33. DOI: 10.1056/NEJMoa2001017.
- Zhu, S., Lin, T., Spengler, J. D., Cedeño Laurent, J. G., & Srebric, J. (2022). The Influence of Plastic Barriers on Aerosol Infection Risk during Airport Security Checks. *Sustainability*, 14(18), 11281.
- Zukowska, D., Melikov, A., & Popiolek, Z. (2012). Impact of personal factors and furniture arrangement on the thermal plume above a sitting occupant. *Building and Environment*, 49, 104-116.



ISBN 978-952-64-1187-3 (pdf)
ISSN 1799-4888 (pdf)

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

**KAUPPA +
TALOUS**

**TAIDE +
MUOTOILU +
ARKKITEHTUURI**

**TIEDE +
TEKNOLOGIA**

CROSSOVER

**DOCTORAL
THESES**