

Suojaava ilmanjako sairaaloiden eristystiloissa



Petri Kalliomäki & Hannu Koskela

Suojaava ilmanjako sairaaloiden eristystiloissa

**Turun ammattikorkeakoulun
raportteja 244**

Turun ammattikorkeakoulu
Turku 2018

Työsuojelurahaston rahoittaman tutkimushankkeen loppuraportti
(TSR hankenumero 114342)

ISBN 978-952-216-670-8 (painettu)

ISSN 1457-7925 (painettu)

Painopaikka: Juvenes Print – Suomen Yliopistopaino Oy, Tampere 2018

ISBN 978-952-216-671-5 (pdf)

ISSN 1459-7764

Jakelu: <http://loki.turkuamk.fi>



Sisältö

Tiivistelmä	4
Abstract	7
Esipuhe.....	10
1 Johdanto	11
2 Menetelmät	15
2.1 Eristystilamalli	15
2.2 Savuvisualisoinnit	19
2.3 Hoitajien havainnointi	20
2.4 Merkkikaasumittaukset.....	20
2.5 Lämpöolojen ja ilman liikenopeuden mittaukset.....	23
2.6 Virtaussimuloinnit.....	24
3 Tulokset	28
3.1 Hoitajien observoinnit.....	28
3.2 Savuvisualisoinnit	29
3.3 Merkkikaasumittaukset.....	38
3.4 Lämpöolojen ja ilman nopeuden mittaukset.....	46
3.5 Virtaussimuloinnit.....	54
4 Yhteenveto.....	59
Lähteet.....	61

Tiivistelmä

Kalliomäki, P. & Koskela, H. Suojaava ilmanjako sairaaloiden eristystiloissa. Turun ammattikorkeakoulun raportteja 244. 66 s. Turku. ISBN 978-952-216-670-8 (painettu). ISBN 978-952-216-671-5 (pdf).

Sairaaloissa ilmanvaihdon ja ilmanlaadun pitäisi olla korkealla tasolla, erityisesti eristystiloissa, joissa ilmanvaihdon ja tuloilman jakotavan vaikutus ilmavälitteisille infektioille altistumiseen on huomattava. Tyypillisesti ilmavälitteisiä infektioita (esim. tuhkarokko, vesirokko, tuberkuloosi) kantava potilas sijoitetaan sairaalassa alipaineiseen ilmaeristystilaan, millä pyritään vähentämään taudin leviämistä. Alipaine pakottaa ilman kulkeutumaan vuotokohdissa kohti eristystilaa ja näin ollen pyrkii estämään epäpuhtauksien leviämisen ulos tilasta. Alipaine ei kuitenkaan ohjaa ilman liikettä eristystilan sisällä vaan huoneessa virtauskuviot määrittää pääosin tuloilman jakotapa ja lämmönlähteiden konvektiovirtaukset.

Suomessa ei ole kansallisia eristystilojen ilmanvaihdon suunnitteluohjeita tai standardeja vaan tyypillisesti suunnittelu perustuu sairaaloiden tapauskohtaisiin vaatimuksiin, suunnittelijan omiin kokemuksiin ja ulkomaisiin suunnitteluohjeisiin. Euroopassa on kuitenkin perustettu virallinen työryhmä (CEN/TC 156/WG 18), jonka tavoitteena on luoda yhteiseurooppalaiset standardit terveydenhuollon sisäympäristölle ja asettaa niille minimivaatimukset. Standardeissa tullaan paneutumaan muun muassa eristystilojen ilmanvaihtoon.

Ulkomaiset eristystilojen suunnitteluohjeet suosittelevat yleensä sekoittavan ilmanjaon käyttämistä riittävän korkean ilmanvaihtokertoimen kanssa (noin 12-kertainen ilmanvaihto tunnissa). Sekoittavan ilmanjaon tarkoituksena on sekoittaa huoneilma tehokkaasti ja näin laimentaa syntyvät korkeat epäpuhtauspitoisuudet mahdollisimman hyvin ja nopeasti. Sekoittavassa ilmanjaossa tuloilmahajottimilla on huomattavasti suurempi vaikutus huonevirtauksiin ja epäpuhtauksien leviämiseen kuin poistojen sijainnilla. Tähän seikkaan ei kuitenkaan kiinnitetä suunnitteluohjeissa tarpeeksi huomioita. Eristystiloissa sekoittavan ilmanjaon haasteena on saada aikaan

tarpeeksi tehokas laimennus potilaan hengitysvyöhykkeelle, jossa saattaa esiintyä korkeita ilmapölyisesti leviävien taudinaiheuttajien pitoisuuksia.

Sairaalahenkilökunta joutuu hoitotyössään usein läheisiin tekemisiin potilaan kanssa erityisesti antaessaan hoitoa potilaalle. Suojautuakseen ilmapölyisesti infektioita vastaan hoitajat käyttävät henkilösuojaimia, kuten hengityssuojaimia, käsineitä, viittoja ja päähineitä. Suojaimet eivät kuitenkaan takaa täydellistä suojaa infektioita vastaan vaan ne saattavat vuotaa tai esimerkiksi silmät voivat jäädä suojaamatta. Toimivan ilmanvaihdon tulisikin huuhdella tehokkaasti hoitajan hengitysvyöhykettä puhtaalla ilmalla ja laimentaa potilaasta peräisin olevat epäpuhtaudet mahdollisimman tehokkaasti ja ohjata ne kohti poistoa. Huolellisella ilmanvaihdon suunnittelulla, erityisesti tuloilman jaon suunnittelulla, voidaankin täydentää hoitajan suojaa ja näin ollen vähentää altistumisriskiä ilmapölyisille infektioille.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin tuloilman jakotavan, hajottimien paikan ja hoitajan sijainnin vaikutusta ilmapölyisille infektioille altistumiseen. Tutkimuksessa tarkasteltiin kahta erilaista tuloilman jakotapaa: paikallisesti katosta alaspäin puhaltavaa ilmanjakoa ja kattoa pitkin puhaltavaa sekoittavaa ilmanjakoa, joka on tyypillinen ilmanjakotapa eristystiloissa. Hajottimien paikan vaikutusta ilmanjakotapojen toimivuuteen testattiin tuomalla ilma huoneeseen kaukana potilaasta, keskeltä huonetta tai potilassängyn yläpuolelta. Hoitajan altistumista mitattiin kaukana potilaasta, potilassängyn päädystä, sängyn vieressä ja hoitajan nojatessa potilaan päälle (hoitotilanne). Kokeet suoritettiin laboratorioon rakennetussa eristystilamallissa, jossa hoitajaa ja potilasta simuloitiin hengittävillä lämpönukeilla. Hoitajan altistumista potilaan uloshengitysilmalle arvioitiin savuvisualisoinnein ja merkkikaasumittauksin eri potilas-hoitaja-hajotin etäisyyksillä. Potilaan lämpöviihtyvyyttä arvioitiin lämpöolo- ja ilmanliikemittauksin eri koetilanteissa.

Tuloilmahajottimien sijainnilla, ilmanjakotavalla ja hoitajan paikalla havaittiin olevan suuri vaikutus altistumiseen. Tyypillisesti korkein altistuminen havaittiin lähellä potilasta. Tällöin altistuminen saattoi olla jopa 10 kertaa suurempi kuin kaukana potilaasta. Myös merkittävimmät erot ilmanjakotapojen välillä havaittiin hoitajan ollessa lähellä potilasta. Esimerkiksi hoitajan nojatessa potilaan ylle kattoa pitkin puhaltava ilmanjako aiheutti noin 16-kertaisen keskimääräisen altistumisen verrattuna alaspäin puhaltavaan ilmanjakoon (hajotinten ollessa potilassängyn yläpuolella). Myös lämpöolot vaihtelivat eri ilmanjakotapojen välillä. Potilaan lämpöviihtyvyyden ylläpitämisen todettiin olevan haaste erityisesti alaspäin puhallettaessa.

Kaiken kaikkiaan tutkimuksen tulokset osoittivat, että huolellisella ilmanvaihdon suunnittelulla hoitajan altistumista potilaasta peräisin oleville ilmapölyisille taudinaiheuttajille voitiin merkittävästi pienentää säilyttäen lämpöolot tyydyttävinä. Tutkimus antaa tietoa eristystilojen ilmanvaihdon, tuloilmanjaon ja sisäilmaston suunnittelua varten ja tietoja voivat käyttää hyväkseen niin sairaaloiden infektioiden torjunnasta vastaavat kuin ilmanvaihdon suunnittelijat ja ilmanvaihtoratkaisujen ja -tuotteiden kehittäjät. Tutkimuksen tuloksia onkin hyödynnetty esimerkiksi käynnissä olevan yhteiseurooppalaisen sairaaloiden ilmanvaihdon standardin suunnittelussa.

Abstract

Kalliomäki, P. & Koskela, H. Suojaava ilmanjako sairaaloiden eristystiloissa. Reports from Turku University of Applied Sciences 244. 66 p. Turku. ISBN 978-952-216-670-8 (printed). ISBN 978-952-216-671-5 (pdf).

In hospital environment, ventilation and indoor air quality should be at high level. Especially in airborne infection isolation rooms, ventilation should provide protection against airborne transmission of infectious diseases to healthcare workers. Typically patients with airborne infections (such as measles, chickenpox and mycobacterium tuberculosis) are placed in airborne infection isolation rooms. These rooms are in negative pressure compared to adjacent spaces in order to reduce the spreading of the diseases. The negative pressure controls the airflow direction and directs the flow towards the isolation room and by so doing prevents airborne infections from spreading out of the space. However, the negative pressure does not control the airflow patterns inside the isolation rooms where the flows are mainly determined by supply air distribution and convection flows from heat sources.

There are no valid national standards or guidelines for isolation room ventilation in Finland. Instead, the ventilation design is typically based on foreign standards and guidelines, HVAC designers' own experience and case specific demands set by the hospitals. This is often the case in other European countries, as well. There seems to be a clear need for harmonized, coherent and clear standards for isolation room ventilation. This work is in fact already underway by the European Committee for Standardization (CEN) where Technical Committee 156 Working Group 18 is leading the standardization for ventilation in hospitals (CEN/TC 156/WG 18). The target is to provide minimum requirements for ventilation and indoor air quality in general and in specific risk areas (e.g. operating rooms, isolation rooms). The upcoming standard is aimed for hospital HVAC designers, facility managers, operation engineers and others who need information for the design, construction and maintenance of the spaces.

Current foreign standards and guidelines typically recommend mixing ventilation with high ventilation rates (e.g. 12 ACH). The principle behind the mixing ventilation is to mix the air effectively around the room and to dilute the contaminant concentrations quickly in the space. With high ventilation rates, the supply air distribution typically governs the room flow patterns (over the effect of exhaust) and hence dominates the airborne contaminant dispersion inside the isolation room. Typically this is not emphasized enough in the existing standards and guidelines. Poorly designed and implemented mixing ventilation might not provide effective flushing to the patient's breathing zone where the high contaminant concentrations may appear (i.e. close to source). Yet, healthcare workers (HCWs) are frequently in the close proximity of the patient, especially when giving care.

HCWs wear personal protective equipment (PPE), like masks, gloves, gowns, head coverings etc. to protect themselves against infections while working in airborne infection isolation rooms. However, PPEs do not guarantee complete protection against airborne infections as masks may leak or eyes be left unprotected, which is why complementary protection is needed. Well-designed ventilation can provide this complementary protection against airborne infections.

Effective supply air distribution should flush the HCW breathing zone with fresh air, mix and dilute the high contaminant concentrations originating from the patient already close to the source and direct the contaminants towards the exhausts. With careful design of HVAC systems, especially the supply air distribution, ventilation can offer complementary protection for HCWs and reduce the exposure to airborne infections in isolation rooms.

In this research the effect of the supply air distribution mode, diffuser location and HCW position on room air flow patterns, dispersion of airborne contaminants exhaled by the patient and HCW exposure to airborne pathogens exhaled by the patient was studied in hospital isolation room environment. The impact of the supply air distribution mode was examined by studying two different types of air distribution modes: overhead mixing ventilation and local downward ventilation. The effect of the supply air diffuser's location on the performance of the two air distribution modes was investigated by installing the diffusers in three locations inside the isolation room: in the middle of the ceiling, over the patient bed and far away from the patient (to the other side of the room). The effect of the HCW position on the exposure to airborne

contaminants exhaled by the patient was examined in four points: far away from the patient, at end of the patient bed, next to the patient bed and close to the patient (leaning over the patient, care giving scenario).

All the experiments were carried out in a full-scale isolation room model built to a ventilation laboratory. In the experiments, the HCW and the patient were simulated by breathing thermal manikins. The HCW exposure to the patient exhalation was assessed quantitatively with tracer gas measurements and qualitatively with smoke visualizations and computational fluid dynamics simulations. The thermal environment of the patient was assessed with thermal comfort and air velocity measurements.

Supply air distribution mode and diffuser location were found to have a significant effect on the dispersion of the patient exhalation. Hence, the air distribution mode and supply diffuser location were both found to have a significant effect also on the HCW exposure to airborne contaminants exhaled by the patient. The highest exposure was typically found close to the patient. The exposure was up to 10 times higher close to the patient than further away. In terms of exposure, local downward ventilation was found to perform equally well or even better than overhead mixing ventilation. However, the thermal comfort of the patient was found to vary significantly between the air distribution modes and was affected greatly by the diffuser location especially with local downward ventilation. Maintaining acceptable thermal comfort was found to be challenging with the local downward ventilation mode.

Overall, the results show that with careful design of the supply air distribution, the exposure of the HCW to airborne pathogens exhaled by the patient can be significantly reduced. The results can be utilized by infection control specialists in hospitals, facility managers, HVAC designers as well as product developers when designing isolation room ventilation and supply air distribution. Part of the results have already been utilized in the planning phase of the new European-wide hospital ventilation standard (CEN/TC 156/WG 18).

Esipuhe

Idea hankkeesta, jossa tutkittaisiin sairaaloiden eristystilojen ilmanjaon toimivuutta ja sen vaikutusta hoitajien altistumiseen ilmapölyille taudinaiheuttajille, syntyi aiempien sairaaloiden ilmanvaihtoon liittyvien hankkeiden aikana. Yleisesti merkittävänä tekijänä kaikille eristystiloihin liittyville tutkimuksille on toiminut eristystilojen käytön lisääntyminen viimeaikaisten maailmanlaajuisten pandemioiden ja epidemioiden (SARS-CoV, A/H1N1, MERS-CoV jne.) seurauksena. Lisääntynyt eristystilojen käyttö on myös lisännyt tarvetta selvittää erilaisten ilmanvaihtoratkaisujen toimivuutta tarkemmin. On havaittu, että esimerkiksi käytössä olevat ilmanjaon toteutukset eivät aina toimi optimaalisesti ilmapölyisten epäpuhtauksien leviämisen estämisen ja hoitajien suojautumisen kannalta. Suunnittelun tueksi tarvitaan ohjeita ja standardeja, mutta niiden laatimiseen tarvittavaa tutkimustietoa ei ole ollut saatavilla riittävästi.

Hankkeen toteutti Turun ammattikorkeakoulun sisäympäristön tutkimusryhmä. Vastuullisena johtajana toimi vanhempi tutkija Hannu Koskela, joka vastasi hankkeen hallinnoinnista ja tutkimuksen pääsuunnista. Hankkeen päätutkijana toimi Petri Kalliomäki, joka vastasi koejärjestelyistä, mittauksista, tulosten analysoinnista ja raportoinnista yhdessä vastuullisen johtajan kanssa. Lisäksi hankkeen toteuttamiseen osallistui tutkija Pekka Saarinen, joka vastasi tutkimuksessa suoritetuista virtausmallinuksista.

Tutkimuksen toteuttajat haluavat kiittää Työsuojelurahastoa hankkeen rahoittamisesta ja tuesta sen toteuttamiseksi. Lisäksi haluamme kiittää hankkeen ohjausryhmän jäseniä: Veli-Jukka Anttilaa Helsingin ja Uudenmaan sairaanhoitopiiristä, Kim Hagströmiä ja Harri Itkosta Halton Oy:stä, Janne Yli-Tokola ja Lauri Hautajärveä Ramboll Finland Oy:stä ja Esa Sandbergia Satakunnan ammattikorkeakoulusta. Kiitos aktiivisesta osallistumisesta ohjausryhmätyöskentelyyn ja asiantuntevista näkemyksistänne hankkeen eri vaiheita toteutettaessa. Kiitos myös Työsuojelurahaston Kenneth Johanssonille, joka toimi hankkeen valvojana rahoittajan puolelta. Yhteistyö kaikkien osallistujien kanssa toimi erittäin hyvin.

Turussa 28.5.2018

Petri Kalliomäki & Hannu Koskela

1 Johdanto

Eristystilojen tarve on kasvanut erityisesti viimeaikaisten pandemioiden ja epidemioiden (SARS-CoV, A(H1N1), MERS-CoV jne.) takia maailmanlaajuisesti. Pandemioiden yhteydessä on havaittu, että ilmaeristystiloja on liian vähän ja että ne ovat usein liian vanhoja. Esimerkiksi merkittävä osa Suomen ilmaeristystiloista on rakennettu 1960 ja -70 luvuilla (Salmi ym. 2012). Viime vuosina uusia ilmaeristystiloja on rakennettu paljon, ja myös tulevaisuudessa niitä tullaan toteuttamaan sairaaloihin entistä enemmän. Näin ollen yhä enemmän sairaalahenkilökuntaa työskentelee jatkossa ilmaeristystiloissa.

Sairaaloissa potilaat, joilla on ilmapälitteisesti tarttuva tauti, sijoitetaan tyypillisesti alipaineisiin ilmaeristystiloihin. Alipaineisuudella pyritään estämään ilman (ja siis ilmapälitteisten infektioiden) leviäminen viereisiin tiloihin ja siten muiden potilaiden, henkilökunnan ja vierailijoiden altistuminen näille patogeeneille. Alipaineisuudella ei kuitenkaan voida estää infektioriskiä eristystilan sisällä. Jotta henkilökunnan altistumista ilmapälitteisille infektiolle voitaisiin pienentää, pitää niitä vastaan suojautua monin tavoin ja monella eri tasolla. Turvalliset työskentelytavat ja suojautuminen henkilösuo-
jaimin (hengityssuojaimet, käsineet, suojavaatteet, päähineet jne.) eivät yksinomaan riitä, koska esimerkiksi hengityssuojaimet voivat vuotaa tai silmät jäädä suojaamatta, vaan tarvitaan myös muita menetelmiä varmistamaan toiminnan turvallisuus. Ilmaeristystiloissa ilmanvaihdon ja erityisesti ilmanjaon merkitys huonevirtauksiin ja siten ilmapälitteisten infektioiden leviämiseen on huomattava. Parantamalla ilmanvaihdon suunnittelua ja toteutusta voidaan yhdessä muiden suojautumismenetelmien kanssa luoda merkittävästi paremmat ja turvallisemmat työskentelyolosuhteet.

Sairaalainfektiot muodostavat huomattavan tautitaakan Suomessa ja maailmalla. Onkin arvioitu, että esimerkiksi Yhdysvalloissa esiintyy noin 700 000 sairaalainfektioita vuodessa (Magill ym. 2014). Vastaava luku on Suomessa noin 48 000 (Kanerva ym. 2008). Infektioilla on kolme tartuntareittiä: kosketus-, pisara- ja ilmapälitteinen tartuntareitti. Suurin osa tartunnoista tapahtuu tyypillisesti kosketuksen kautta eikä tarkkaa kuvaa ilmapälitteisten osuudesta ole (Beggs 2003, Fernstrom ja Goldblatt 2013). On kuitenkin arvioitu, että ilmapälitteisten tartuntojen osuus olisi merkittävä (Brachman 1971, Kundsinn 1980, Eickhoff 1994). Yskiessään, aivastaessaan ja myös

puhuessaan ihmiset vapauttavat ilmaan runsaasti erikokoisia pisaroita ja hiukkasia (Papinen ja Rosenthal 1997, Cole ja Cook 1998, Fitzgerald ja Haas 2005). Suurimmat hiukkaset laskeutuvat maahan lähellä lähdeä, mutta pienemmät pisarat kuivuvat nopeasti ja muodostavat pieniä pisaraytimiä (droplet nuclei), jotka voivat jäädä ilmaan leijumaan pitkäksikin aikaa (Wells 1934). Ilmassa nämä pienet pisaraytimet voivat kulkeutua ilmavirtojen mukana kauas lähtöpisteestä ja näin ollen vaikuttaa tautien leviämiseen ilmajälitteisesti pitkiäkin matkojen päähän (Xie ym. 2007).

Ilmanvaihdolla ja ilman liikkeellä rakennuksissa on todettu olevan selkeä yhteys ilmajälitteisten infektioiden leviämiseen (Li ym. 2007). Silti Suomessa ei ole käytössä kansallisia tai Euroopassa yhteisiä eristystilojen ilmanvaihdon standardeja tai suunnitteluohjeita. Tyypillisesti sovelletaan ulkomaisia ohjeita ja standardeja, hyödynnetään suunnittelijoiden aiempia kokemuksia ja otetaan huomioon sairaaloiden tapauskohtaiset vaatimukset ja tarpeet. Voimassa olevien standardien puuttuminen asettaa haasteita sairaaloille, uusien ratkaisuiden kehittämiseksi ja niiden viemiseksi käytäntöön. Tähän on kuitenkin havahduttu Euroopan tasolla ja käynnistetty virallinen sairaalailmanvaihdon standardointityö. Työryhmän (CEN/TC 156/WH 18) tavoitteena on luoda yhteiseurooppalaiset standardit terveydenhuollon sisäympäristölle ja asettaa niille minimivaatimukset. Standardit tulevat käsittelemään muun muassa sairaaloiden sisäilmaston ja ilmanvaihdon yleisiä vaatimuksia, leikkaussalien ilmanvaihtoa ja ilmastointia sekä erityistilojen kuten eristystilojen vaatimuksia.

Voimassa olevat ulkomaiset eristystilojen ilmanvaihdon suunnitteluohjeet ja standardit suosittelvat käytännössä sekoitettavaa ilmanvaihtoa (ASHRAE 170-2013, FGI 2014, CDC 2005, HBN 04-01 2013), jonka toiminta perustuu epäpuhtauksien sekoittamiseen ja nopeaan laimentamiseen. Lisäksi painesuhteilla pyritään varmistamaan ilmanvirtaussuunnat siten että epäpuhtaudet eivät pääsisi leviämään tilasta toiseen. Epäpuhtauksien laimentaminen ei välttämättä kuitenkaan aina toimi optimaalisesti ja tarpeeksi nopeasti. Onkin arvioitu, että erityisesti lähellä epäpuhtauslähdeä sekoitettava ilmanvaihto ei välttämättä takaa nopeaa epäpuhtauksien laimentamista (Richmond-Bryant 2006 A, Richmond-Bryant 2006 B). Erityisesti hoitoa annettaessa eristystiloissa työskentelevä henkilökunta joutuu usein läheisiin tekemisiin potilaiden kanssa, jolloin he saattavat altistua korkeille potilaasta peräisin oleville taudinaiheuttajien pitoisuuksille. Ilmanvaihdolla on kolme perustekijää, joilla pyritään vähentämään ilmajälitteisten epäpuhtauksien leviämistä (Etheridge ja Sandberg 1996, Awbi 2003, Eames et al. 2009):

- ilmanvaihtokerroin: tuomalla tilaan tarpeeksi puhdasta ilmaa pyritään epäpuhtauspitoisuudet laimentamaan mahdollisimman nopeasti
- vuotoilman virtaussuunnat: (ali)paineistamalla tiloja pyritään hallitsemaan ilman kulkeutumista rakennuksessa (ilman tulisi kulkeutua puhtailta alueilta kohti likaisempia)
- ilmanjako ja huonevirtauskuviot: puhdas ilma tulisi jakaa tilaan tehokkaasti niin että se suuntautuu hengitysvyöhykkeelle, huuhtelee koko huonetilaa ja niin että se kuljettaa epäpuhtaudet mahdollisimman tehokkaasti poistoon.

Ilmaeristystilojen huonevirtauksilla on siis suuri merkitys tiloja käyttävän sairaalahenkilökunnan altistumiselle ilmapälitteisille infektioille. Potilaasta peräisin olevat patogeenit eivät saisi levitä epäsuotuisien huonevirtausten seurauksena hallitsemattomasti vaan niiden tulisi kulkeutua poispäin hoitajan hengitysvyöhykkeeltä ja mahdollisimman suoraan poistoon. Usein ilmanvaihto suositellaankin toteutettavaksi jakamalla ilma huoneeseen siten että se kulkeutuu puhtaalta alueelta kohti likaista aluetta ja edelleen poistoon. Näin pyritään aikaansaamaan ilman ja mahdollisesti laimentumattomien epäpuhtauksien kulkeutuminen poispäin puhtaammassa tilassa olevien henkilöiden hengitysvyöhykkeeltä. Eristystiloissa käytettävä ilmanjakotapa sekä tulo- ja poistoilmaelinten tyyppi ja sijainti vaikuttavat ilmavirtauksiin ja ilman kulkeutumisuuntiin huoneen sisällä. Myös lämpökuormilla (hoitaja, potilas, valaisimet, monitorintilalaitteet, aurinkokuorma jne.) on merkittävä vaikutus virtauskenttään. Ulkomaisissa ohjeissa ei ole kuitenkaan annettu selkeitä ohjeita ilmanjakotavoista tai tulo- ja poistoilmaelinten tyypeistä ja sijainneista. Käytännössä onkin huomattu, että eristystilojen ilmanjako ei aina toimi kuten on suunniteltu ja ilma voi kulkeutua potilaasta kohti hoitajaa ja huoneen ovea (Kokkonen ym. 2014). Tällöin hoitaja saattaa altistua korkeillekin potilaasta peräisin oleville epäpuhtauspitoisuuksille ja oven avauksen yhteydessä ilmapälitteiset taudinaiheuttajat voivat kulkeutua ulos eristystilasta (Kokkonen ym. 2014, Kalliomäki ym. 2016) ja aiheuttaa infektioriskiä tilan ulkopuolella (Tang ym. 2005).

Monesti suunnitteluohjeet eivät ota tarkasti kantaa ilmanjaon toteutukseen tai ne kuvaavat tulo- ja poistoilmaelinten sijoittelun liian yleisesti, vaikka ilmanjako vaikuttaa merkittävästi ilmapälitteisten infektioiden leviämiseen ja niille altistumiseen (Aliabadi ym. 2011). Tämä voi osittain johtua siitä, että toistaiseksi ei ole ollut yh-

teistä näkemystä siitä mihin päätelaitteet tulisi eristystilassa sijoittaa optimaalisen ilmanjaon ja olosuhteiden saavuttamiseksi. Esimerkiksi Yhdysvaltalaisen CDC:n (Center for Disease Control and Prevention) ohje mainitsee monta erilaista toteutustapaa kuten esimerkiksi horisontaalisen ilmanjaon, jossa ilma puhalletaan vaakatasossa huoneen läpi seinälle asennetuilla tuloilmahajottimilla ja poistetaan vastakkaisella seinällä olevilla poistoilla, tai katosta vertikaalisesti alaspäin puhaltavan ilmanjaon, jossa poistot ovat lähellä lattiaa potilassängyn päädyn puoleisessa seinässä (CDC 2005). Ilmanjakotavoissa on kuitenkin haasteensa. Esimerkiksi horisontaalisia tai vertikaalisia ilmavirtoja on vaikea hallita, koska virtausesteet ja lämmönlähteet sekoittavat suunniteltuja virtauskuvioita. Lisäksi tällaiset ilmanjaot vaativat suuria ilmavirtoja ja puhalluspintoja toimiakseen suunnitellulla tavalla. Onkin havaittu, että horisontaalinen (Huang & Tsao 2005) tai vertikaalinen (Qian ym. 2006, 2008) ilmanjako eivät aina toimi optimaalisesti. Toisaalta on havaittu myös, että paikallisesti alaspäin puhaltamalla voidaan tuottaa tehokas ilmanjako tilaan (Qian ym. 2010), mutta tällöin päätelaitteiden sijoittelulla on erittäin suuri vaikutus ilmanvaihdon tehokkuuteen. Esimerkiksi Qian ym. (2008, 2010) ovat havainneet, että katossa sijaitsevat poistot tuottavat paremman ilmanvaihtotehokkuuden kuin lattiatason poistot. Toisaalta Cheong ja Phua (2006) havaitsivat että katosta alaspäin puhaltava ilmanjako ja lattiatason poistot toimivat tehokkaammin kuin ylhäällä tai katossa olevat poistot. Selvästi tulo- ja poistoilmapäätelaitteiden sijoittelussa eristystiloissa onkin vielä paljon tutkittavaa.

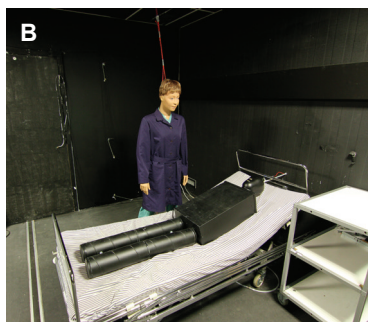
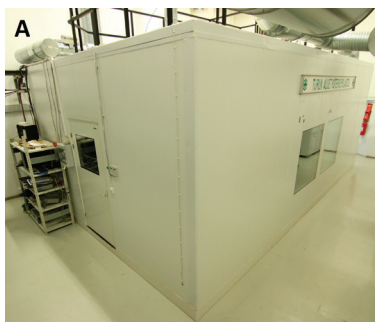
Tässä projektissa tutkittiin tuloilmanjaon vaikutusta sairaalahenkilökunnan altistumiselle ilmapölyille infektioille sairaaloiden eristystiloissa. Suojaavan ilmanjaon kehittämistä varten erilaisia ilmanjakotapoja (sekoittava, paikalliset ratkaisut) tutkittiin laboratorio-olosuhteissa. Paikallisilla ratkaisuilla oli tarkoitus huuhdella tehokkaammin hengitysvyöhykettä, laimentaa korkeita pitoisuuksia lähellä lähdettä ja näin ollen pienentää mahdollista suoraa altistumista potilaasta peräisin oleville epäpuhtauksille. Eri ilmanjakotapojen (sekoittava, alaspäin puhaltava) ja tuloilmapäätelaitteiden paikan vaikutusta eristyshuoneen virtauskuvioihin, -nopeuksiin ja ilmapölyisten epäpuhtauksien leviämiseen tutkittiin savuvisualisointien, CFD-mallinnusten ja ilman liikenopeusmittausten avulla. Hoitajan altistumista potilaan uloshengittämille ilmapölyille infektioille kartoitettiin merkkikaasumittauksin eri puolella eristystilaa. Ilmanvaihdon toimivuutta potilaan näkökulmasta tarkasteltiin lämpöolosuhteilla.

2 Menetelmät

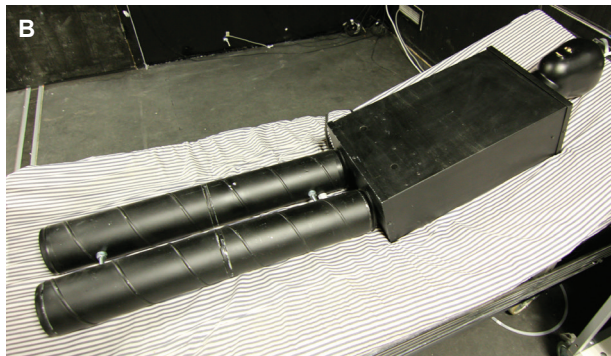
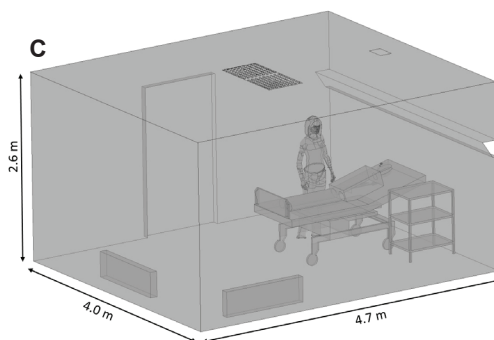
2.1 Eristystilamalli

Tutkimushankkeen kokeet suoritettiin Turun ammattikorkeakoulun ilmastointilaboratoriossa sijaitsevassa koehuoneessa (kuva 1 A), jolla mallinnettiin tyypillistä sairaalan eristystilaa (Salmi ym. 2012). Koehuone oli rakennettu tiiveistä puhdastilaelementeistä ja sen sisälle oli rakennettu yksinkertainen sairaalan eristystilamalli, johon kuului potilas, potilassänky, pöytä ja hoitaja (kuva 1 B). Huone oli 4 m pitkä, 4.7 m leveä ja 2.6 m korkea (kuva 1 C). Huone oli maalattu mustaksi savuvisuallisoiteja varten.

Kokeissa hoitajaa ja potilasta simuloitiin hengittävillä lämpönukeilla (kuva 1 B). Hoitajanukkena käytettiin realistista hengittävää lämpönukkea (Pernille, PT Teknik A/S, Tanska) (kuva 2 A), jonka lämpötilaa voitiin säätää tietokoneohjelman avulla. Kokeissa käytettiin ”Comfort”-tilaa, jossa nuken lämpötila vastaa ihmisen lämpötilan käyttäytymistä. Lisäksi hoitajanukkeen oli yhdistetty letkuilla kaksi tietokoneohjattua pumppua, jotka mahdollistivat ulos- ja sisäänhengityksen sieraimien ja suun kautta. Potilasta simuloitiin yksinkertaisemmalla lämmitettävällä peltinukella (kuva 2 B), johon oli myös liitetty ulos- ja sisään hengityksen mahdollistavat pumput sekä realistiset suu- ja nenäkappaleet. Hoitajan ja potilaan hengitystiheydeksi asetettiin noin 14 kertaa/min (hengityssykli: 1.9 s ulos, 0.2 s tauko, 1.9 s sisään, 0.2 s tauko) ja hengityksen ilmavirraksi noin 10 L/min, jotka vastaavat tyypillisiä paikoillaan olevan aikuisen hengitysparametreja (Gupta et al. 2010, Xu et al. 2014). Hoitaja hengitti sisään nenän kautta ja ulos suun kautta. Potilas puolestaan hengitti ulos ja sisään nenän kautta. Sekä hoitajan että potilaan uloshengityksen lämpötilaa voitiin säätää lämmittimellä. Uloshengityksen lämpötilaksi säädettiin 34 °C, joka on lähellä tyypillistä uloshengitysilman lämpötilaa (Höppe 1981). Kokeissa potilas makasi selällään vuoteella, jonka selkänoja oli kohotettu n. 20 astetta vaakatasosta ylöspäin. Hoitajan paikkaa vaihdeltiin huoneen sisällä ja altistumista ilmalähteille infektioille arvioitiin neljässä kohtaa: kaukana potilaasta, potilassängyn jalkopäässä, potilaan vieressä ja nojaamassa potilaan ylle.



KUVA 1.
Eristystilamalli kuvattuna ulkoa (A) ja sisältä (B). Huoneen mitat esitettynä alimmassa kuvassa (C).

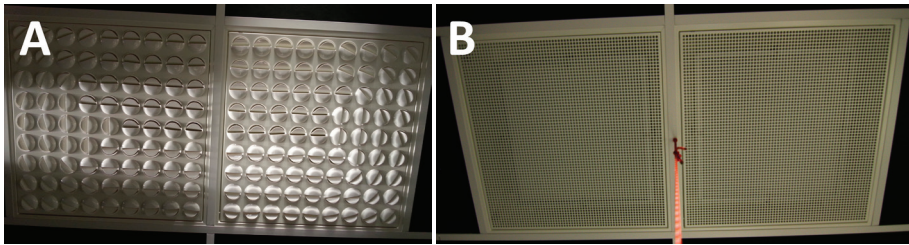


KUVA 2.
Hoitajanukke (A) ja potilasnukke (B).

Tutkimuksessa tarkasteltiin kahta erilaista tuloilman jakotapaa: kattoa pitkin puhaltavaa sekoittavaa ilmanjakoa ja paikallisesti alaspäin puhaltavaa ilmanjakoa. Ilmaeristystiloissa toimivan ilmanjaon tulisi huuhdella tehokkaasti hoitajan hengitysvyöhykettä puhtaalla ilmalla ja laimentaa potilaasta peräisin olevat epäpuhtaudet mahdollisimman tehokkaasti jo lähellä lähdettä ja ohjata ne pois päin hoitajasta mieluiten kohti poistoa. Tulohajottimien paikan vaikutusta tutkittiin sijoittamalla hajottimet joko: keskelle huonetta, potilassängyn yläpuolelle tai kauas potilaasta. Tulohajottimet koostuivat kahdesta samanlaisesta vierekkäin sijoitetusta 60 x 60 cm päätelaitteesta. Sekoittavalle ilmanjaolle päätelaitteessa käytettiin suuttimista koostuvaa etulevyä (kuva 3 A) ja paikalliselle alaspäin puhaltavalle ilmanjaolle rei'itettyä etulevyä (kuva 3 B). Monisuutinhajottimen suuttimet suunnattiin niin, että tuloilma levisi joka puolelle huonetta.

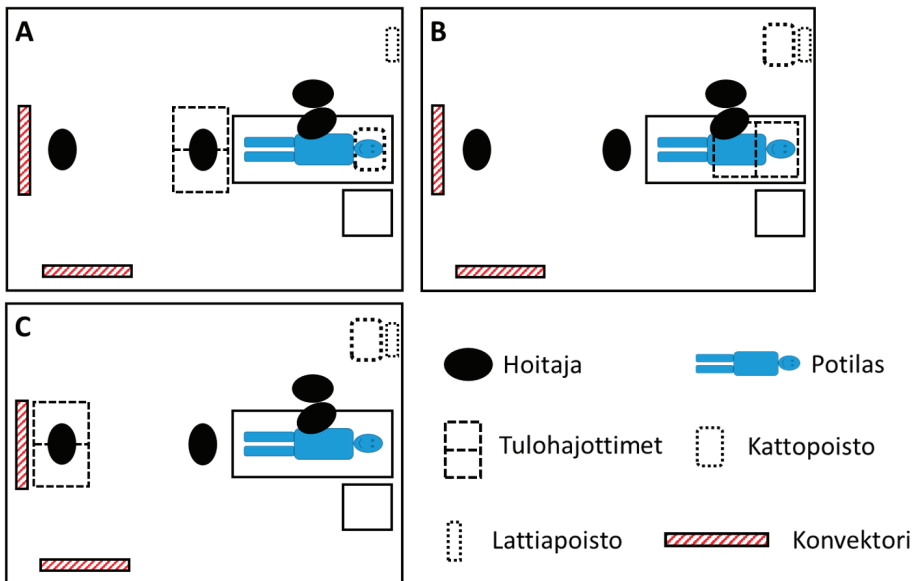
Ilma poistettiin huoneesta kahden poistoilmasäleikön kautta (ala- ja yläpoisto). Yläpoisto oli sijoitettu huoneen kattoon ja se toimi tilan pääpoistona. Yläpoiston lisäksi käytössä oli alapoisto, joka oli sijoitettuna huoneen alaosaan ja jonka tarkoituksena oli simuloida tyypillistä WC:n oven alta tapahtuvaa poistoa. Kuvassa 4 on havainnollistettu hoitajan, potilaan, tulohajottimien ja poistosäleikköjen sijainnit eristystilassa.

Tuloilmavirraksi asetettiin 169 L/s, joka vastaa noin 12-kertaista ilmanvaihtoa tunnissa mikä on tyypillinen suositus ulkomaisissa eristystilojen ilmanvaihdon suunnitteluohjeissa (esimerkiksi ASHRAE 170-2013). Yläpoiston (pääpoiston) ilmavirraksi asetettiin 148 L/s ja lattiapoiston 38 L/s, jolloin kokonaispoistoksi tuli 186 L/s. Tuloilmamäärää suuremmalla poistoilmamäärällä säädettiin eristystila noin 10 Pa alipaineiseksi ympäröiviin tiloihin nähden. Eristystilaan asetettiin 800 W lämpökuorma, joka koostui hoitajasta (90 W), potilaasta (90 W), valaisimista (110 W) sekä aurinkokuormasta ja monitorointilaitteista (510 W) joita simuloitiin huoneen reunoille sijoitetuilla kahdella konvektorilla. Tuloilman lämpötilaksi säädettiin 19.0 °C, jolloin poistoilman lämpötila asettui 22.5 °C:een (tuloilman alilämpöisyys 3.5 °C). Lämpötilat mitattiin tulo-, poisto- ja huoneilmasta termistoreilla (Craftemp, Sweden, ±0.2 °C tarkkuus).



KUVA 3.

Kattoa pitkin puhaltava monisuutinhajotin (A) ja paikallisesti alaspäin puhaltava reikälevyhajotin (B).



KUVA 4.

Hoitajan, potilaan, lämmittimien (konvektorit), tulohajottimien ja poistosäleikköjen sijainnit eri koetilanteissa (A: hajottimet keskellä huonetta, B: hajottimet potilaan päällä ja C: hajottimet kaukana potilaasta).

2.2 Savuvisualisoinnit

Savuvisualisointeja on käytetty pitkään ilman liikkeiden tutkimuksessa ja ne on todettu käytännöllisiksi virtausten havainnollistamisessa (Smits ja Lim (eds.) 2000). Tässä tutkimuksessa savuvisualisointien avulla havainnollistettiin potilaan uloshengitysilman leviämistä ja tuloilman heittokuvioita huoneessa. Savukokeiden avulla voitiin arvioida kvalitatiivisesti hoitajan altistumista potilaan uloshengitysilmaalle. Kokeissa savu tuotettiin savukoneella (Martin Magnum 550, Martin Pro-Smoke Super ZRMix fluid, Martin, Tanska). Kone tuotti paksun mutta neutraalin nosteen omaavan savun, joka sopi hyvin ilmavirtausten havainnollistamiseen. Savuhiukkasten kokojakaamaa ei mitattu erikseen, mutta valmistajan tuoteselosteen mukaan (Product document, Martin) keskimääräinen hiukkaskoko oli noin 1.5 µm. Näin ollen keskimääräinen hiukkaskoko oli niin pieni, että hiukkaset eivät laskeutuneet gravitaation vaikutuksesta alaspäin vaan pysyivät ilmassa ja pystyivät seuraamaan ilmavirtoja hyvin. Savukone sijoitettiin koehuoneen ulkopuolelle, jotta välttyttiin ylimääräisiltä ja huonevirtauksia sekoittavilta lämpökuormilta koehuoneessa.

Tarkasteltaessa potilaan uloshengityksen leviämistä lisättiin savua nuken uloshengitykseen. Tuloilman heittokuvioita tarkasteltaessa savu syötettiin suoraan tulokanavaan, josta se virtasi hajottimien kautta huoneeseen. Valaisemalla haluttu alue (taso) huoneesta savun liikkeitä voitiin tarkastella tällä tasolla, ja näin ollen pystyttiin havainnollistamaan uloshengityksen leviämistä eristystilassa. Valaisuun käytettiin savuvisualisointeja varten kehitettyjä LED-valaisimia, joilla voitiin rajata tarkasteltava alue. Valaisimet sijoitettiin mahdollisimman kauas tutkittavasta alueesta, jotta ne eivät häiritsisi alueen virtauksia. Savun leviäminen videoitiin järjestelmäkameralla (Canon 7D, Canon Inc., Japani). Koska käytössä oli vain yksi kamera, saman koetilanteen visualisoinnit eri kuvakulmista suoritettiin peräkkäisissä kokeissa. Visualisointien ajaksi myös kamera sijoitettiin tarpeeksi kauas tarkasteltavasta alueesta, jottei se häirinnyt tason ilmavirtauksia.

2.3 Hoitajien havainnointi

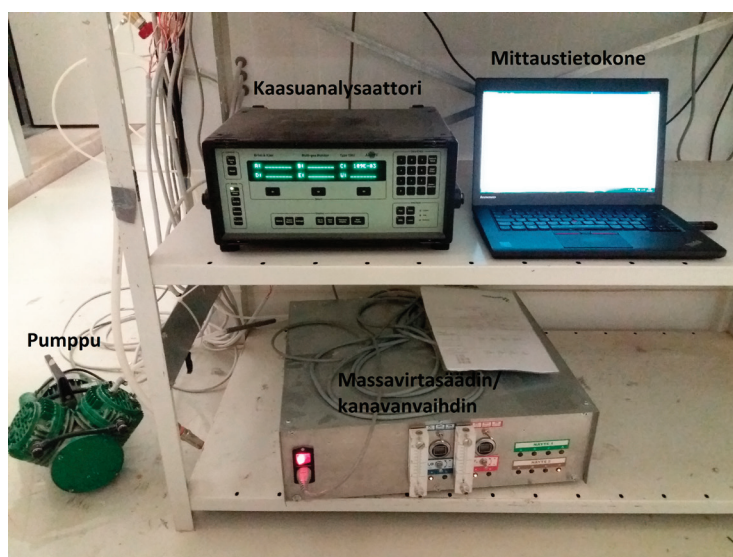
Hankkeen alussa havainnoitiin sairaalalohenkilökunnan työskentelyä eristystiloissa. Havainnointien avulla oli tarkoitus kerätä tietoa siitä, missä päin eristyshuonetta sairaalalohenkilökunta tyypillisesti käyttää aikaa ja kuinka kauan keskimääräinen vierailu eristystilassa kestää. Kerättyjä tietoja käytettiin myöhemmin mittausten yksityiskohtaisessa suunnittelussa ja toteuttamisessa. Havainnointi tapahtui Meilahden kolmiosairaan infektio-osastolla 2 B. Ennen havainnoinnin aloittamista hoitajalta ja potilaalta kysyttiin lupa tarkkailuun. Tarkkailu tapahtui hoitajien kansliasta valvontakameran avulla.

2.4 Merkkikaasumittaukset

Hoitajan altistumisen ja ilmanjaon toimivuuden arvioinnin kannalta tärkeimpiä mittauksia olivat merkkikaasumittaukset. Mittausten avulla määritettiin kvantitatiivisesti potilaan uloshengittämän merkkikaasun kulkeutuminen hoitajan sisäänhengitykseen ja huoneen poistoihin. Merkkikaasun on todettu jäljittelevän hyvin pienten hiukkasten ja aerosolien kulkeutumista ja näin ollen siis ilmajälitteisten epäpuhtauksien leviämistä ilmajvirtausten mukana (Noakes ym. 2009, Zhang ym. 2009, Bivolarova ym. 2017).

Turun ammattikorkeakoulun ilmastointilaboratorion merkkikaasulaitteistoa on esitetty kuvassa 5. Laitteistoon kuului massavirtasäätimen sisältävä kanavavaihdin, kaasuanalysointilaite (Brüel&Kjær model 1302, Brüel&Kjær, Tanska), pumppu, mitaustietokone ja kaasupullo (ei kuvassa). Mittauksissa potilaan uloshengitykseen annosteltiin massavirtasäätimellä merkkikaasua (SF₆) ja sen annettiin levitä eristys-tilaan uloshengityksen ja huonevirtausten mukana. Ennen mittausten aloittamista odotettiin, että merkkikaasupitoisuus oli saavuttanut tasapainopitoisuuden eristystilassa. Tämän jälkeen aloitettiin varsinainen mittaus. Merkkikaasupitoisuutta mitattiin kaasuanalysointilalla hoitajan sisään hengittämästä ilmasta ja huoneen poistoilmasta. Merkkikaasuanalysointilalla näytteenottoväli oli noin 40 s. Tilastollisen luotettavuuden kasvattamiseksi ja ajallisten vaihteluiden huomioimiseksi (Kierat ym. 2018) merkkikaasupitoisuutta mitattiin hoitajan sisään hengitysilma-asta tunnin ajan. Pitkä seuranta-aika oli tarpeen, koska syklinen päästö uloshengityksen mukana aiheutti pitoisuusvaihteluita erityisesti lähellä potilasta. Poistojen merkkikaasupitoisuuksia mitattiin puolen tunnin ajan ennen ja jälkeen hoitajan sisäänhengityspitoisuusmittausta.

Uloshengitysilman lämpötila vaihtelee ympäristön lämpötilan mukaan, mutta on noin 34 °C tyypillisessä 22 °C:n huonelämpötilassa (Höppe 1981). Tällöin uloshengitysilman tiheys (1.14 kg/m³) on pienempi kuin ympäröivän huoneilman (1.19 kg/m³), jolloin tiheyseron aiheuttama noste nostaa uloshengitysilmaa ylöspäin ja vaikuttaa siis uloshengityksen leviämiseen huoneessa. Huonelämpötilassa (22 °C) merkkiaineena käytetyn puhtaan kaasun (SF₆) tiheys (6.17 kg/m³) on huomattavasti korkeampi kuin ilman (1.19 kg/m³). Jotta huoneeseen saatiin tarpeeksi korkea ja taustasta selkeästi erotettava merkkikaasupitoisuus, jouduttiin potilaan uloshengitykseen annostelemaan huomattava määrä puhdasta merkkiainetta (0.15 L/min) suhteessa uloshengityksen ilmavirtaan (10 L/min). Korkean merkkikaasupitoisuuden takia potilasnuken uloshengittämän seoksen tiheys oli 1.22 kg/m³ ja siis merkittävästi suurempi kuin tyypillisen uloshengitysilman (1.14 kg/m³). Tiheyseron takia uloshengitysilma ei olisi levinnyt tilaan realistisesti. Tiheysero kompensoitiin lämmittämällä potilaan uloshengitysilma 50 °C:een, jolloin seoksen tiheys pieneni samalle tasolle normaalin uloshengityksen tiheyden kanssa (1.14 kg/m³) ja uloshengityksen virtaus käyttäytyi normaaliin tapaan. Hoitajanuken uloshengitysilma lämmitettiin 34 °C:hen, joka vastaa tyypillistä suun kautta uloshengitetyn ilman lämpötilaa (Höppe 1981).



KUVA 5.
Merkkikaasumittauslaitteisto.

Hoitajan altistumisen arvioinnissa käytettiin nk. altistusindeksiä (susceptible exposure index) Nazaroff ym. (1998) ja Qian H ym. (2010) mukaan. Indeksillä määrittelee altistujan sisään hengittämän epäpuhtauspitoisuuden suhteessa huoneen poistopitoisuuteen. Indeksillä lasketaan seuraavasti:

$$\mathcal{E} = \frac{C_{sish} - C_{tulo}}{C_{poisto} - C_{tulo}}, \quad (1)$$

missä C_{sish} on altistujan sisäänhengityksen epäpuhtauspitoisuus, C_{tulo} on huoneen tuloilman epäpuhtauspitoisuus ja C_{poisto} on huoneen poistoilman epäpuhtauspitoisuus. Tasapainotilassa pitoisuuksille voidaan käyttää keskiarvopitoisuuksia. Koska käytetyn merkkikaasun (SF6) pitoisuus tuloilmassa oli hyvin lähellä nollaa, kaava (1) supistuu muotoon:

$$\mathcal{E} = \frac{C_{sish}}{C_{poisto}}. \quad (2)$$

Indeksissä altistujan sisään hengittämä epäpuhtauspitoisuus siis jaetaan poistoilman epäpuhtauspitoisuudella, jonka hyvin sekoittuneessa tilanteessa voidaan olettaa edustavan keskimääräistä huonepitoisuutta. Käytännössä poistoilman pitoisuus määritettiin molempien poistojen ilmavirroilla painotetun pitoisuuden keskiarvona. Kaavan (2) perusteella suuret indeksin arvot tarkoittavat korkeata altistumista potilaasta peräisin oleville ilmajäljenteille epäpuhtauspitoisuuksille ja pienet arvot alhaista altistumista. Indeksillä kuvaa loogisesti vastaanottajan altistumista (mitä suurempi indeksin arvo sitä voimakkaampi altistuminen) ja sen käyttö tutkimuksissa on lisääntynyt viime aikoina (Olmedo ym. 2012, Olmedo ym. 2013, Cao ym. 2015, Liu ym. 2017, Berlanga ym. 2017). Käytetty indeksillä on käänteisarvo tavallisemmalle paikalliselle ilmanvaihdon tehokkuuden indeksille (personal exposure index/local ventilation index) (Etheridge & Sandberg 1996, Brohus ym. 1997, Mundt ym. 2004), jota on niin ikään käytetty useissa tutkimuksissa (esimerkiksi Qian ym. 2006, 2008, Kokkonen ym. 2014). Valitsimme käyttöön altistusindeksin koska halusimme korostaa ilmanvaihdon toimivuutta altistujan näkökulmasta loogisemmin.

2.5 Lämpöolojen ja ilman liikenopeuden mittaukset

Ilmanvaihdon toimivuuden kannalta on tärkeää tietää myös minkälaiseksi potilaan lämpöolot muodostuvat erilaisilla ilmanjakotavoilla. Tuloilman jaolla on suuri merkitys ilmapölyisten epäpuhtauksien leviämässä, mutta myös huoneen olosuhteiden ja potilaan viihtyvyyden kannalta. Ilman lämpötila, nopeus ja turbulenssiasie vaikuttavat merkittävästi lämpöviihtyvyyteen ilmastoiduissa tiloissa (Fanger ym. 1988). Ilman lämpötilan tulisi olla sopivalla tasolla ja ilman liikenopeuden ja turbulenssin riittävän alhaisella tasolla, jotta lämpöympäristö koettaisiin viihtyisänä ja vedottomana. Korkeiden ilmanvaihtokertoimien takia eristystiloihin tuodaan huomattava määrä ilmaa, joten myös ilman liikenopeudet voivat nousta korkeiksi. Eristyspotilas voi viettää pitkiäkin aikoja eristystilassa, joten ilmanjako eristyshuoneessa pitää suunnitella huolella, jotta se ei aiheuttaisi vedon tunnetta tai liian viileitä tai lämpimiä olosuhteita.

Tässä tutkimuksessa paikalliset lämpöolosuhteet kartoitettiin lämpönuken avulla sekä mittaamalla ilman liikenopeudet potilassängyn luona. Lämpönuken avulla mitattiin ekvivalenttilämpötilat potilaan eri ruumiinosissa potilaan maattessa sängyllä. Ekvivalenttilämpötila kuvaa ilman lämpötilan, säteilylämpötilan ja ilman nopeuden vaikutusta ihmisen lämpötasapainoon. Lämpönukke oli jaettu 24 sektoriin paikallisten lämpötuntemusten mittaamiseksi. Nuken toimintaperiaate perustui lämpöhäviöiden mittaamiseen. Kokeissa nukke lämmitettiin ihmisen ihoa vastaavaan lämpötilaan (ottaen huomioon aktiviteettitaso ja käytetty vaatetus), ja lämpöhäviö kunkin sektorin kautta mitattiin. Nukkea voidaan käyttää useissa eri lämmitysmoodeissa. Näissä mittauksissa nukkea käytettiin ”comfort” -tilassa, jossa nuken lämmitys vastaa ihmisen lämpötilan käyttäytymistä. Potilaan lämpöolot mitattiin nuken maattessa sängyllä. Nuken aktiviteettitaso asetettiin arvoon 0.8 met, joka vastaa levossa olevan aikuisen aktiviteettitasoa (McMurray ym. 2014). Lämpöolomittausten aikana nukella oli yllään tyypillinen potilasvaatetus: ohuet pitkälahkeiset housut, ohut pitkähihainen paita, sukat ja alusvaatteet (alushousut ja rintaliivit). Kuvasta 6 on nähtävissä mittaustilanne, potilaan asento ja käytetty vaatetus. Arvioitu vaatteiden lämmöneristävyys oli n. 0.5 clo (ASHRAE 2001).



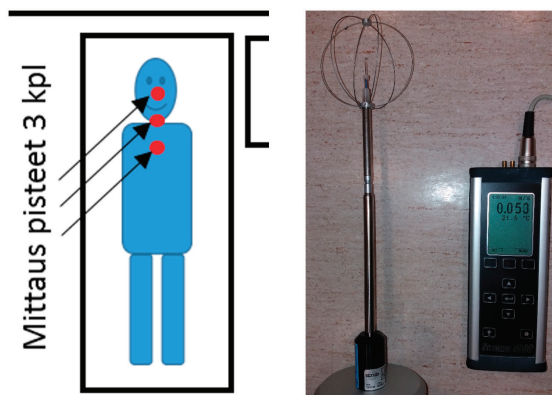
KUVA 6.

Potilaan lämpöviihtyvyyttä tutkittiin mittaamalla lämpöolot lämpönuken avulla potilassängyllä.

Myös ilman liikenopeus ja turbulenssin intensiteetti vaikuttavat koettuihin lämpöoloihin (Fanger et al. 1988) aiheuttaen paikallista vedon tuntemusta. Ilman liikenopeudet mitattiin potilassängyn luona potilaan yläruumiin alueella (kuva 7). Hajottimien ollessa keskellä huonetta nopeudet mitattiin myös jalkojen alueelta (jalkaterän, nilkan ja säären kohdalta). Nopeudet mitattiin Swema 3000 (Swema, Sweden) mittarilla, johon oli kiinnitettyä SWA 03 (Swema, Sweden) kuumapalloanemometri (kuva 7). Ilman liikenopeudet mitattiin soveltaen standardia EN ISO 7726.

2.6 Virtaussimuloinnit

Kokeellisten mittausten lisäksi hankkeessa tehtiin myös virtaussimulointeja (CFD, Computational Fluid Dynamics). CFD-simulointi on yleistyvä tietokonepohjainen laskennallinen menetelmä, jossa ratkaistaan numeerisesti nesteitä tai kaasuja (kuten ilmaa) hallitsevat virtausyhtälöt, jolloin voidaan tutkia niiden virtauksia ja niissä tapahtuvia ilmiöitä. Virtauslaskenta mahdollistaa tutkittavien tapausten tarkemman ja yksityiskohtaisemman tarkastelun koko tarkastelualueen (eristystilan) laajuudessa.



KUVA 7.

Ilman liikenopeuden mittauspisteet ja käytetty mittari (Swema 3000) ja anturi (SWA 03).

Mallinnukset aloitettiin luomalla yksityiskohtainen geometria eristystilamallista (kuva 8). Geometriaan sisältyi huone, hoitaja, potilas, potilassänky, pöytä ja valaisinpaneeli samoin kuin mittauksissa. Hoitaja sijoitettiin seisomaan sängyn viereen ja potilas selinmakuulle sängylle kuten merkkikaasumittauksissa. Hoitajalle ja potilaalle tehtiin malliin myös suu ja sieraimet hengityksen simuloimista varten.

Huonetilan verkotuksessa käytettiin tetraedri-verkkoa, joka on havainnollistettu kuvassa 9. Yhteensä tilaan tuli 1.7 miljoonaa laskentapistettä (node). Verkotuksessa tuloilmahajottimen läheisyyteen lisättiin verkon tihennys, jotta tuloilman heitto-kuvio voitaisiin mallintaa tarkasti. Lisäksi potilaan ja hoitajan hengitysvyöhykkeellä, potilassängyn päällä, oli verkon tihennys, jotta myös potilaan uloshengittämän merkkikaasun leviäminen voitaisiin mallintaa mahdollisimman tarkasti. Hoitajan altistumisen kannalta tämä oli mielenkiintoinen alue, koska lähellä lähdettä epäpuh-tauspitoisuus voi säilyä suurena, jos ilmanvaihto ei pysty sekoittamaan ja laimentamaan ilmaa tehokkaasti heti potilaan pään läheisyydessä.

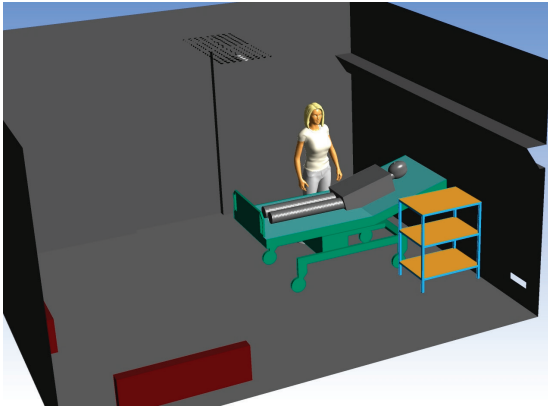
Tilanteiden mallinnus suoritettiin ajasta riippuvana käyttäen kokoonpuristumatonta URANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes) ja LES (Large Eddy Simulation) -ratkaisijoita. URANS-mallinnuksessa turbulenssin ratkaisemiseksi käytetään turbulenssimalleja, kun taas tarkemmassa, mutta laskennallisesti raskaammassa LES-mallinnuksessa pyörteiden virtaus ratkaistaan ja ainoastaan laskentakoppeja pienemmät pyörteet mallinnetaan ns. alihilamallilla. Yleensä LES-mallinnus antaa

realistisemmän kuvan tutkitusta tilanteesta ja erityisesti pienemmän skaalan vaihteiluista. Mallinnustilanteissa URANS:lle käytettiin SST-turbulenssimallia, jonka on todettu soveltuvan monipuolisesti erilaisten virtausten mallintamiseen kuten esimerkiksi huonevirtausten simuloimiseen (Zhai ym. 2007). LES-mallinnuksen alihilamallina käytettiin WALE-mallia (Wall-Adapting Local Eddy-viscosity), joka on kehitetty toimimaan hyvin myös pintojen lähellä (Nicoud ym. 1999) ja näin ollen soveltuu hyvin myös huonevirtausten mallintamiseen. URANS-mallinnusta käytettiin perustilanteen mallintamiseen ja ilmapvirtojen havainnollistamiseen ilman lämpökuormia. LES-mallinnusta käytettiin realistisempien tulosten saamiseksi ja havainnollistamaan epäpuhtauksien leviämistä lämpökuormien kanssa.

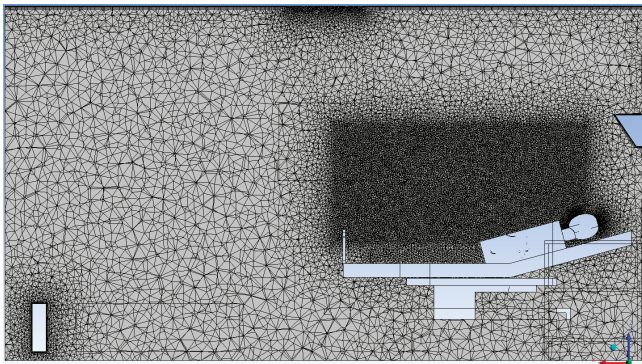
Mallinnuksissa hoitaja ja potilas laitettiin hengittämään kuten savu- ja merkkikaasukokeissa (ulos- ja sisäänhengityksen tilavuus 10 L/min ja hengitystiheys 14 1/min). Potilaan uloshengitykseen lisättiin merkkiainetta (passiivinen skalaari) simuloimaan uloshengitettyjä ilmapälitteisiä epäpuhtauksia. Epäpuhtauspäästön pitoisuudeksi asetettiin 15 000 ppm. Tämä vastasi merkkiainemittausten päästön pitoisuutta.

Mallissa tuloilmahajottimet sijoitettiin kattoon keskelle huonetta kuten mittauksissa. Mallinnukset suoritettiin vain suutinhajottimelle. Hajottimen tuloaukkojen (suuttimet) ilmapirta määritettiin siten että suutinten yhteenlaskettu tuloilmavirta vastasi kokeissa käytettyä ilmapirtaa 169 l/s. Reunaehdon toimivuus tarkistettiin vertaamalla mallinnustuloksia hajottimen lähialueella mitattuun nopeusjakaumaan. Myös poiston ilmapirraksi asetettiin 169 l/s. Muut pinnat määritettiin seiniksi (no slip wall). Sekä URANS- että LES-simuloinneissa käytettiin toisen kertaluvun aikadiskretointia. URANS-simuloinneissa käytettiin High resolution -paikkadiskretointia, joka on sekoitus Upwind ja Central difference -menetelmiä. LES-simuloinneissa paikkadiskretointina käytettiin Central difference -menetelmää. Mallinnuksissa käytettiin samoja lämpökuormia kuin itse mittauksissa: potilas 90 W, hoitaja 100 W, valaisimet, lämmittimet (konvektorit), laitteet ja aurinkokuorma 520 W (jaettiin tasaisesti kahdelle konvektorille). Yhteensä kuormat tuottivat n. 810 W tehon. Mallinnukset suoritettiin ANSYS CFX -ohjelmistolla.

Simulointien tuloksia käytettiin tilanteiden suunnitteluun ja epäpuhtauksien leviämisen havainnollistamiseen. Kokeelliset savuvisualisoinnit eivät anna täyttä kuvaa virtauksista koko huoneen mittakaavassa, eikä niiden tarkastelun kuvakulmaa voida vaihtaa jälkeinpäin, toisin kuin mallinnuksissa, jossa kuvakulman vaihtaminen myös jälkeinpäin on mahdollista ja helppoa.



KUVA 8.
CFD-simuloinneissa käytetty geometria.



KUVA 9.
CFD-simuloinneissa käytetty laskentaverkko. Verkossa on tihennys tuloilmahajottimen lähellä sekä potilaan ja hoitajan hengitysvyöhykkeellä.

3 Tulokset

3.1 Hoitajien observoinnit

Observointien tarkoituksena oli havainnoida henkilökunnan työskentelyä ja tarkkailla erityisesti sitä, missä he tyypillisesti oleskelevat eristystilan sisällä (suhteessa potilaaseen). Tarkkailu tapahtui kahtena päivänä hoitajien aamuvuoron aikana klo 8–15. Ensimmäisellä kerralla tarkkaillussa huoneessa oli varsin hyväkuntoinen pisaraeristyksessä oleva potilas, joka ei tarvinnut hoitajilta apua esimerkiksi WC-käynnin yhteydessä. Toisella kerralla tarkkaillussa huoneessa oli huonokuntoinen kosketuseristyksessä oleva potilas, joka tarvitsi hoitajien apua muun muassa WC-käynnissä.

Henkilökunta vieraili tarkastelluissa huoneissa yhteensä 31 kertaa kahden tarkkailukerran aikana. Suurin osa vierailuista (19 kpl) tapahtui vuorossa olevan sairaanhoitajan ja lääkärin toimesta ja loput (12 kpl) muun henkilökunnan (näytteenottaja, laistotyöntekijä jne.) tai omaisten toimesta. Potilaan kunto vaikuttaa vierailujen määrään. Huonokuntoiset potilaat tarvitsevat enemmän apua, jolloin käyntien määrä kasvaa verrattuna parempikuntoisiin potilaisiin.

Keskimääräinen vierailun kesto oli noin 10 minuuttia (kaikkien vierailujen keskiarvo). Keskimääräinen hoitohenkilökunnan (vuorossa olevat sairaanhoitajat ja lääkärit) vierailun kesto oli noin 6 minuuttia. Kaikkien vierailujen keskimääräistä kesto nostivat omaisten vierailut, sillä ne olivat tyypillisesti kestoiltaan huomattavasti pidempiä kuin hoitohenkilökunnan käynnit. Huonokuntoisten potilaiden kohdalla myös henkilökunnan käynnin kesto kasvoi, koska hoitotoimenpiteet saattoivat olla vaativampia.

Tyypillisimpiä hoitajan sijaintipaikkoja olivat: sängyn sivu (potilaan lonkan taso), lähellä potilasta (antamassa hoitoa/avustamassa potilasta), sängyn pääty ja sijainti kaukana potilaasta. Henkilökunnan paikan määrittely oli suuntaa antava arvio, sillä usein henkilökunta liikkui hyvin paljon tilassa. Lisäksi hoitajien paikat riippuvat usein annettavasta hoidosta. Esimerkiksi haavaumien hoito pidentää käynnin kesto

ja siirtää henkilökunnan keskimääräistä paikkaa lähemmäs potilasta. Myös monet muut tekijät vaikuttivat oleskelupaikkoihin, esimerkiksi sängyn paikka huoneessa (oven sijainti suhteessa sänkyyn saattaa vaikuttaa siihen mihin kohtaan tai mille puolelle potilassänkyä henkilökunta asettuu) ja huonekalut (pöytä sängyn vieressä saattaa rajoittaa henkilökunnan työskentelyä ja siten sijoittumista potilaaseen nähden).

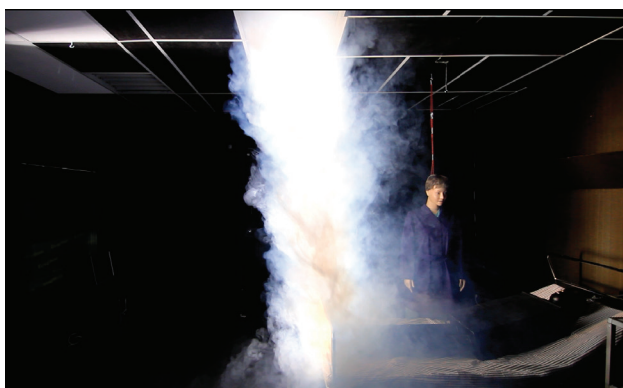
Havaintojen perusteella saatiin vain suppea otos henkilökunnan käynneistä eristystiloissa ja niiden perusteella on vaikea määritellä yhtä tiettyä paikkaa, jossa hoitajat tyypillisesti oleskelsivät. Vaikka havainnointikertoja ja havaintoja oli vähän, antavat ne silti karkean arvion siitä, missä henkilökunta huoneessa voisi keskimäärin oleskella. Tulosten perusteella tämän tutkimuksen kokeisiin valittiin neljä paikkaa, joissa hoitajan altistumista potilaasta peräisin oleville ilmajäljenteille infektioille tutkittiin: sängyn vieressä vyötärön kohdalla, sängyn vieressä nojautuen potilaan ylle (antamassa hoitoa), sängyn päädyssä ja kaukana potilaasta. Jatkossa tarvitaan kuitenkin lisää havaintoja henkilökunnan vierailuista eristystiloissa, jotta voidaan luotettavammin arvioida tyypillisimpiä oleskelupaikkoja ja ottaa ne huomioon eristystilojen suunnittelussa ja hoitajien työprosesseissa.

3.2 Savuvisualisoinnit

3.2.1 Huonevirtaukset

Kuvassa 10 on esitetty tuloilman heittokuviot kattoa pitkin (ylempi kuva) ja alas päin (alempi kuva) puhaltaville ilmanjakotavoille hajottimien ollessa keskellä huonetta. Ylemmästä kuvasta nähdään, että kattoa pitkin puhaltavan ilmanjaon tapauksessa tuloilma pysyy pitkään kattoon kiinnittyneenä. Kaukana potilaasta tuloilma törmää konvektorien synnyttämään virtaukseen ja irtoaa katosta hieman ennen seinää. Ilmanjako vaikutti kuitenkin sekoittavan huoneilmaa koko tilassa. Tuloilma ei kulkeudu suoraan potilaan tai hoitajan oleskeluvyöhykkeelle ja näin ollen ei näyttäisi aiheuttavan liian suuria liikenopeuksia ja vedon tunnetta. Toisaalta ilmanjako ei myöskään huuhtelee tehokkaasti potilaan ja hoitajan hengitysvyöhykettä, ja potilaan uloshengitysilma voi kulkeutua pitkällekin huoneeseen merkittävästi laimentumatta.

Alemmasta kuvasta nähdään, että alas puhalluksella tuloilma kulkeutuu katosta alaspäin kohti lattiaa. Tulosuihku kääntyy hieman kohti potilasta ja osa tuloilmasta kulkeutuu sängyn jalkopään päälle, josta se jatkaa liikettään kohti potilaan päätä. Tämä virtaus näytti huuhtelevan potilaan hengitysvyöhykettä, suuntaavan uloshengityksen pois hoitajan hengitysvyöhykkeeltä kohti seinää kuvan oikeassa reunassa ja siten pienentävän hoitajan altistumista potilaan uloshengitysilmaille. Sängyä pitkin kulkevan virtauksen muodostuminen riippuu kuitenkin hajottimen ja sängyn keskinäisestä sijainnista.



KUVA 10.

Savuisvisualisointi tuloilman leviämisestä kattoa pitkin (ylempi kuva) ja alaspäin (alempi kuva) puhaltavan ilmanjaon tapauksissa, kun hajottimet olivat keskellä huonetta.

Kuvassa 11 on esitetty tuloilman heittokuviot kattoa pitkin (ylempi kuva) ja alaspäin (alempi kuva) puhaltaville ilmanjaoille hajottimien ollessa potilassängyn päällä. Ylemmstä kuvasta nähdään, että kattoa pitkin puhallettaessa tuloilma kulkeutuu pitkälle huoneeseen pois päin potilaasta, mutta irtoaa katosta ennen kuin saavuttaa huoneen toisen pään (kuvan vasemmassa reunassa). Potilaan puoleisen päätyseinän puolella tuloilma törmää nopeasti seinään ja kulkeutuu sitä pitkin alaspäin. Seinällä potilassängyn yläpuolella oleva valaisinpaneeli kuitenkin kääntää virtauksen pois seinästä ja siten estää ilman kulkeutumisen suoraan potilaan päälle. Tällainen seinästä ulos tuleva valaisinpaneeli on yleinen potilashuoneissa ja on tyypillisesti sijoitettuna potilassängyn yläpuolelle. Visualisointien perusteella tuloilma näyttää jakautuvan huoneeseen ilman että liikenopeudet nousisivat liian suuriksi potilassängyn lähellä.



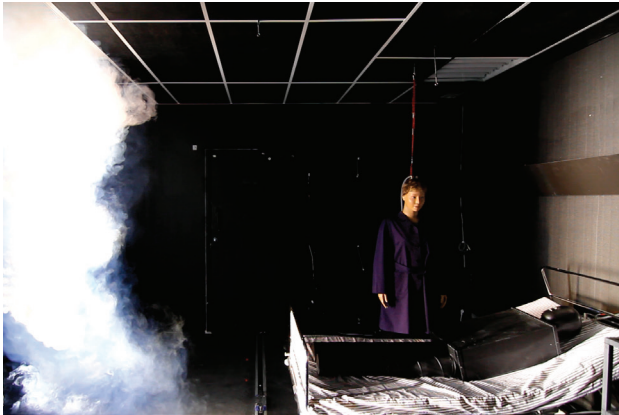
KUVA 11.

Savuisualisoinnit tuloilman leviämisestä kattoa pitkin (ylempi kuva) ja alaspäin (alempi kuva) puhaltavan ilmanjaon tapauksissa, kun hajottimet olivat potilassängyn yläpuolella.

Kuvan 11 alemmasta kuvasta nähdään, että alas puhalluksella tuloilma putoaa potilaan ylävartalon päälle ja näin ollen huuhtelee potilaan hengitysvyöhykettä tehokkaasti. Ilma kulkeutuu sängyltä lattiaa kohden, jota pitkin se leviää muualle huoneeseen. Ilman liikenopeudet ovat potilaan kohdalla huomattavia ja näin ollen tilanteessa potilaan lämpöolot saattavat viilentyä merkittävästi. Tarkempaa lämpöviihtyvyyden arviointia tarkastellaan myöhemmin omassa luvussaan (3.4.2).

Kuvassa 12 on esitetty tuloilman heittokuviot kattoa pitkin (ylempi kuva) ja alaspäin (alempi kuva) puhaltavalle ilmanjaolle hajottimien ollessa kaukana potilaasta huoneen toisella puolella. Ylemmästä kuvasta nähdään, että kattoa pitkin puhaltavan tuloilmanjaon tapauksessa ilma kulkeutuu kattoa pitkin huoneen toiselle puolelle potilassängyn luokse, jossa se ensin törmää seinään ja sen jälkeen irtoaa siitä valaisinpaneelin vaikutuksesta. Tuloilma ei näytä kulkeutuvan potilassängylle, jolloin se ei suoraan huuhtelee hengitysvyöhykettä eikä laimenna tehokkaasti potilaan uloshengitysilmaa heti potilaan lähellä. Kaiken kaikkiaan kattoa pitkin puhaltava tuloilma näyttäisi saavuttavan huoneen kauimmaisetkin alueet.

Alemmasta kuvassa nähdään, että alaspäin puhallettaessa ilma tippuu kohti lattiaa kaukana potilaasta, josta se jatkaa leviämistä muualle huoneeseen. Tuloilma ei huuhtelee tehokkaasti potilaan tai hoitajan hengitysvyöhykkeitä, mutta ilman liikenopeudet eivät myöskään nouse korkeiksi lähellä potilassänkyä (lattiatasoa lukuun ottamatta). Näin ollen viileä tuloilma ei suoraan kulkeudu potilaan luokse, jolloin mahdollisuus vedon tunteelle pienenee.



KUVA 12.

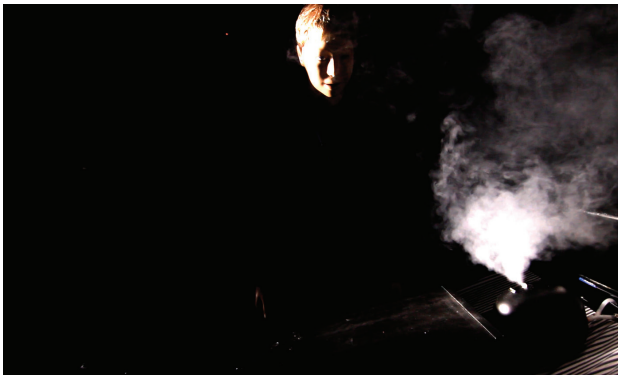
Savuvisualisoinnit tuloilman leviämisestä kattoa pitkin (ylempi kuva) ja alaspäin (alempi kuva) puhaltavan ilmanjaon tapauksissa, kun hajottimet olivat kaukana potilaasta toisella puolella huonetta.

Vaikka tuloilman heittokuvion savuvisualisoinnit havainnollistavat hyvin tuloilman jakautumista huoneeseen, ei niiden avulla voida tehdä tarkkoja johtopäätöksiä potilaan uloshengitysilman leviämisestä. Sitä varten tehtiin erilliset savuvisualisoinnit, joissa savu syötettiin suoraan potilaan uloshengitykseen ja sen leviäminen tallennettiin videokameralla.

3.2.2 Potilaan uloshengitysilman leviäminen

Kuvassa 13 on esitetty potilaan uloshengityksen leviäminen kattoa pitkin (ylempi kuva) ja alaspäin (alempi kuva) puhaltaville ilmanjaoille hajottimien ollessa sijoitettuna keskelle huonetta. Kattoa pitkin puhaltavan ilmanjaon tapauksessa (ylempi kuva) uloshengitysilma kulkeutuu sängyn poikki huoneen keskustaa kohden. Kuvan vasemmassa reunassa voidaan nähdä edellisen uloshengityksen jäännökset selvästi. Näyttää siltä, että potilaan uloshengitys ei sekoitu tehokkaasti lähellä lähdettä vaan voi kulkeutua kauas potilaasta merkittävästi laimenematta. Alaspäin puhaltavan ilmanjaon tapauksessa (alempi kuva) uloshengitysilma kääntyy pois hoitajan hengitysvyöhykkeeltä kohti sängyn päätä ja sen takana olevaa seinää, jota pitkin se kulkeutuu kattoa kohti. Alaspäin puhaltavan ilmanjaon tapauksessa suotuisamman epäpuhtauksien kulkeutumissuunnan aiheuttaa kuvassa 10 nähty osittain potilas-sängyn päälle kääntyvä tuloilman virtaus, joka kuljettaa potilaan uloshengityksen pois päin hoitajasta ja näin ollen näyttäisi pienentävän hoitajan altistumista korkeille potilaan uloshengitysilman epäpuhtauspitoisuuksille.

Kuvassa 14 on havainnollistettu potilaan uloshengityksen leviäminen kattoa pitkin (ylempi kuva) ja alaspäin (alempi kuva) puhaltavan ilmanjaon tapauksissa hajottimien ollessa potilassängyn yläpuolella. Kuten ylemmästä kuvasta nähdään, kattoa pitkin puhaltavan ilmanjaon tapauksessa potilaan uloshengitysilma kulkeutuu suoraan hoitajan hengitysvyöhykkeelle ja jatkaa kulkeutumistaan sen poikki kohti kattoa. Uloshengitysilma näyttää tunkeutuvan kauas potilaasta sekoittumatta merkittävästi. Tuloilmanjako ei näytä sekoittavan ilmaa potilaan hengitysvyöhykkeellä, eivätkä syntyneet huonevirtaukset ohjaa potilaan uloshengitysilmaa tehokkaasti pois hoitajan hengitysvyöhykkeeltä.



KUVA 13.

Potilaan uloshengityksen leviäminen kattoa pitkin (ylempi kuva) ja alaspäin (alempi kuva) puhaltavien ilmanjakojen tapauksissa, kun hajottimet olivat katossa keskellä huonetta.

Alemmasta kuvasta nähdään, että alaspäin puhaltava ilmanjako sekoittaa ja ohjaa tehokkaasti potilaan uloshengityksen pois päin hoitajan hengitysvyöhykkeestä kohti lattiaa. Lisäksi tuloilma huuhtelee potilaan ylle nojautuvan hoitajan hengitysvyöhykettä puhtaalla tuloilmalla ja näin ollen näyttäisi pienentävän merkittävästi hoitajan altistumista potilaan uloshengitysillemälle. Suoraan potilasta kohden puhallettava voimakas ilmavirta saattaa kuitenkin aiheuttaa herkästi veto- ja lämpöviihtyvyyso ongelmia. Yksi vaihtoehto tämän ongelman ratkaisemiseksi olisi käyttää alaspäin puhallusta vain hetkellisesti hoitajan ollessa paikalla huoneessa. Kuten aiemmin havaittiin, tyypillinen hoitajan vierailu kestää noin 6 minuuttia ja tämän ajan päällä oleva alaspäin puhallus voisi olla potilaan lämpöviihtyvyyden kannalta hyväksyttävissä. Potilaan lämpöoloja tarkastellaan yksityiskohtaisemmin myöhemmin omassa luvussaan (3.4.2).



KUVA 14.

Potilaan uloshengitysilman leviäminen kattoa pitkin (ylempi kuva) ja alaspäin (alempi kuva) puhaltavien ilmanjakojen tapauksissa, kun hajottimet olivat katossa potilassängyn yläpuolella.

Kuvassa 15 on esitetty potilaan uloshengitysilman leviäminen kattoa pitkin (ylempi kuva) ja alaspäin (alempi kuva) puhaltavan ilmanjaon tapauksissa hajottimien ollessa kaukana potilassängystä toisella puolella huonetta. Molemmissa tapauksissa, sekä kattoa pitkin että alaspäin puhallettaessa (ylä- ja alakuvat), potilaan uloshengitysilma kulkeutuu hoitajan hengitysvyöhykkeen poikki sängyn jalkopäätä ja huoneen keskustaa kohti samalla nousten ylöspäin kohti kattoa. Kummankaan ilmanjaon tapauksessa tuloilma ei siis suoraan huuhtelee, sekoita ja ohjaa uloshengitysilmaa pois päin hoitajan hengitysvyöhykkeeltä. Näin ollen hoitaja saattaa altistua korkeille potilaan uloshengittämille epäpuhtauspitoisuuksille ollessaan lähellä potilasta (antamassa hoitoa).



KUVA 15.

Potilaan uloshengityksen leviäminen kattoa pitkin (ylempi kuva) ja alaspäin (alempi kuva) puhaltavien ilmanjakojen tapauksissa, kun hajottimet olivat katossa kaukana potilaasta.

Hoitajan altistumista potilaan uloshengitysilmaalle hoitajan nojatessa potilaan ylle (hoitotilanne) on näissä savuvisualisoinneissa arvioitu vain yhdessä paikassa ja yhdestä kuvakulmasta. Hoitotilanne on kuitenkin yleensä kriittinen hoitajan kannalta, sillä usein hoitaja joutuu menemään varsin lähelle potilasta antamaan hoitoa, jolloin hänellä on suurempi todennäköisyys altistua korkeille epäpuhtauspitoisuuksille. On myös mahdollista, että potilaan uloshengitysilma kulkeutuu pitkällekin huoneeseen laimentumattomana, kuten voi käydä esimerkiksi syrjäyttävän ilmanjon kanssa (Qian H ym. 2006). Yleensä kuitenkin (muita ilmanjakoja käytettäessä) potilaan uloshengittämä epäpuhtauspitoisuus laimenee kauempana potilaasta (toisinaan hyvin nopeastikin) ja näin ollen altistuminen korkeille pitoisuuksille muualla huoneessa (kauempana potilaasta) on luultavasti vähäisempää. Lisäksi on muistettava, että vaikka savuvisualisoinnit on suoritettu tasapainotilanteessa, ne ovat kuitenkin vain hetkellisiä pysäytyskuvia tilanteesta, joka elää aina hieman. Kuvat on kuitenkin pyritty valitsemaan niin että ne edustavat mahdollisimman hyvin keskimääräistä tilannetta.

Esitetyillä savuvisualisoinneilla pystyttiin havainnollistamaan hyvin tuloilman heittokuviot ja potilaan uloshengitysilman leviäminen eri ilmanjakoja käyttäen. On kuitenkin huomattava, että savukokeet ovat kvalitatiivisia visualisointeja eivätkä näin ollen kerro suoraan kvantitatiivisesta altistumisesta, vaan tämän määrittämiseen tarvitaan mittauksia kuten merkkikaasumittauksia. Altistumisen tarkemmaksi määrittämiseksi suoritimmekin merkkikaasumittauksia, joiden tuloksista on keskusteltu tarkemmin seuraavassa luvussa.

3.3 Merkkikaasumittaukset

Merkkikaasumittausten tulokset on esitetty taulukossa 1 ja havainnollistettu kuvissa 16–18. Alle yhden olevat altistusindeksin arvot tarkoittavat, että hoitajan sisään hengittämä merkkikaasupitoisuus on keskimääräistä poistopitoisuutta pienempi ja ilmanvaihto toimii paikallisesti tehokkaasti (tuo puhdasta ilmaa hoitajan hengitysvyöhykkeelle ja/tai ohjaa epäpuhtaudet kohti poistoa). Yhden luokassa oleva altistusindeksi tarkoittaa, että hoitajan sisään hengittämä merkkikaasupitoisuus on samaa luokkaa keskimääräisen poistopitoisuuden kanssa. Tällöin ilmanvaihto toimii paikallisesti hyvin, eli sekoittaa ja laimentaa epäpuhtaudet tasaisesti. Jos altistusindeksi on yli yhden, hoitajan sisään hengittämä merkkikaasupitoisuus on suurempi kuin keskimääräinen poistopitoisuus, jolloin ilmanjako ei sekoita ja laimenna epäpuh-

tauspitoisuuksia tehokkaasti. Mitattuja pitoisuuksien vaihteluita on kuvattu keskihajonnalla, joka kertoo karkeasti pitoisuuden keskimääräisestä vaihtelusta keskiarvon ympäristössä. Yleisesti ottaen mitä suurempi keskihajonta on, sitä suurempi on pitoisuuden vaihtelu tarkastelupisteessä.

3.3.1 Hajottimet keskellä huonetta

Taulukon 1 vasemmassa reunassa ja kuvassa 16 on esitetty hoitajan altistusindeksit eri puolilla huonetta, kun hajottimet olivat sijoitettuina keskelle huonetta. Kattoa pitkin puhaltavan ilmanjaon tapauksessa altistusindeksin keskimääräiset arvot vaihtelivat välillä 0.82–5.24 riippuen hoitajan paikasta. Vastaavat pitoisuudet alaspäin puhaltavan ilmanjaon tapauksessa olivat 0.43–2.52 riippuen hoitajan paikasta huoneessa. Keskihajonnat vaihtelivat välillä 0.05–2.20 kattoa pitkin puhaltavalla ilmanjaolla ja välillä 0.06–1.10 alaspäin puhaltavalla ilmanjaolla.

Suurimmat pitoisuudet mitattiin hoitajan nojatessa potilaan ylle (hoitotilanne). Tällöin kattoa pitkin puhaltavan ilmanjaon tapauksessa altistusindeksi oli huomattavasti yli yhden (5.24), jolloin tuloilmanjako ei siis sekoittanut ilmaa tehokkaasti potilaan lähelle. Muualla huoneessa indeksin keskiarvot pysyivät merkittävästi matalampina eli tällöin potilaan korkea uloshengityspitoisuus oli jo laimentunut huomattavasti tai se ei kulkeutunut suoraan hoitajan hengitysvyöhykkeelle. Keskihajonnat kasvoivat sitä suuremmiksi mitä lähemmäs potilasta hoitaja meni ja olivat erityisen suuria hoitajan ollessa nojautuneena potilaan ylle. Muualla huoneessa keskihajonnat olivat pienempiä. Sekä keskiarvojen että keskihajontojen perusteella näytti siltä, että potilaan lähelle kattoa pitkin puhaltava ilmanjako ei huuhdellut hoitajan hengitysvyöhykettä puhtaalla ilmalla tai laimentanut potilaan uloshengitysilmaa tehokkaasti, jolloin hoitaja altistui korkeille potilaan uloshengityspitoisuuksille.

Myös alaspäin puhaltavan ilmanjaon tapauksessa (taulukko 1 ja kuva 16) hoitajan altistusindeksi kasvoi mitä lähemmäs potilasta mentiin. Altistusindeksi lähellä potilasta jäi kuitenkin pienemmäksi kuin kattoa pitkin puhallettaessa. Erityisen tehokkaasti ilmanjako näytti toimivan hoitajan ollessa sängyn jalkopäässä ja kaukana potilaasta. Molemmissa tapauksissa altistusindeksin keskiarvo oli huomattavasti alle yhden (0.43 ja 0.57). Sängyn jalkopäässä altistuminen oli vähäistä, koska hoitaja seisoi suoraan alaspäin puhaltavan tulohajottimen alla, jolloin hengitysvyöhykettä huuhdeltiin jatkuvasti puhtaalla tuloilmalla. Lisäksi tuloilma näytti synnyttävän huoneen takaosaan vyöhykkeen, jossa oli keskimääräistä puhtaampi ilma ja jonne

epäpuhtaudet eivät helposti kulkeutuneet. Näin ollen hoitajan altistuminen kaukana potilaasta jäi keskimääräistä alhaisemmaksi. Myös alaspäin puhaltavan ilmanjaon tapauksessa keskihajonnat kasvoivat mentäessä lähemmäs potilasta. Tulosten perusteella näytti siltä, että huoneen keskeltä alaspäin puhaltava tuloilma ohjasi epäpuhtaudet pois hoitajan hengitysvyöhykkeeltä (tästä havaittiin viitteitä jo savuvisuaalisointien kohdalla, ks. kuva 13 (alempi kuva)) ja näin ollen pitoisuuden vaihtelu hengitysvyöhykkeellä pieneni.

Kaiken kaikkiaan tulosten perusteella näytti siltä, että hajotinten ollessa sijoitettuna keskelle huonetta alaspäin puhaltava ilmanjako toimisi paremmin kuin kattoa pitkin puhaltava ilmanjako tarkasteltaessa hoitajan altistumista potilaan uloshengityksen mukana leviävillä ilmapölypartikkelisillä epäpuhtauksilla. On kuitenkin huomattava, että alaspäin suunnattu ilmanjako puhalsi ilmaa sängyn jalkopäähän potilaan nilkkojen alueelle. Ilman liike voi aiheuttaa vedon tunnetta ja näin ollen potilaan lämpöiihtyvyys saattaa olla huonompi kuin kattoa pitkin puhaltavan ilmanjaon tapauksessa jolloin tuloilmasuihku ei osu suoraan potilaan oleskeluvyöhykkeelle. Eri ilmanjakojen toimivuutta arvioitaessa tulisikin ottaa huomioon myös lämpöolot, jotta potilaan lämpöiihtyvyys voitaisiin pitää korkealla tasolla.

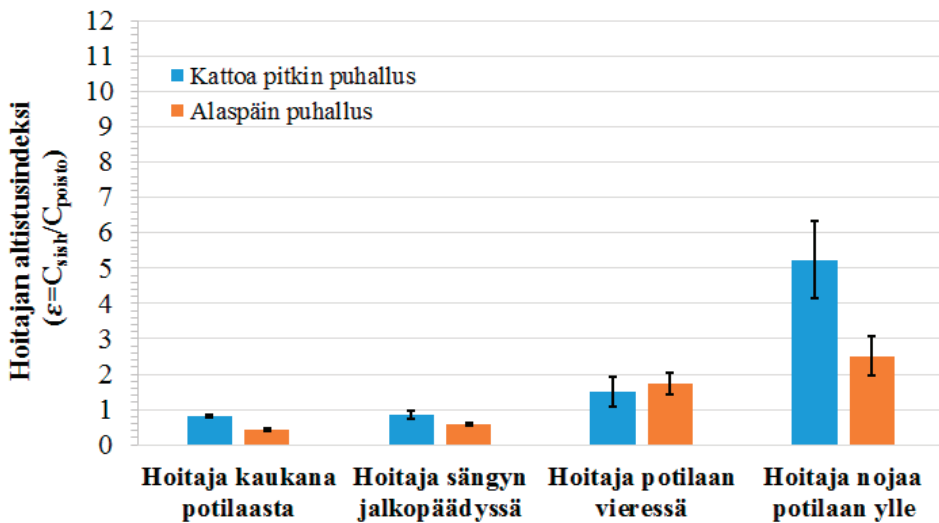
TAULUKKO 1.

Merkkikaasumittausten tulokset.

	Hajotitimet keskellä huonetta		Hajotitimet sängyn päällä		Hajotitimet kaukana potilaasta	
	Kattoa pitkin puhallus	Alaspäin puhallus	Kattoa pitkin puhallus	Alaspäin puhallus	Kattoa pitkin puhallus	Alaspäin puhallus
Hoitajan paikka	Hoitajan altistusindeksi	Hoitajan altistusindeksi	Hoitajan altistusindeksi	Hoitajan altistusindeksi	Hoitajan altistusindeksi	Hoitajan altistusindeksi
	Keski-arvo	Keski-arvo	Keski-arvo	Keski-arvo	Keski-arvo	Keski-arvo
Kaukana potilaasta	STD	STD	STD	STD	STD	STD
	0,82	0,43	0,98	0,88	1,02	0,37
Sängyn jalkopäädyssä	0,21	0,57	0,10	1,14	1,21	1,06
	0,86	0,08	1,24	0,19	0,26	0,25
Potilaan vieressä	0,82	1,74	0,62	1,11	2,71	1,27
	1,51	0,82	1,45	0,45	0,09	0,82
Nojaa potilaan ylle	2,20	2,52	1,10	0,60	6,12	2,86
	5,24	2,26	9,36	2,33	1,95	

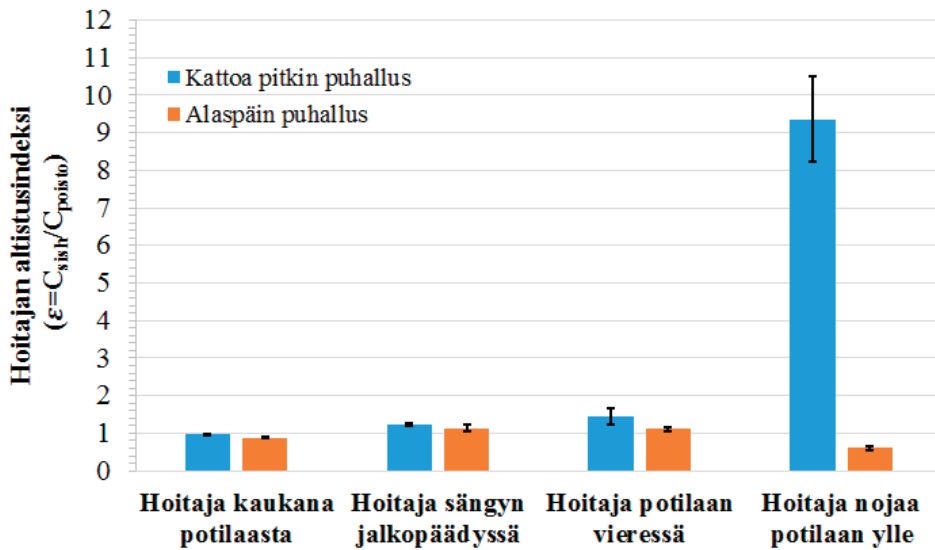
3.3.2 Hajottimet potilassängyn yläpuolella

Taulukon 1 keskimmaisessä sarakkeessa ja kuvassa 17 on esitetty merkkikaasumittausten tulokset hajottimien ollessa potilassängyn päällä. Kattoa pitkin puhaltavan ilmanjaon tapauksessa nähdään, että hoitajan sisään hengittämä pitoisuus kasvoi mitä lähemmäs potilasta (lähdettä) mentiin. Pitoisuudet olivat lähellä poistopitoisuutta lukuun ottamatta tilannetta jossa hoitaja nojaa potilaan ylle, jolloin altistumisindeksi (9.36) oli huomattavasti suurempi kuin muissa mittauspaikoissa (0.98–1.45). Kuten savuvisualisointien perusteella arvioitiin, uloshengitysilma kulkeutui hoitajan hengitysvyöhykkeen poikki ja nosti altistumista erityisesti hoitotilanteessa. Myös mittausten keskihajonnat eli pitoisuusvaihtelut näyttivät kasvavan mitä lähemmäs potilasta mentiin. Tämä viittaa siihen, että potilaan uloshengitysilma ei sekoittunut ja laimentunut nopeasti lähellä lähdettä ja että tuloilma ei huuhdellut hoitajan ja potilaan hengitysvyöhykettä tehokkaasti. Muualla huoneessa (kauempana potilaasta) keskihajonnat olivat merkittävästi pienempiä ja näin ollen potilaan uloshengitysilma oli tasaisemmin sekoittunut.



KUVA 16.

Hoitajan sisään hengittämän merkkiaineen pitoisuus hajottimien ollessa keskellä huonetta.



KUVA 17.

Hoitajan sisään hengittämän merkkiaineen pitoisuus hajottimien ollessa potilassängyn yläpuolella.

Alaspäin puhaltavan ilmanjaon tapauksessa altistusindeksi vaihteli 0.60–1.14 välillä. Paikallisesti alaspäin puhaltava tuloilma huuhteli potilaan hengitysvyöhykettä laimentaen uloshengityksen epäpuhtauspitoisuudet lähellä lähdettä ja ohjaten ne pois hengitys- ja oleskeluvyöhykkeeltä kohti lattiaa. Näin ollen ilmanjako näytti pienentävän hoitajan suoraa altistumista uloshengitysillemälle (kuten kuvan 14 savuvisualisoinneista voitiin arvioida). Lisäksi hoitajan nojatessa potilaan ylle (antaessa hoitoa potilaalle) tuloilma huuhteli myös hoitajan hengitysvyöhykettä raikkaalla ilmalla. Tällöin keskimääräinen altistuminen (0.60) oli keskimääräistä huonepitoisuutta alhaisempi ja siis huomattavasti pienempi kuin kattoa pitkin puhallettaessa (9.36). Pitoisuuksien keskihajonnat olivat pieniä kaikissa mittauspisteissä alaspäin puhaltavan ilmanjaon tapauksessa. Myös tämä viittaa siihen, että tuloilma sekoitti ja laimensi epäpuhtauspitoisuudet jo lähellä lähdettä, jolloin muuallakaan huoneessa ei esiintynyt merkittäviä altistusindeksien vaihteluita.

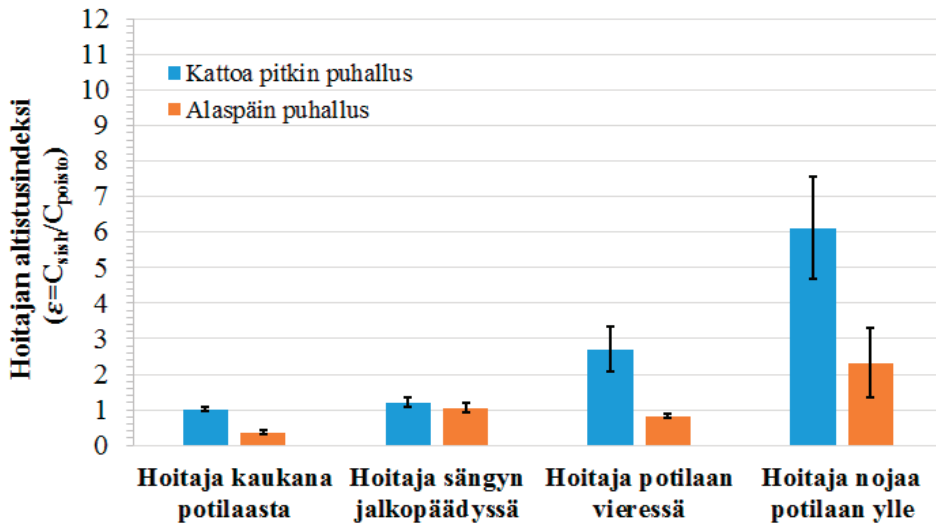
Tulosten perusteella vaikutti siltä, että tässäkin tapauksessa alaspäin puhaltava ilmanjako toimi paremmin kuin kattoa pitkin puhaltava sekoittava ilmanjako. Ero oli merkittävä erityisesti hoitotilanteessa (hoitaja nojasi potilaan ylle), jossa kattoa pitkin puhaltava ilmanjako aiheutti noin 16-kertaisen keskimääräisen altistumisen verrattuna alaspäin puhaltavaan ilmanjakoon. On kuitenkin huomattava, että alas-

päin puhaltava ilmanjako puhaltaa viileää tuloilmaa suoraan potilaan yläruumiin alueelle ja näin ollen saattaa heikentää potilaan lämpöviihtyvyyttä merkittävästi. Ilmanjakojen toimivuutta tulisikin tarkastella kokonaisuutena ja ottaa huomioon ilmanvaihdon tehokkuuden lisäksi myös muita tekijöitä kuten lämpöviihtyvyys. Eri ilmanjakojen lämpöoloja tarkastellaan tarkemmin Lämpöolo- ja ilman liikenopeusmittaukset -luvussa (3.4).

3.3.3 Hajottimet kaukana potilaasta

Taulukon 1 oikeassa reunassa ja kuvassa 18 on esitetty merkkiainemittausten tulokset hajotinten ollessa kaukana potilassängystä huoneen toisella puolella. Kattoa pitkin puhaltavan ilmanjaon tapauksessa hoitajan altistuminen potilaan uloshengitykselle oli huomattavasti suurempi hoitajan nojatesa potilaan ylle (6.12) kuin kauempana potilaasta (1.02–2.71). Kaukana potilaasta ja sängyn jalkopäässä altistumisindeksi oli lähellä yhtä. Hoitajan tullessa lähemmäs potilasta altistuminen kasvoi merkittävästi. Altistumisindeksin vaihtelut (keskihajonnat) olivat suuria lähellä potilasta, erityisesti hoitajan nojatesa potilaan ylle.

Alaspäin puhaltavan ilmanjaon tapauksessa hoitajan altistumisindeksi vaihteli välillä 0.37–2.33 (taulukko 1 ja kuva 18). Tuloksista nähdään, että altistuminen kasvoi tässäkin tapauksessa mitä lähemmäs potilasta mentiin. Erityisesti hoitajan nojatesa potilaan ylle keskimääräinen altistumisindeksi oli reilusti yli yhden (2.33) ja siis huomattavasti muita mittauspisteitä korkeampi. Kaukana potilaasta mitattu alhainen altistumisindeksi johtui siitä, että kyseisessä tarkastelupisteessä hoitaja oli suoraan alaspäin puhaltavan tuloilmasuihkun alla. Näin ollen hoitajan hengitysvyöhykettä huuhdeltiin puhtaalla tuloilmalla, joka pienensi sisään hengitetyn merkikaasun pitoisuutta. Lähellä potilasta (hoitajan nojatesa potilaan ylle) keskimääräinen pitoisuusvaihtelu (keskihajonta) oli huomattavasti suurempaa kuin muualla huoneessa. Tämä viittaa siihen, että lähellä potilasta ilmanjako ei huuhdellut ja sekoittanut ilmaa tehokkaasti.



KUVA 18.

Merkkikaasumittausten tulokset hajottimien ollessa kaukana potilaasta huoneen toisella puolella.

Tulosten perusteella näyttää siltä, että hajottimien ollessa kaukana potilaasta molemmat tuloilman jakotavat toimivat heikosti lähellä potilasta (selvästi yli yhden kohonneet altistusindeksit), mutta sekoittivat huoneen ilman kohtuullisesti muualla huoneessa. Kuten myös muilla tutkituilla tuloilmanhajottimien paikoilla, alaspäin puhaltava ilmanjako näytti toimivan tässä tapauksessa paremmin kuin kattoa pitkin puhaltava ilmanjako (erityisesti lähellä potilasta). Tuloilmahajotinten ollessa kaukana potilaasta tuloilmasuihkut eivät puhaltaneet suoraan potilassängylle ja näin ollen eivät luultavasti aiheuta merkittävää vedon tunnetta tai lämpöviihtyvyyden alenemista potilassängyn ympäristössä.

3.4 Lämpöolojen ja ilman nopeuden mittaukset

3.4.1 Ilman nopeuden mittaukset

Ilman nopeuden mittausten tulokset on esitetty taulukossa 2 ja havainnollistettu kuvissa 19–20. Mittausten perusteella ilman nopeudet olivat alhaisia (noin 0.1 m/s) potilaan yläruumiin alueella kaikissa muissa tapauksissa paitsi alaspäin puhaltavalle ilmanjaolle hajotinten ollessa sijoitettuna potilassängyn yläpuolelle, jolloin nopeudet kasvoivat suuriksi (0.3–0.4 m/s). Tällöin ilman liike aiheuttaa huomattavan veto-riskin sängyssä makaavalle potilaalle. Nopeuksien keskihajonnat (merkitty mustin viivoin kuviin 19–20) vaihtelivat välillä 0.03–0.08 m/s. Alaspäin puhaltavan ilmanjaon tapauksessa (hajotinten ollessa potilassängyn päällä) myös nopeuden vaihtelu kasvoi, mutta oli samaa luokkaa suhteessa keskiarvoon kuin muissa tapauksissa. Ilman liikenopeus ja lämpötila vaikuttavat vedon tunteen lisäksi myös potilaan keskimääräisiin lämpöoloihin. Puhallettaessa viileää tuloilmaa suoraan kohti potilasta (alaspäin puhallus potilassängyn yläpuolelta) saattaa lämpöympäristö viilentyä huomattavasti ja potilaan lämpöolot heikentyä merkittävästi.

Ilman liikenopeusmittaukset keskittyivät potilaan ylävartalon alueelle, koska niskan seutu on yleensä herkkä vedolle. Lisäksi yhdessä tilanteessa (hajotinten ollessa keskellä huonetta) ilman nopeudet mitattiin myös jalkojen alueella. Nopeuksien mittauksien tulokset jalkojen alueella on havainnollistettu kuvassa 20. Kuvasta nähdään, että nopeudet ovat suuria alaspäin puhaltavan ilmanjaon tapauksessa. Tällöin ilmanjako saattaa aiheuttaa vedon tunnetta potilaan jalkojen alueella. Lisäksi ilman nopeuksien vaihtelu (keskihajonta) jalkojen alueella oli hieman suurempaa alaspäin kuin kattoa pitkin puhallettaessa. Myös tämä voi lisätä vedon tunnetta alaspäin puhaltavan ilmanjaon tapauksessa. Nilkat voidaan kuitenkin peittää sängyllä olevan peitteen avulla helposti ja näin ollen pienentää mahdollista vedon tunnetta ja parantaa lämpöviihtyvyyttä.

Keskimäärin ilman liikenopeudet olivat maltillisia ja yleensä alle 0.20 m/s. Muutamassa tilanteessa alaspäin puhaltavan ilmanjaon aikana ilman nopeudet nousivat huomattavasti yli 0.20 m/s.

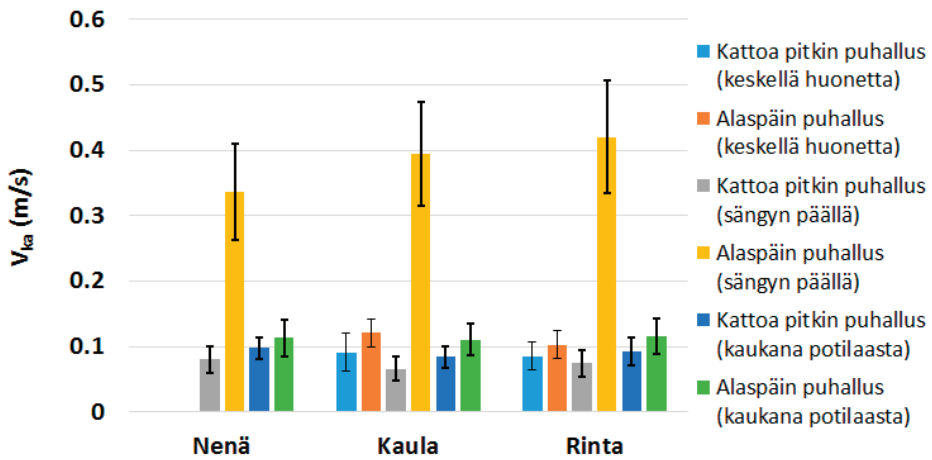
Suomessa ei ole kansallisia sairaaloiden erityistilojen ilmanvaihdon suunnitteluohjeita. Saatavilla oleva tieto on esitetty hajanaisesti useissa eri lähteissä. Hyvä yhteenve-to sairaalailmanvaihdon suunnitteluohjeista on kuitenkin annettu Jouko Ryynäsen opinnäytetyössä vuonna 2007 (Ryynänen 2007). Työn liitteenä olevista tilakorteista selviää, että esimerkiksi eristystiloille ei ole rajoja/suosituksia ilman nopeudelle.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D2 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto (2012) annettiin ilman nopeudelle arvot vain muutamalle erilaiselle sairaalatilalle. Esimerkiksi tavalliselle potilashuoneelle suositeltiin ilman nopeuden rajaksi 0.20 m/s kesäkaudella (jäähdytystilanne) ja 0.30 m/s talvikaudella (lämmitystilanne). Vuoden 2018 alussa tuli voimaan Ympäristöministeriön asetus 1009/2017 uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta, joka korvasi D2:n. Asetukseen liittyvät suositukset annetaan jatkossa erillisissä dokumenteissa. Tilakohtaisia arvoja ilman nopeudelle sairaalataloissa ei ole toistaiseksi julkaistu. Raportissa ”Ilmanvaihdon mitoituksen perusteet” (Seppänen ym. 2017) on käytetty kevyelle työlle samoja kesä- ja talvikauden arvoja kuin edellä mainitut D2:n ohjearvot.

Kattoa pitkin puhaltavan ilman jaon tapauksessa mitatut ilman nopeudet potilas-sängyllä eivät ylittäneet edellä mainittuja arvoja. Alaspäin puhaltavan ilmanjaon tapauksessa ilman nopeudet ylittivät edellä mainitut arvot muutamassa tapaukses-sa. Erityisesti alaspäin puhaltavien hajottimien ollessa sijoitettuna kattoon potilaan yläpuolelle ilman nopeudet potilassängyllä ylittivät ohjearvot selvästi ja saattavat aiheuttaa huomattavaa vedon tunnetta ja heikentää potilaan lämpöviihtyvyyttä merkittävästi. Ilman nopeuksien avulla ei kuitenkaan voida täysin arvioida lämpö-viihtyvyyttä vaan sen kokonaisvaltaisemmassa arvioinnissa tulee ottaa huomioon myös ilman lämpötila, lämpösäteily, vaatetus ja elimistön lämmöntuotto. Tätä var-ten tutkimuksessa suoritettiin lämpöolomittaukset lämpönukella, jolla pystyttiin ottamaan huomioon edellä mainitut tekijät. Lämpöoloja tarkastellaan tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

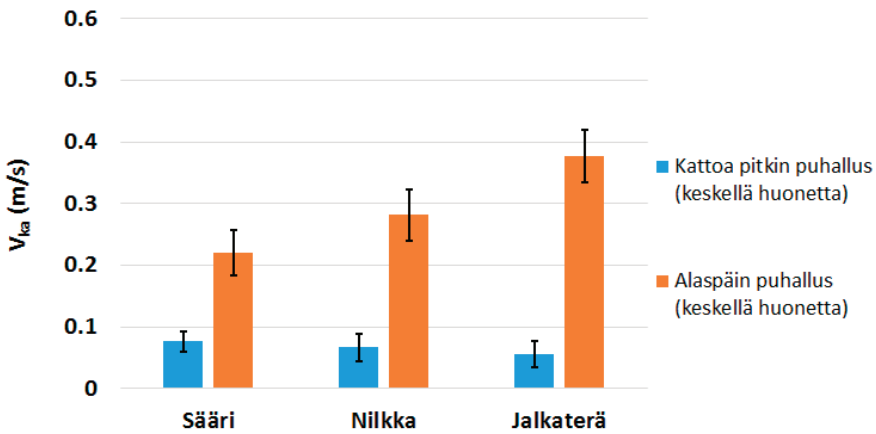
TAULUKKO 2.
Ilman liikenopeusmittausten tulokset.

Mittauspaikka	Hajottimet keskellä huonetta			Hajottimet sängyn päällä			Hajottimet kaukana potilaasta				
	Kattoa pitkin puhallus		Alaspäin puhallus	Kattoa pitkin puhallus		Alaspäin puhallus	Kattoa pitkin puhallus		Alaspäin puhallus		
	Ilmannoopeus Keski-arvo	STD	Ilmannoopeus Keski-arvo	Ilmannoopeus Keski-arvo	STD	Ilmannoopeus Keski-arvo	Ilmannoopeus Keski-arvo	STD	Ilmannoopeus Keski-arvo		
Nenä	-	-	-	0,08	0,04	0,34	0,15	0,10	0,03	0,11	0,06
Kaula	0,09	0,06	0,12	0,07	0,04	0,39	0,16	0,08	0,03	0,11	0,05
Rinta	0,09	0,04	0,10	0,07	0,04	0,42	0,17	0,09	0,04	0,12	0,05
Sääri	0,08	0,03	0,22	-	-	-	-	-	-	-	-
Nilkka	0,07	0,04	0,28	-	-	-	-	-	-	-	-
Jalkaterä	0,06	0,04	0,38	-	-	-	-	-	-	-	-



KUVA 19.

Ilman liikenopeudet potilaan ylävartalon alueella.



KUVA 20.

Ilman liikenopeudet potilaan jalkojen alueella (vain hajotinten ollessa keskellä huonetta).

3.4.2 Lämpöolomittaukset

Lämpöolomittausten tulokset on esitetty taulukossa 3 ja havainnollistettu kuvassa 21. Ekvivalenttilämpötilat on esitetty koko keholle (keskimääräinen ekvivalenttilämpötila) ja valituille ruumiinosille. Tulosten perusteella nähdään, että koko kehon ekvivalenttilämpötila vaihtelee suuresti riippuen ilmanjakotavasta ja tuloilmahajottimien paikasta. Tyypillisesti kattoa pitkin puhaltava ilmanjako tuotti aina korkeamman ekvivalenttilämpötilan kuin vastaavat alaspäin puhaltavat ilmanjaot. Korkein koko kehon ekvivalenttilämpötila oli 22.7 °C (kattoa pitkin puhallus keskellä huonetta) ja matalin 18.5 °C (alaspäin puhallus potilassängyn päältä). Alaspäin puhallettaessa potilassängyn päältä tai keskeltä huonetta ekvivalenttilämpötila jäi huomattavasti matalammaksi kuin muissa tapauksissa. Näissä tapauksissa suora puhallus kohti potilasta aiheutti lämpötilan laskemisen johtuen kehoa huuhtelevasta viileästä tuloilmasta. Yleisesti ottaen ekvivalenttilämpötilat olivat hyvällä tasolla lukuun ottamatta tapauksia, joissa viileä tuloilma puhalsi suoraan potilasta kohden.

Eristystilojen lämpöoloja potilaan kannalta ei ole tutkittu kovinkaan paljon. Yksi harvoista tuoreista tutkimuksista arvioi, että potilaan lämpöolot ovat varsin usein hieman viileät (Berlanga ym. 2017). Myös tässä tutkimuksessa saatiin samansuuntaisia tuloksia. Toisaalta muun tyyppisissä potilashuoneissa on havaittu, että potilaat kokevat subjektiivisesti lämpöympäristön usein lämpimämpänä kuin objektiivisesti arvioimalla esimerkiksi PMV-indeksin avulla (Verheyen ym. 2011). Viileitä lämpöoloja voidaan tosin parantaa huomattavasti peitteen avulla. Jatkossa olisi tärkeää selvittää tarkemmin, miten peitteen käyttö vaikuttaa potilaan lämpöoloihin.

Kuten aiemmin on jo mainittu, niin pelkät altistusmittaukset eivät riitä määrittelemään toimivaa ilmanjakoa. Esimerkiksi merkkikaasumittausten perusteella jokin ilmanjako saattaa olla hoitajan altistumisen kannalta paras vaihtoehto (hoitajan altistuminen potilaasta peräisin oleville epäpuhtauksille mahdollisimman pientä), mutta lämpöolot voivat kuitenkin olla liian viileät potilaan jatkuvaan oleskeluun tilassa ja näin ollen muuten lupaava ilmanjako ei sellaisenaan sovellu jatkuvaan käyttöön. Hyvä esimerkki tästä on potilaan yläpuolelta alaspäin kohti potilasta puhaltava ilmanjako. Yksi vaihtoehto olisi käyttää tätä ilmanjakoa vain silloin kun henkilökunta vieraillee eristystilassa ja muissa käyttötilanteissa toisenlaista jakoa. On olemassa ilmanjaon päätelaitteita, kuten esimerkiksi pyörrehajottimia, joissa on kaksi moodia joista toisessa ilma puhalletaan alaspäin ja toisessa vaakatasossa sivuille (Koskela ja Maula 2013) pois päin potilaasta. Puhallussuunnan vaihto voisi tapahtua nappia

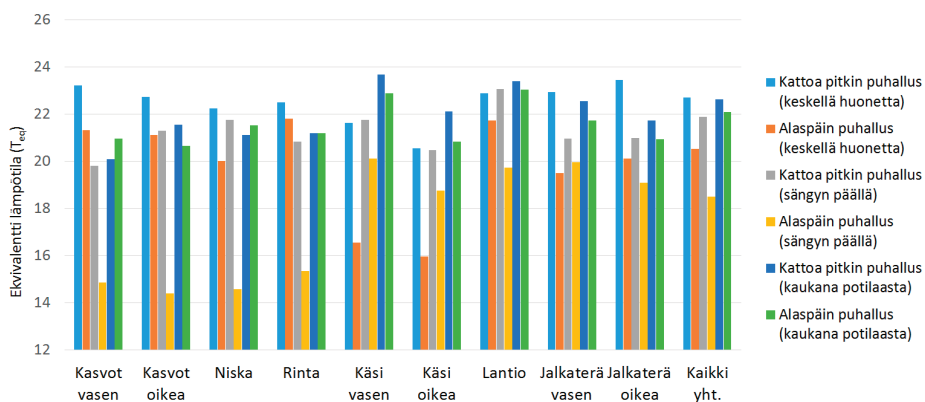
painamalla hoitajan toimesta saavuttaessa huoneeseen tai se voisi olla integroituna oven avaamiseen. Tämä mahdollistaisi alaspäin puhalluksen käytön vain sen ajan, kun henkilökunta oleskelee huoneessa. Kuten hoitajien observoinneista huomattiin, henkilökunnan käynnit eristystiloissa eivät olleet pitkäkestoisia ja näin ollen (hoitajan vierailun ajan) potilasta kohden puhallettaessa potilas altistuisi viileälle tuloilmalle vain hetkellisesti. Lisäksi alaspäin puhalluksen tilapäiseen hyväksyttävyyteen saattaa vaikuttaa myös se, että hoitajien vierailujen aikana potilaiden huomio keskittyy ehkä muualle. Tulevaisuudessa tilapäisen alaspäin puhalluksen hyväksyttävyyttä (lämpöolojen näkökulmasta) tulisi tutkia tarkemmin esimerkiksi kyselyin, jossa kartoitettaisiin käyttäjien kokema lämpöiihtyvyyttä.

TAULUKKO 3.

Lämpöolomittausten tulokset.

Ruumiinosa	Hajottimet keskellä huonetta		Hajottimet sängyn päällä		Hajottimet kaukana potilaasta	
	Kattoa pitkin puhallus	Alaspäin puhallus	Kattoa pitkin puhallus	Alaspäin puhallus	Kattoa pitkin puhallus	Alaspäin puhallus
	Ekvivalentti lämpötila* (°C)	Ekvivalentti lämpötila* (°C)	Ekvivalentti lämpötila* (°C)	Ekvivalentti lämpötila* (°C)	Ekvivalentti lämpötila* (°C)	Ekvivalentti lämpötila* (°C)
Kaikki yht.	22,7	20,5	21,9	18,5	22,6	22,1
Jalkaterä vasen	22,9	19,5	21,0	20,0	22,5	21,7
Jalkaterä oikea	23,4	20,1	21,0	19,1	21,7	20,9
Lantio	22,9	21,7	23,1	19,7	23,4	23,0
Käsi vasen	21,6	16,5	21,7	20,1	23,7	22,9
Käsi oikea	20,5	16,0	20,5	18,7	22,1	20,8
Rinta	22,5	21,8	20,8	15,3	21,2	21,2
Niska	22,3	20,0	21,8	14,6	21,1	21,5
Kasvat vasen	23,2	21,3	19,8	14,9	20,1	21,0
Kasvat oikea	22,7	21,1	21,3	14,4	21,6	20,6

* 30 min keskiarvo



KUVA 21.

Lämpönuken avulla mitatut ekvivalenttilämpötilat kaikilla tuloilmahajotinten paikoilla.

Ekvivalenttilämpötila valittiin tarkasteltavaksi lämpöolojen mitaksi, koska sen avulla voitiin tarkastella ja verrata eri kehon osien tuloksia keskenään. Muita mahdollisia lämpöihtiyyttä kuvaavia indeksejä olisivat olleet PMV- ja PPD-indeksit. Ne on kuitenkin kehitetty kuvaamaan koko kehon lämpötuntemusta eikä eri kehonosien lämpöoloja voida niiden avulla sen vuoksi vertailla keskenään. Lisäksi em. indeksit on tarkoitettu terveen aikuisen lämpöolojen arviointiin kevyessä seisoma- tai istuma-asennossa tapahtuvassa työskentelyssä kuten toimistotyössä. Indeksit eivät siis sovellu kovin hyvin makaavalle ja sairaalle ihmiselle, jonka aktiiviteettitaso ja elimistön lämmöntuotto voivat poiketa huomattavasti terveestä toimistotyötä tekevästä henkilöstä. Jotta PMV-, PPD- yms. comfort-indeksejä voitaisiin soveltaa luotettavasti sairaalaympäristössä, tulisi niitä muokata tähän sopiviksi. Tulevaisuudessa olisikin tärkeää suorittaa koehenkilökokeita ja kehittää niiden perusteella sairaalaympäristöön ja potilaskäyttöön paremmin soveltuva lämpöoloindeksi.

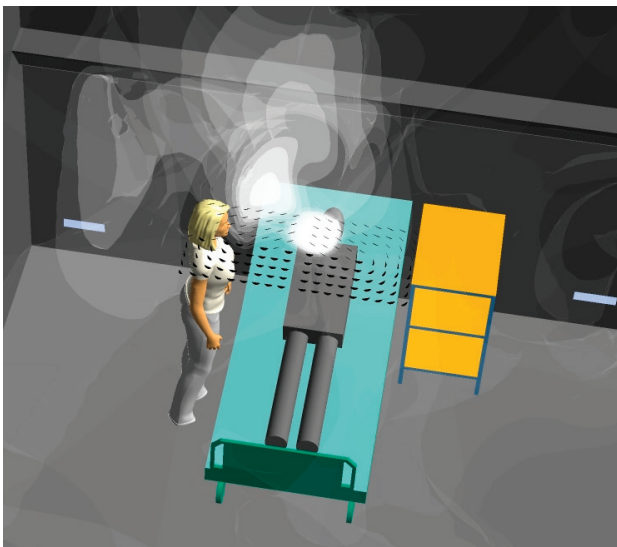
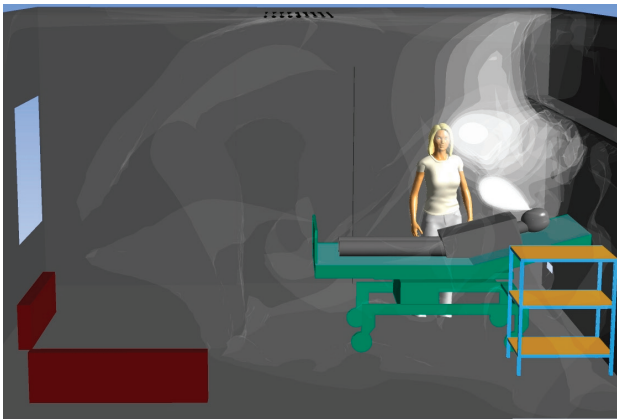
3.5 Virtaussimuloinnit

Kuvassa 22 on esitetty pysäytyskuva potilaan uloshengityksen leviämisestä eristystilassa kahdesta eri kuvakulmasta nähtynä käyttäen URANS-ratkaisijaa. Tilanteessa oli käytössä kattoa pitkin puhaltava ilmanjako, jossa monisuuventihajottimet olivat sijoitettuna kattoon keskelle huonetta. Simuloinnissa potilaan uloshengittämään ilmaan oli lisätty merkkikaasua. Kuvassa merkkikaasun eri pitoisuustasot on värjätty harmaan eri sävyillä säätämällä tasojen läpinäkyvyyttä. Näin on luotu keinotekoinen savuvisualisointi potilaan uloshengitysilman leviämisestä. Menetelmä sopii hyvin ilman virtausten havainnollistamiseen ja ilmajäliteisten epäpuhtauksien leviämisen visualisointiin (Saarinen ym. 2015, 2017). Kuvasta 22 nähdään, että potilaan uloshengityspitoisuudet ovat korkeimmat lähellä potilasta ja pitoisuus pienenee huomattavasti kauempana huoneessa. Tilanteessa ilmanjako ei näytä huuhtelevan tehokkaasti potilaan ja hoitajan hengitysvyöhykkeitä.

Tarkemmin potilaan uloshengityksen leviämistä potilassängyn läheisyydessä on havainnollistettu kuvassa 23. Kuvassa on verrattu kokeellista savuvisualisointia URANS- ja LES-virtaussimulointeihin. Kuten kuvasta nähdään, on simulointimenetelmien välillä huomattavia eroja. URANS-ratkaisijan, joka ei ratkaise turbulenssia vaan huomioi sen vaikutukset valmiilla malleilla, tuottama uloshengityksen virtauskenttä ei ole yhtä yksityiskohtainen kuin LES-ratkaisijalla saatu kenttä. LES-menetelmä ratkaisee myös pyörteiden aiheuttamat virtaukset ja käyttää turbulenssimalleja vain laskentaverkkoa pienempiin pyörteisiin. Verrattaessa simulointituloksia kokeelliseen savuvisualisointiin (kuvassa 23), nähdään että LES-ratkaisija näyttää tuottavan huomattavasti realistisemmän tuloksen kuin URANS. LES-menetelmä mallintaa pitoisuusvaihtelut tarkemmin ja yksityiskohtaisemmin, jolloin tulokset ovat lähempänä kokeellisesti havaittuja. URANS-simuloinneissa epäpuhtaudet leviävät huomattavasti tasaisemmin eikä pienen skaalan pitoisuusvaihteluita havaita.

Tyypillisesti uloshengityksen leviämistä on mallinnettu käyttämällä ajasta riippumatonta RANS-menetelmää (Chen ja Zhao 2010, Villafruela ym. 2012) tai edellä mainittua ajasta riippuvaa URANS-menetelmää (Gao ja Niu 2006, Villafruela ym. 2013). LES-ratkaisijaa on käytetty uloshengitettyjen epäpuhtauksien leviämisen mallinnuksessa toistaiseksi hyvin vähän. Suurin syy tähän on luultavasti sen hitaus. Toimiakseen (ratkaistakseen pienen skaalan turbulenssin) LES-ratkaisija vaatii tiheimmän laskentaverkon kuin URANS-ratkaisija, joka hidastaa laskentaa. Lisäksi laskennan aika-askeleen on oltava lyhyt, jotta virtauksen eteneminen pyör-

teissä ja ilmasuihkuissa voidaan ratkaista. Erityisesti uloshengityksen nopeus suun tai sierainten lähellä kasvaa huomattavaksi (Gupta ym. 2010, Kwon ym. 2012), jolloin virtauksen etenemistä kuvaava Courantin luku kasvaa ratkaisun onnistumisen kannalta liian suureksi. Tällöin ratkaisu ei välttämättä suppene ja laskenta epäonnistuu. Courantin-lukua voidaan pienentää lyhentämällä simuloinnin aika-askelta, mutta tällöin myös laskenta hidastuu. Yleensä LES-simulointi onkin laskennallisesti huomattavasti hitaampi kuin RANS- tai URANS-menetelmät. Tässä projektissa on kuitenkin pystytty mallintamaan uloshengityksen leviämistä realistisesti LES-simuloinnilla. Tämä mahdollistaa tulevaisuudessa entistä tarkemmat simuloinnit, epäpuhtauksien leviämisen tarkastelut ja altistumisen arvioinnin.



KUVA 22. CFD-mallinnustuloksia potilaan uloshengityksen leviämisestä kattoa pitkin puhaltavalle ilmanjaolle (monisuutinhajottimet katossa keskellä huonetta).

Savukoe



LES-
simulointi



URANS-
simulointi

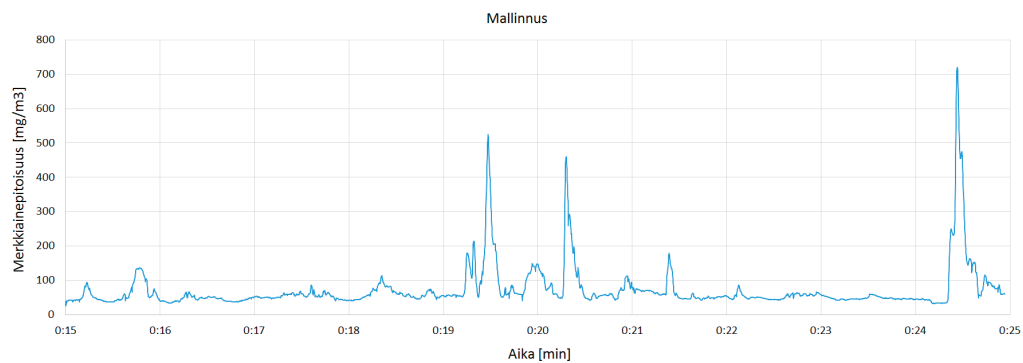
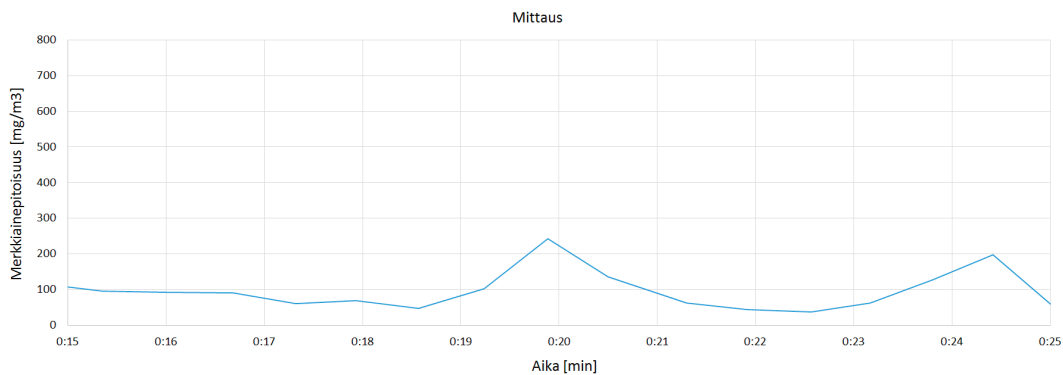


KUVA 23.

Savuvisualisoinnin ja mallinnustulosten vertailua uloshengityksen leviämisestä.

Kuvassa 24 on esitetty esimerkki hoitajan sisään hengittämän merkkiaineen pitoisuuden vaihtelusta ajan funktiona. Ylemmässä kuvassa on esitetty mittaustulokset 10 minuutin ajalta ja alemmassa kuvassa URANS-simuloinnin tulokset 10 minuutin ajalta. Mallinnustuloksissa on esitetty hoitajan sieraimen edessä mitattu merkki-kaasupitoisuus. Koska URANS-simuloinnin aika-askel oli 0.2 s, mallinnusten perusteella voitiin tarkastella epäpuhtauspitoisuuksia hoitajan hengitysvyöhykkeellä huomattavasti yksityiskohtaisemmin kuin mittaamalla (aikaresoluutio noin 40 s). Mittausten harvan näytteenottotaajuuden takia merkkikaasun vaihteluita ei voitu seurata kovin tarkasti. Tämän vuoksi varsinaisissa altistusmittauksissa (merkkikaasumittaukset) jouduttiin tarkastelemaan keskiarvoja tarpeeksi pitkän aikavälin yli (1 h), jotta otoksesta tulisi riittävän suuri ja edustava. Mallintamalla saadaan siis tarkempi kuva hetkellisistä vaihteluista ja altistumisesta ajan funktiona.

Virtaussimuloinneissa keskityttiin havainnollistamaan potilaan uloshengittämien epäpuhtauksien leviämistä. Molemmilla mallinnusmenetelmillä (URANS ja LES) saatiin tästä varsin hyvä kuva. Laskennallisesti kevyempi URANS-menetelmä pystyi tuottamaan kohtuullisen tarkan uloshengityksen virtauskentän. Se ei kuitenkaan levittänyt epäpuhtauksia realistisesti, vaan ne levisivät tasaisena rintamana huoneeseen. LES-menetelmän tuottama virtauskenttä oli huomattavasti realistisempi verrattuna savuvisualisointeihin. Menetelmän avulla pystyttiin mallintamaan turbulenttisen virtauskentän yksityiskohtaisia rakenteita ja kuvaamaan epäpuhtauksien leviämistä huoneessa tarkemmin. LES-menetelmän heikkous on kuitenkin sen hitaus, koska se vaatii huomattavasti enemmän laskentatehoa tietokoneelta kuin URANS. Tällä hetkellä LES-simulointia ei käytetä kovin yleisesti huonevirtausten tai epäpuhtauksien leviämisen mallintamiseen. Tietokoneiden laskentateho kuitenkin kasvaa koko ajan ja tulevaisuudessa LES-menetelmän käyttö tulee yleistymään ja virtaussimuloinnin tulokset tarkentumaan entisestään.



KUVA 24.

Esimerkit hoitajan sisään hengittämän merkkiaineen pitoisuusvaihteluista mittaamalla (yllä) ja mallintamalla (alla).

4 Yhteenveto

Eristystiloissa ilmanvaihdon vaikutus ilmajälitteisten taudinaiheuttajien leviämiseen sekä niille altistumiseen on huomattava. Tiloissa työskentelevät hoitajat joutuvat hoitotilanteissa usein lähelle potilaita, jolloin ilmanjako ei välttämättä toimi optimaalisesti, vaan henkilökunta saattaa altistua suoraan potilaasta peräisin oleville korkeille epäpuhtauspitoisuuksille.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin tuloilman jakotavan, hajottimien paikan ja hoitajan sijainnin vaikutusta potilaan uloshengittämien ilmajälitteisten epäpuhtauksien leviämiseen ja niille altistumiseen sairaaloiden eristystiloissa. Tutkimuksessa tarkasteltiin kahta erilaista tuloilman jakotapaa: paikallisesti katosta alaspäin puhaltavaa ilmanjakoa ja kattoa pitkin puhaltavaa sekoittavaa ilmanjakoa. Tuloilmahajottimien paikan vaikutusta ilmanjakotapojen toimivuuteen testattiin tuomalla ilma huoneeseen kaukana potilaasta, keskeltä huonetta tai potilassängyn yläpuolelta. Hoitajan altistumista potilaan uloshengitykselle mitattiin kaukana potilaasta, potilassängyn päädyssä, sängyn vieressä ja hoitajan nojatesa potilaan ylle hoitotilanteessa. Kokeet suoritettiin laboratorioon rakennetussa eristystilamallissa, jossa hoitajaa ja potilasta simuloitiin hengittävillä lämpönukeilla. Potilaan uloshengityksen leviämistä ja hoitajan altistumista sille arvioitiin savuvisualisointien, merkkikaasumittausten ja virtauslaskennan avulla. Potilaan lämpöviihtyvyyttä arvioitiin lämpöolojen ja ilman nopeuden mittauksin eri koetilanteissa.

Tuloilman jakotavalla oli huomattava merkitys potilaan uloshengitysilman leviämisessä ja hoitajan altistumisessa sille. Lisäksi hajottimien sijainnilla ja hoitajan paikalla havaittiin olevan suuri vaikutus altistumiseen. Tyypillisesti korkein altistuminen havaittiin lähellä potilasta. Erityisesti hoitajan nojatesa potilaan ylle (hoitotilanne) altistuminen saattoi olla jopa 10 kertaa suurempi kuin kauempana potilaasta. Merkittävimmät erot eri ilmanjakotapojen välillä havaittiin myös hoitajan ollessa lähellä potilasta. Kokeiden perusteella näytti siltä, että alaspäin puhallus toimi varsin hyvin monissa koetilanteissa. Erityisesti hajotinten ollessa potilassängyn ja potilaan ylävartalon yläpuolella paikallisesti alaspäin puhaltava ilmanjako toimi erittäin hyvin hoitajan suojaamisen kannalta. Tällöin kattoa pitkin puhaltava ilmanjako aiheutti

noin 16-kertaisen altistumisen verrattuna alaspäin puhaltavaan ilmanjakoon (hoitajan nojatessa potilaan ylle). Tilanteessa tuloilma huuhteli hoitajan hengitysvyöhykettä tehokkaasti raittiilla ilmalla ja ohjasi potilaan uloshengitysilman alaspäin kohti lattiaa ja näin ollen pois hoitajan hengitysvyöhykkeeltä tehokkaammin kuin kattoa pitkin puhaltava ilmanjako.

Myös lämpöolot ovat tärkeä osa ilmastoinnin toimivuutta ja ne on otettava tarkasti huomioon suunniteltaessa eristystilojen ilmanjakoa. Hyvin suunnitellun ilmanvaihdon avulla voidaan luoda viihtyisät olosuhteet ja siten tuottaa suotuisimmat olosuhteet toipumiselle. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin lämpöoloja erityisesti potilaan näkökulmasta. Tutkittujen ilmanjakotapojen tuottamat lämpöolot vaihtelivat merkittävästi. Sekoittavan ilmanjaon tapauksessa lämpöolot havaittiin potilaan kannalta suhteellisen hyväksi ja tasaisiksi riippumatta hajotinten sijainnista. Alaspäin puhallus tuotti sen sijaan huomattavasti viileämmät lämpöolosuhteet. Alaspäin puhallettaessa myös hajottimien sijainnilla oli huomattava vaikutus lämpöympäristöön. Olosuhteet havaittiin viileiksi erityisesti silloin kun puhallus osui suoraan potilaaseen. Tällöin alaspäin puhallusta ei voida käyttää jatkuvana ilmanjakotapana. On kuitenkin mahdollista toteuttaa kehittyneitä teknisiä ratkaisuja, joilla voidaan tuottaa alaspäin puhallus vain silloin, kun hoitaja on paikalla huoneessa. Kuten hoitajien observoinneista havaittiin, vierailut eristystiloissa olivat tyypillisesti lyhytkestoisia ja tällöin hetkellinen suoraan alaspäin puhallus esimerkiksi potilaan yläpuolelta voi olla hyväksyttävissä potilaan lämpöolojen kannalta.

Kaiken kaikkiaan tutkimuksen tulokset osoittivat, että huolellisella tuloilman jaon suunnittelulla hoitajan altistumista potilaasta peräisin oleville ilmapölyille infektioille voidaan merkittävästi pienentää. Parantamalla tuloilman jaon suunnittelua ja toteutusta voidaan yhdessä muiden suojautumismenetelmien kanssa (henkilösuojaimet ja työskentelytavat) luoda huomattavasti paremmat ja turvallisemmat työskentelyolosuhteet. Tutkimuksen tuloksia voivat hyödyntää niin ilmanvaihdon suunnittelijat, laitevalmistajat ja tuotekehittäjät kuin sairaaloiden infektioiden torjunnasta vastaava henkilökunta. Tuloksia onkin jo hyödynnetty eurooppalaisen sairaalailmastoinnin standardointityöryhmän (CEN/TC 156/WG 18) suunnittelemassa standardissa.

Lähteet

ASHRAE Standard 170 (2013) Ventilation of Health Care Facilities. The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, Georgia, United States of America.

ASHRAE (2001) ASHRAE Handbook– Fundamentals. The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, Georgia, United States of America.

Awbi HB (2003) Ventilation of buildings. Spon Press, 2003, ISBN 0-203-63782-8.

Beggs CB (2003) The airborne transmission of infection in hospital buildings: fact of fiction? *Indoor and Built Environment*, 12, 9, 9–18.

Berlanga F, Ruiz de Adana M, Olmedo I, Villafruela J, San Jose JF, ja Castro F (2017) Experimental evaluation of thermal comfort, ventilation performance indices and exposure to airborne contaminant in an airborne infection isolation room equipped with a displacement air distribution system. *Energy and Buildings*, 158, 209–221.

Bivolarova M, Ondráček J, Melikov A, ja Ždímal V (2017) A comparison between tracer gas and aerosol particles distribution indoors: The impact of ventilation rate, interaction of airflows, and presence of objects. *Indoor Air*, 27, 6, 1201–1212.

Bjørn E (2000). Simulation of Human Respiration with Breathing Thermal Manikin. Aalborg: Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University. (*Indoor Environmental Engineering*; No. 109, Vol. R9944).

Brachman PS (1971) Hospital-acquired infection—airborne or not? in *Proceedings of the International Conference on Hospital-Acquired Infections*, P. S. Brachman and T. C. Eickhoff, Eds., pp. 189–192, American Hospital Association, Chicago, Ill, USA, 1971.

Brohus, H. (1997) Personal Exposure to Contaminant Sources in Ventilated Rooms. PhD Thesis, Aalborg University, Denmark.

Cao G, Nielsen PV, Jensen RL, Heiselberg P, Liu L, ja Heikkinen J (2015) Protected zone ventilation and reduced personal exposure to airborne cross-infection. *Indoor Air*, 25, 307–319.

CDC (2005) Guidelines for Preventing the Transmission of Mycobacterium tuberculosis in Health-care Settings, vol. 54, MMWR, Washington, DC, 2005.

Chen H, ja Zhao B (2010) Some questions on dispersion of human exhaled droplets in ventilation room: answers from numerical investigation. *Indoor Air*, 20, 95–111.

Cole EC, ja Cook CE (1998) Characterization of infectious aerosols in health care facilities. *Am J Infect Control*, 26, 453–464.

Eames I, Tang JWT, Li Y, ja Wilson P (2009) Airborne transmission of disease in hospitals. *J R Soc Interface*, 6, S697-S702.

Eickhoff TC (1994) Airborne nosocomial infection: a contemporary perspective. *Infect Cont Hosp Epidemiol*, 15, 10, 663–672.

Etheridge D, ja Sandberg M (1996) Building ventilation: theory and measurement. Wiley, 1996, ISBN: 978-0-471-96087-4.

Fanger PO, Melikov AK, Hanzawa H, ja Ring J (1988) Air turbulence and sensation of draught. *Energy and Buildings*, 1988;12:21–39.

Fernstrom A, ja Goldblatt M (2013) Aerobiology and its role in the transmission of infectious diseases. *Journal of Pathogens*, 2013, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/493960>.

FGI (2014) Guidelines for Design and Construction of Hospitals and Outpatient Facilities, ASHE, Chicago, IL, 2014.

Fitzgerald D, ja Haas DW (2005) Mycobacterium tuberculosis. In Mandell GL, Bennet JE, Dolin R (eds): *Principles and Practice of Infectious Diseases*, 6th edn, Philadelphia, Churchill Livingstone, 2005, pp. 2852–2886.

Gao N, ja Niu J (2006) Transient CFD simulation of the respiration process and inter-person exposure assessment. *Build Environ*, 41, 1214–1222.

Gupta JK, Lin C-H, ja Chen Q (2010) Characterizing exhaled airflow from breathing and talking, *Indoor Air*, 20:31–39.

Health Building Note 04-01 (2013) Adult In-patient Facilities. Department of Health, UK, 2013.

- Höppe P (1981) Temperatures of Expired Air under Varying Climatic Conditions.” *Int.J.Biometeor*,vol., 25:2:127–132.
- Kanerva M, Ollgren J, Virtanen MJ, ja Lyytikäinen O (2008) Sairaala infektiot aiheuttavat huomattavan tautitaakan. *Suomen Lääkärilehti*, 63, 18-19, 1697–1702.
- Kierat W, Bivolarova M, Zavrl E, Popiolek Z, ja Melikov A (2018) Accurate assessment of exposure using tracer gas measurements. *Build Environ*, 131, 163-173.
- Kokkonen A, Hyttinen M, Holopainen R, Salmi K ja Pasanen P (2014) Performance testing of engineering controls of airborne infection isolation rooms by tracer gas techniques. *Indoor Built Environ.*, 23, 994–1001.
- Koskela H, ja Maula H (2013) A CFD model of a swirl diffuser for heating and cooling modes. *Int J Vent.*, 12, 3, 159–166.
- Kundsins RB (1980) Documentation of airborne infection during surgery. *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 353, pp. 255–261, 1980.
- Kwon S-B, Park J, Jang J, Cho Y, Park D-S, Kim C, Bae G-N, ja Jang A (2012) Study on the initial velocity distribution of exhaled air from coughing and speaking. *Chemosphere*, 87, 1260–1264.
- Liu L, Li Y, Nielsen PV, Wei J ja Jensen RL (2017) Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people. *Indoor Air*, 27, 452–462.
- Magill SS, Edwards JR, Stat M, Bamberg W, Beldavs ZG, Dumyati G, Kainer MA, Lynfield R, Maloney M, McAllister-Hollod L, Nadle J, Ray, SM, Thompson DL, Wilson LE, ja Fridkin SK (2014) Multistate point-prevalence survey of health care-associated infections. *N Engl J Med*, 370, 13, 1198–1208.
- McMurray RG, Soares J, Caspersen CJ, ja McCurdy T (2014) Examining variations of resting metabolic rate of adults: a public health perspective. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 46(7), s. 1352–1358.
- Mundt E, Mathisen HM, Nielsen PV, ja Moser A (2004) Ventilation effectiveness. Brussels, Belgium: REHVA; 2004.
- Nazaroff W, Nicas M, ja Miller SL (1998) Framework for evaluating measures to control nosocomial tuberculosis transmission, *Indoor Air*, 8, 205–218.

Nicoud F, ja Ducros F (1999) Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor. *Flow, Turbulence and Combustion*, 62: 183–200.

Noakes CJ, Fletcher LA, Sleigh PA, Booth WB, Beato-Arribas B, ja Tomlinson N (2009) Comparison of tracer techniques for evaluating the behaviour of bioaerosols in hospital isolation rooms. *Proceedings of Healthy Buildings. 2009*; 9th international conference and exhibition, Syracuse, NY, USA. Paper #504.

Olmedo I, Nielsen PV, Ruiz de Adana M, ja Jensen RL (2013) The risk of airborne cross-infection in a room with vertical low-velocity ventilation. *Indoor Air*, 23, 62–73.

Olmedo I, Nielsen PV, Ruiz de Adana M, Jensen RL, ja Grzelecki P (2012) Distribution of exhaled contaminants and personal exposure in a room using three different air distribution strategies. *Indoor Air*, 22, 64–76.

Papineni RS, ja Rosenthal FS (1997) The size distribution of droplets in the exhaled breath of healthy human subjects. *J Aerosol Med*, 10, 2, 105–129.

Product document, Martin, Pro Smoke Super (ZR Mix) Fluid, Particle Size, Fluid Density and Refractive Index Values, Revision A.
[http://www.martin.com/en-us/support/technical-note?file=/files/files/productdocuments/90_HINTS/999/techdoc_8074.html&returncontent=true&ProductNumber=97120020,97120023&title=Particle Size, Fluid Density and Refractive Index Values](http://www.martin.com/en-us/support/technical-note?file=/files/files/productdocuments/90_HINTS/999/techdoc_8074.html&returncontent=true&ProductNumber=97120020,97120023&title=Particle%20Size,%20Fluid%20Density%20and%20Refractive%20Index%20Values), (accessed 29.8.2017).

Qian H ja Li Y (2010) Removal of exhaled particles by ventilation and deposition in a multibed airborne infection isolation room. *Indoor Air*, 20, 284–297.

Qian H, Li Y, Nielsen PV ja Hyldgaard CE (2008) Dispersion of exhalation pollutants in a two-bed hospital ward with a downward ventilation system. *Build Environ.*, 43, 344–354.

Qian H, Li Y, Nielsen PV, Hyldgaard CE, Wong TW ja Chwang ATY (2006) Dispersion of exhaled droplet nuclei in a two-bed hospital ward with three different ventilation systems. *Indoor Air*, 16, 111–128.

Richmond-Bryant J, Eisner AD, Brixey LA, ja Wiener R (2006 A) Short-term dispersion of indoor aerosols: can it be assumed the room is well-mixed? *Building and Environment*, 41, 156–63.

Richmond-Bryant J, Eisner AD, Brixey LA, ja Wiener R (2006 B) Transport of small airborne particles within a room. *Indoor Air*, 16, 48–55.

Ryynänen J (2007) Sairaalailmanvaihdon suunnitteluohjeita. Mikkelin ammattikorkeakoulu, Talotekniikan koulutusohjelma, opinnäytetyö, 2007.

Saarinen P, Kalliomäki P, Koskela H, ja Tang JWT (2018) Large-eddy simulation of the containment failure in isolation rooms with a sliding door – An experimental and modelling study. *Build Simul.* 11, 3, 585–596.

Saarinen P, Kalliomäki P, Tang JWT, ja Koskela H (2015) Large eddy simulation of air escape through a hospital isolation room single hinged doorway – validation by using tracer gases and simulated smoke videos. *PLoS ONE* 10(7): e0130667. doi:10.1371/journal.pone.0130667.

Salmi K, Kähkönen E, Holopainen R, ja Reijula K (2012) Ilmavälitteisten infektioiden hallinta sairaaloiden eristystiloissa – loppuraportti. Työterveyslaitos, Helsinki, 2012. ISBN 978-952-261-169-7.

Seppänen O, Lönnqvist S, Säteri J, Railio J, Strand T, ja Ahola M (2017) Ilmanvaihdon mitoituksen perusteet -loppuraportti Ympäristöministeriön hankkeista, FINVAC ry, Helsinki, 30.11.2017.

Smits AJ, ja Lim TT (Eds.) (2000) *Flow Visualization: Techniques and Examples*, World Scientific, 2000. ISBN 1908977183.

Standard EN ISO 7726 (2001) Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities.

Verheyen J, Theys N, Allonsius L, ja Deschamps F (2011) Thermal comfort of patients: Objective and subjective measurements in patient rooms of a Belgian healthcare facility. *Build Environ*, 46, 1195-1204.

Villafruela JM, Castro F, San Jose JM, ja Saint-Martin J (2013) Comparison of air change efficiency, contaminant removal effectiveness and infection risk as IAQ indices in isolation rooms. *Energy and Buildings*, 57, 210-219.

Villafruela JM, Olmedo I, Ruiz de Adana M, Mendez C, ja Nielsen PV (2013) CFD analysis of the human exhalation flow using different boundary conditions and ventilation strategies. *Build Environ*, 62, 191–200.

Xie X, Li Y, Chwang ATY, Ho PL, ja Seto WH (2007) How far droplets can move in indoor environments e revisiting the wells evaporation-falling curve. *Indoor Air*, 17, 211–225.

Xu C, Nielsen PV, Gong G, Liu L, ja Jensen RL (2014) Measuring the exhaled breath of a manikin and human subjects, *Indoor Air*, 25:2:188–197.

Ympäristöministeriö (2012) D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto.

Ympäristöministeriö (2018) Suomen säädöskokoelma, asetus 1009/2017 uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta.

Zhai ZJ, Zhang Z, Zhang W ja Chen Q (2007) Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environments by CFD: Part 1– Summary of Prevalent Turbulence Models. *HVAC&R Research*, 13, 6, 853-870.

Zhang Z, Chen X, Mazumdar S, Zhang TF, ja Chen QY (2009) Experimental and numerical investigation of airflow and contaminant transport in an airliner cabin mockup. *Build Environ*, 44, 85–94.