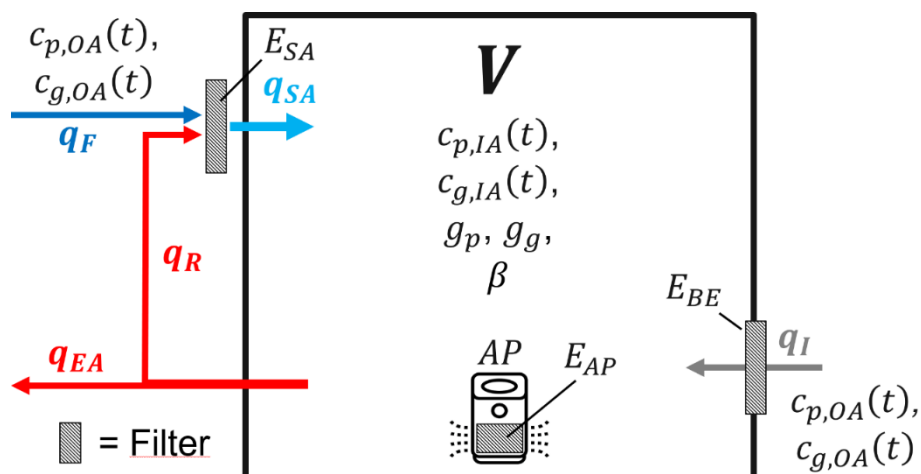


TUTKIMUSRAPORTTI

VTT-R-00637-23



Sisäilmaston tuottavuustarkastelut ja ilmanvaihtoratkaisut FutureSpaces-hankkeessa

Kirjoittajat: Hannu Salmela, Mia Ala-Juusela, Niko Siilin, Ilpo Kulmala

Luottamuksellisuus: VTT Public

Versio: 28.9.2023



Raportin nimi Sisäilmaston tuottavuustarkastelut ja ilmanvaihtoratkaisut FutureSpaces-hankkeessa	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Business Finland Porkkalankatu 1 Helsinki	Asiakkaan viite FutureSpaces VTT
Projektin nimi BF_FutureSpaces	Projektin numero/lyhytnimi 127506
Raportin laatija(t) Hannu Salmela, Mia Ala-Juusela, Niko Siilin, Ilpo Kulmala	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 39
Avainsanat Ilmansuodatus, ilmanvaihdon energiantalteenotto, laskentatyökalu, lämpöviihtyvyys, palvelukonsepti, sisäilma, sisäilmasto, tuottavuus	Raportin numero VTT-R-00637-23
Tiivistelmä <p>Tämä julkaisu esittää sisäilmaston tuottavuustarkasteluja ja ilmanvaihtoratkaisuja, jotka toteutettiin FutureSpaces-hankekokonaisuudessa 2020-2023. Hankekokonaisuuden tavoitteena oli kehittää uudenlainen yritysconsortion muodostama palvelukonsepti, joka varmistaa eri aikakauden rakennuksille korjausten yhteydessä korkeatasoiset ja terveelliset olosuhteet sekä energiatehokkuuden myös pitkälle tulevaisuuteen.</p> <p>VTT kehitti hankkeessa uuden menetelmän ihmiskehon eksergiankulutuksen laskemiseen perustuvaan työn tuottavuuden arviointiin, hiukkasten sisä-ulkosuhteen arviointimallin, uuden laskentatyökalun sisäilman epäpuhtauksien ja niiden tuottavuusvaikutuksien arviointiin, ratkaisuja ilmanvaihdon energiantalteenottojärjestelmien lämmönsiirto- ja tilatehokkuuden parantamiseksi sekä kestävä kehityksen mukaisen sisäilmastopalvelun ilmansuodatuskonseptin.</p> <p>Eksergiankulutusmenetelmän kehittämistä ja testaamista varten toteutettiin lämpöviihtyvyysmittauksia ja kyselytutkimus kahdessa toimistorakennuksessa kesä- ja talviolosuhteissa. Fysikaalisiin mittauksiin perustuva terminen viihtyisyys koe kohteissa oli kokonaisuutena melko hyvä kevättalvella ja kesällä. Kovalla pakkasella lämpöviihtyvyyden tavoitearvoja ei aina saavutettu. Kyselyjen otanta oli suppea johtuen koe kohteiden etätyöpakosta/suosituksista hankkeen aikana.</p> <p>Hiukkasten sisä-ulkosuhteen arviointimallin ja sisäilman laskentatyökalun avulla voidaan sisäilman hiukkas- ja kaasumaisia pitoisuuksia arvioida luotettavasti, mikä syventää tietämystä ja mahdollistaa kustannustehokkaiden altistumisen vähentämiseen tähtäävien ratkaisujen kehittämisen. Sisäilmastopalvelun ilmansuodatuskonsepti on hyödynnettävissä eri rakennustyypeille, ilmanvaihtojärjestelmille ja epäpuhtauksille. FutureSpaces-hankkeessa konseptia hyödynnettiin erityisesti tuloilman hiukkasmaisten epäpuhtauksien suodatukseen koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla varustetuissa palvelu- ja toimistorakennuksissa.</p> <p>Kehitetty ilmanvaihdon energiantalteenottoratkaisu mahdollistaa lämmöntalteenoton (LTO) tehokkuuden parantamisen merkittävästi. Tämän ansiosta LTO-laitteiston kokoa voidaan pienentää minkä ansiosta uudenlaisia LTO ratkaisuja voidaan asentaa joustavasti esimerkiksi korjausrakentamisen yhteydessä. Samalla asuntojen sisäilman laatu paranee, kun ilmanvaihto on riittävä ja hallittu.</p>	
Luottamuksellisuus	VTT Public
Tampere 29.9.2023 Laatija Hannu Salmela Research Team Leader	Tarkastaja Arto Säämänen Principal Scientist
VTT:n yhteystiedot Visiokatu 4, 33720 Tampere	
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Asiakas: 1 kopio VTT:n arkisto: 1 kopio	
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>	



Hyväksyminen

TEKNOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS VTT OY

Päivämäärä:

29.9.2023

Allekirjoitus:

DocuSigned by:
Heidi Krohns-Välimäki
C8D3A9772BFA41B...

Nimi:

Heidi Krohns-Välimäki

Asema:

Tutkimuspäällikkö



Alkusanat

Tämä julkaisu esittää sisäilmaston tuottavuustarkasteluja ja ilmanvaihtoratkaisuja, jotka toteutettiin FutureSpaces-hankekokonaisuudessa 2020-2023.

Hankekokonaisuuden ohjausryhmään kuuluivat edustajat konsortion yrityksistä ja tutkimusorganisaatioista: A-Insinöörit Suunnittelu Oy, Bitwise Oy, Dekati Oy, Fennia Kiinteistöt Oy, Fidelix Oy, Koja Oy, Tampereen Tilapalvelut Oy, Tampereen yliopisto, TPI Control Oy, Vaisala Oyj ja VTT. Kokonaisuuden koordinaattorina toimi Tamlink Oy. Tutkimuksesta vastasivat Tampereen yliopisto ja VTT. Tutkimushankkeen VTT:n vetämää osuutta ovat rahoittaneet Business Finland, FutureSpaces-konsortion yritykset ja VTT.

VTT kiittää ohjausryhmää, rahoittajia sekä koekohteiden tutkimuksiin osallistuneita henkilöitä aktiivisuudesta ja kiinnostuksesta hanketta kohtaan.

Tampere 29.9.2023

Tekijät



Sisällysluettelo

Alkusanat.....	3
1. Johdanto.....	6
2. Tavoite.....	6
3. Kohteen kuvaus.....	7
3.1 Lämpöihtiivyyys ja työn tuottavuus.....	7
3.2 Hiukkasten sisä-ulkosuhteen arviointimalli.....	7
3.3 Sisäilman laskentatyökalu.....	7
3.4 Ilmanvaihdon energiantalteenotto.....	7
3.5 Ilmansuodatuskonsepti.....	8
4. Rajaukset.....	8
4.1 Lämpöihtiivyyys ja työn tuottavuus.....	8
4.2 Hiukkasten sisä-ulkosuhteen arviointimalli.....	8
4.3 Sisäilman laskentatyökalu.....	9
4.4 Ilmanvaihdon energiantalteenotto.....	9
4.5 Ilmansuodatuskonsepti.....	9
5. Menetelmät.....	9
5.1 Lämpöihtiivyyys ja työn tuottavuus.....	9
5.1.1 Mittaukset.....	9
5.1.2 Mallit ja niiden testaus.....	10
5.2 Hiukkasten sisä-ulkosuhteen arviointimalli.....	11
5.3 Sisäilman laskentatyökalu.....	13
5.3.1 Laskentatyökalun toteutus ja rakenne.....	13
5.3.2 Massatasemalli.....	14
5.3.3 Suhteellinen sairaspöissaoloarvio.....	14
5.3.4 Tarkasteltava tila, laskentatyökalun validointi ja skenaariot.....	15
5.4 Ilmanvaihdon energiantalteenotto.....	15
5.5 Ilmansuodatuskonsepti.....	17
6. Tulokset.....	17
6.1 Lämpöihtiivyyys ja työn tuottavuus.....	17
6.1.1 Lämpöihtiivyyys mittauskohteissa.....	17
6.1.2 Lämpöihtiivyyys eksergiamallia käyttäen.....	20
6.1.3 Lämpöihtiivyyden ja tuottavuuden välinen yhteys.....	20
6.2 Hiukkasten sisä-ulkosuhteen arviointimalli.....	22
6.3 Sisäilman laskentatyökalu.....	24
6.3.1 Laskentatyökalun validointi.....	24
6.3.2 Tuloilman suodatus.....	25
6.3.3 Kiertoilmasuhteen vaikutus.....	25
6.3.4 Ilmanpuhdistimien vaikutus.....	26
6.3.5 Raitisilmavirran vaikutus.....	27
6.4 Ilmanvaihdon energiantalteenotto.....	29
6.5 Ilmansuodatuskonsepti.....	30



6.5.1	Tuloilman suodatusluokat	30
6.5.2	Laboratoriomittaukset.....	30
6.5.3	Suodattimen valinta I/O-suhteen ja läpäisevimmän hiukkaskoon perusteella.....	32
6.5.4	Sisäilmastopalvelun ilmansuodatuskonsepti	33
7.	Tulosten tarkastelu	33
7.1	Lämpöviihtyvyys ja työn tuottavuus.....	33
7.2	Hiukkasten sisä-ulkosuhteen arviointimalli	33
7.3	Sisäilman laskentatyökalu	34
7.4	Ilmanvaihdon energiantalteenotto	34
7.5	Ilmansuodatuskonsepti.....	35
8.	Johtopäätökset	35
8.1	Lämpöviihtyvyys ja työn tuottavuus.....	35
8.2	Hiukkasten sisä-ulkosuhteen arviointimalli	36
8.3	Sisäilman laskentatyökalu	36
8.4	Ilmanvaihdon energiantalteenotto	36
8.5	Ilmansuodatuskonsepti.....	36
9.	Yhteenveto	37
	Lähdeviitteet	37

1. Johdanto

FutureSpaces -hankekokonaisuuden tavoitteena oli kehittää uudenlainen yrityskonsortion muodostama palvelukonsepti, joka varmistaa eri aikakauden rakennuksille korjausten yhteydessä korkeatasoiset ja terveelliset olosuhteet sekä energiatehokkuuden myös pitkälle tulevaisuuteen. Konseptin tavoitteena oli tehokkaampi ja suoraviivaisempi tapa toteuttaa palvelu- ja liikerakennuksille ennakoivaa korjausta. Kohdeyryhmänä olivat erityisesti koulut, päiväkodit ja toimistorakennukset. Palvelukonseptin avulla on tavoitteena saada uusia liiketoimintamahdollisuuksia suomalaiselle kiinteistöjen korjaamiseen ja ylläpitoon liittyvälle osaamiselle sekä vientiä ulkomaille. (Vinha 2022)

VTT johti FutureSpaces -tutkimushankkeen sisäilmaston tuottavuustarkasteluihin ja ilmanvaihtoratkaisuihin liittyneitä työpaketteja 3 ja 7 (kuva 1).



Kuva 1. FutureSpaces-hankkeen rakenne, yritysosapuolet ja yhteistyö tutkimuksen kanssa.

Kaupallinen FutureSpaces-palvelukonsepti tunnetaan kirjoitushetkellä nimellä Experisense (A-Insinöörit, 2023).

2. Tavoite

VTT:n tutkimusosion keskeiset tavoitteet olivat:

- Kehittää ja validoida uusi menetelmä ihmiskehon eksergiankulutuksen laskemiseen perustuvaan työn tuottavuuden arviointiin
- Uuden laskentatyökalun kehittäminen sisäilman epäpuhtauksien ja niiden tuottavuusvaikutusten arviointiin. Erityisesti huomioidaan sisäilman hiukkasmaisia epäpuhtauksia ja niiden vaikutusta sairaspölyihin.
- Ilmanvaihdon energiantalteenottojärjestelmien lämmönsiirto- ja tilatehokkuuden merkittävä parantaminen lisääviä valmistusmenetelmiä hyödyntävillä ratkaisuilla.
- Kestävän kehityksen mukaisten ilmansuodatusratkaisujen konseptointi tulo- ja sisäilman hiukkasmaisten epäpuhtauksien nykyistä tehokkaampaan suodattamiseen.



3. Kohteen kuvaus

3.1 Lämpöviihtyvyys ja työn tuottavuus

Sisäympäristön lämpöolosuhteet ovat yksi tärkeimmistä työn tuottavuuteen vaikuttavista asioista, sisäilman laadun sekä visuaalisen ja akustisen ympäristön lisäksi. Ihmisten työskentelylle tuottavimpia lämpöolosuhteita arvioidaan tyypillisesti PMV- (Predicted Mean Vote) tai PPD-arvoihin (Predicted Percentage of Dissatisfied) perustuvilla malleilla (esim. Kosonen ja Tan 2004, Roelofsen 2002, Lan ym. 2012) tai jopa pelkkään huonelämpötilaan perustuvilla malleilla (Seppänen ym. 2006). VTT:llä on kehitetty uusi, ihmiskehon eksergiankulutuksen (HBEC, Human Body Exergy Consumption) tasoon perustuva laskentamenetelmä, jolla voidaan arvioida tilan ominaisuuksien vaikutusta ihmisten työn tuottavuuteen tarkemmin kuin aiemmillä menetelmillä (Ala-Juusela ja Shukuya 2014). Optimaalisella lämpöolosuhteiden säädöllä on merkittävä rooli myös rakennusten energiankulutuksen vähentämisessä.

Tutkimuksessa tehtyjen mittausten avulla pyrittiin selvittämään, miten hyvin uusi lämpöviihtyvyyden arviointimenetelmä ennustaa lämpöviihtyvyyttä eri olosuhteissa. Mittaustuloksia verrattiin teoreettisilla malleilla saatuihin tuloksiin. Mittaustuloksien avulla testattiin myös uutta tuottavuuden arviointiin kehitettyä menetelmää, joka perustuu yllä mainittuun ihmiskehon eksergiankulutuksen laskentamenetelmään. Tätä verrattiin olemassa oleviin ympäristön lämpöolosuhteisiin perustuviin tuottavuusmalleihin.

3.2 Hiukkasten sisä-ulkosuhteen arviointimalli

Sisäilman terveydelle haitalliset pienhiukkaset ovat pääosin peräisin ulkoilmasta, josta ne kulkeutuvat rakennusten sisäilmaan ilmanvaihdon, rakennusten vuotojen sekä avoimien ovien ja ikkunoiden kautta. Sisäilman hiukkaspitoisuuteen vaikuttaa lisäksi hiukkasten laskeutuminen pinnoille, mikä on voimakkaasti hiukkaskoosta riippuvainen.

Hyvällä tuloilman suodatuksella voidaan vaikuttaa merkittävästi koneellisen ilmanvaihdon tuloilman pienhiukkaspitoisuuteen. Sen sijaan vuotoilmavirtojen mukana kulkeutuviin pienhiukkasilla tuloilman suodatuksella ei ole vaikutusta. Vuotoilmavirta on myös merkittävä tekijä rakennusten energiankulutuksessa.

Rakennuksen tiiveyden lisäksi vuotoilmavirrat vaihtelevat voimakkaasti ympäristön olosuhteista kuten tuuleen suunnasta ja nopeudesta riippuen (Kulmala ym. 2020). Hiukkasten sisä-ulkosuhteen arviointimallin avulla voidaan ratkaista myös vuotoilmavirta kun sisä- ja ulkoilman ajasta ja koosta riippuvat hiukkaspitoisuudet tunnetaan mittausten perusteella. Hankkeessa validoitiin laskentamallia vertaamalla koekohteessa mittauksin saatuja hiukkaspitoisuuksia laskennallisiin arvoihin.

3.3 Sisäilman laskentatyökalu

Sisäilmanlaadun arvioimiseksi kehitettiin laskentatyökalu, jonka avulla voidaan tarkastella sekä sisäilman hiukkaspitoisuutta hiukkaskokokohtaisesti että kaasumaisten epäpuhtauksien pitoisuuksia sisätilassa. Työkalu huomioi merkittävimmät epäpuhtauksien kulkeutumisreitit ja mahdollistaa sekä ulko- että sisälähteiden vaikutuksen tutkimisen. Lisäksi työkalun avulla voidaan arvioida erilaisten sisäilmanlaatua parantavien ratkaisujen tehokkuutta. FutureSpaces -hankkeessa laskentatyökalun avulla tarkasteltiin erilaisten tuloilman suodatusratkaisujen, kiertoilmasuhteen, ilmanpuhdistimien ja ilmanvaihtokertoimen vaikutusta sisäilmanlaatuun.

3.4 Ilmanvaihdon energiantalteenotto

Rakennukset kuluttavat globaalistikin merkittävän osan energiasta. Kansainvälisen energijärjestön IEA:n mukaan rakennusten osuus koko maailman energiankulutuksesta on 30 %. Ilmanvaihdon ja ilmastoinnin osuuden tästä on arvioitu olevan noin 40 % (González-Torres ym. 2022), joten rakennusten ilmanvaihto aiheuttaa noin kymmenesosan maailman energiankulutuksesta.



Lämmönvaihtimilla voidaan ottaa talteen valtaosa poistoilman energiasta. Tavallisimmat lämmönvaihtimet ovat pyöriviä regeneraattoreita tai vastavirta-/ristivirtatyypisiä rekuperatiivisia lämmöntalteenottolaitteita. Pyörivillä regeneraattoreilla päästään parhaaseen hyötysuhteeseen, jopa yli 80 %:iin, mutta niiden ongelmia ovat monimutkainen rakenne roottoria pyörittävine moottoreineen sekä aikaa myöten kuluvat tiivisteet, mikä voi aiheuttaa vuotoja poistopuolelta tuloilmaan. Tämä on merkittävä haitta varsinkin, jos poistoilmassa on terveydelle vaarallisia aineita kuten esimerkiksi patogeenisiä bioaerosoleja.

Rekuperatiivisissa lämmöntalteenottolaitteissa poisto- ja tuloilmavirrat kulkevat omia kanaviaan pitkin eivätkä sekoitu keskenään. Näiden laitteiden etuna on yksinkertainen rakenne, mutta niiden hyötysuhde on huonompi kuin pyörivillä lämmöntalteenottolaitteilla, tyypillisesti luokkaa 50-65 %.

Ilmanvaihdon energian talteenotto on helppointa toteuttaa uudisrakennuksissa, joissa jo suunnitteluvaiheessa voidaan ottaa huomioon ilmanvaihdon koneiden ja kanavistojen tilavaatimukset. Hankalinta ilmanvaihdon uudistaminen on olemassa olevissa rakennuksissa kuten vanhoissa kerrostaloissa, joissa ilmanvaihto on painovoimainen tai pelkkään poistoilmanvaihtoon perustuva.

Lämmönvaihtimen hyötysuhde riippuu ilmavirtakanavien lämmönsiirtopinta-alasta sekä virtauskanavan hydraulisesta halkaisijasta. Virtauskanavan pienentyessä lämmönsiirtokerroin kasvaa, mutta samalla lisääntyy kanaviston aiheuttama painehäviö, mikä puolestaan lisää puhaltimen energiankulutusta.

3.5 Ilmansuodatuskonsepti

Ilmanvaihto ja ilmansuodatus ovat tärkeitä tekijöitä sisäilman epäpuhtauksien kontrolloimiseksi ja epäpuhtauksiin liittyvien kielteisten terveysvaikutusten vähentämiseksi. Riittämätön sisäilman laatu aiheuttaa EU:ssa yli kahden miljoonan terveen elinvuoden menetyksen ja vastaava luku Suomessa on 35000 (Hänninen ja Asikainen 2013, Hänninen ym. 2020). Nämä terveysvaikutukset johtuvat pääasiassa ilmansaasteiden kulkeutumisesta ulkoilmasta sisätiloihin ilmanvaihdon kautta tai hallitsemattomina vuotoina rakennuksen ikkunoiden, ovien tai rakenteiden kautta.

Ympäristöaltisteiden aiheuttamista haitoista selkeästi suurin haitta liittyy ulkoilman hiukkasiin (Hänninen ym. 2020), jotka kulkeutuvat ensisijaisesti ilmanvaihdon kautta sisätiloihin. FutureSpaces-ilmansuodatuskonsepti keskittyykin tuloilman hiukkassuodatukseen koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla varustetuissa rakennuksissa.

4. Rajaukset

4.1 Lämpöviihtyvyys ja työn tuottavuus

Ihmiskehon eksergiankulutukseen perustuva tuottavuusmalli kuvaa hetkellistä tai staattista tilannetta. Ihmiskeho reagoi joihinkin ympäristön ärsykkeisiin nopeastikin, ja esimerkiksi vaatetuksen tai ilman nopeuden muutokset vaikuttavat eksergiankulutukseen lyhyellä aikavälillä. Mallin pääasiallisena tarkoituksena on arvioida tilan ominaisuuksien vaikutuksia, jotta voidaan säätää esim. lämmitystä tai ilmanvaihtoa keskimääräiselle käyttäjälle sopivaksi tai vaihtoehtoisesti tilan pääasiallisen käyttäjän mieltymyksiin sopivaksi. Mallin tarkoituksena on tukea energiankulutuksen optimointia siten, että se parhaalla mahdollisella tavalla tukee tilan käyttäjän toimintoja.

4.2 Hiukkasten sisä-ulkosuhteen arviointimalli

Mallissa ei oteta huomioon hiukkasten muuntumaprosesseja kuten nukleaatiota, missä kaasusta syntyy ultrapieniä hiukkasia aerosolimoodiin, eikä koagulaatiota, missä hiukkaset tarttuvat toisiinsa suuremmiksi hiukkasiksi. Lisäksi oletetaan että hiukkasten koko ei muutu tarkastelun aikana haihtumalla tai kondensaatiolla.



4.3 Sisäilman laskentatyökalu

Laskentamallilla tehdyt tarkastelut keskittyivät ulkoilman pienhiukkasten ja tilankäyttäjien uloshengittämän hiilidioksidin tuottamien sisäpitoisuuksien tarkasteluun eikä sisähiukkaslähteitä tarkasteltu. Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus sekä tilassa olevien ihmisten määrä oletettiin vakioiksi tarkastelujakson aikana. Myöskään hiukkasten muuntumaprosesseja ei huomioitu.

4.4 Ilmanvaihdon energiantalteenotto

Energian talteenottoa tutkittiin kokeellisesti pienen mittakaavan ratkaisulla, jotka valmistettiin 3D-tulostuksella. Valmistustekniikan rajoituksista johtuen ratkaisujen ilmavirrat olivat verrattain pieniä, luokkaa 10 l/s.

4.5 Ilmansuodatuskonsepti

Laboratoriomittaukset toteutettiin puhtaille suodattimille. Suodattimien kuormittumista tai kosteuden vaikutusta suodatustehokkuuteen tai painehäviöön ei seurattu laboratorio- ja kenttätesteissä.

Ilmansuodatuskonsepti keskittyi hankkeessa tuloilman hiukkassuodatuksen. Konseptia on jatkossa mahdollista laajentaa mm. huoneilman suodatuksen ja puhdistuksen.

5. Menetelmät

5.1 Lämpöviihtyvyys ja työn tuottavuus

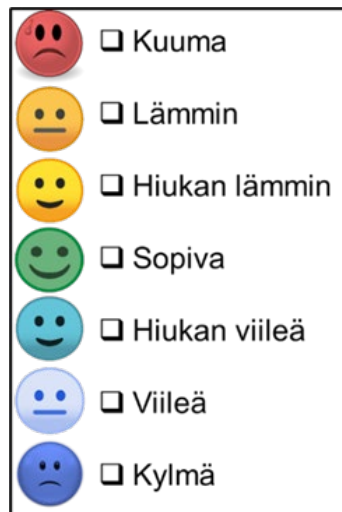
Työn tuottavuuden arviointiin kehitetty laskentamenetelmä perustuu ihmiskehon eksergiankulutuksen laskentamenetelmään, jonka japanilainen tutkimusryhmä kehitti vaihtoehtoiseksi menetelmäksi lämpövihtyvyyden arvioimiseen (Shukyua ym. 2009 ja 2012). Kyseistä menetelmää on jonkin verran testattu, mutta ei pohjoisissa olosuhteissa, joten oli tarpeellista todentaa mittauksen avulla sen toimivuutta lämpövihtyvyyden arvioinnissa muihin lämpövihtyvyyden arviointiin tarkoitettuihin malleihin verrattuna. Samat mittaukset soveltuivat myös tuottavuusmallin validointiin.

5.1.1 Mittaukset

Laskentamenetelmän testaamiseksi tehtiin vuoden 2021 aikana mittauksia kahdessa Helsingin seudulla ja Etelä-Suomessa sijaitsevassa toimistorakennuksessa (F- ja K-rakennus), talvi- ja kesäolosuhteissa.

Lämpövihtyvyyttä selvitettiin kyselytutkimuksella, jossa kysyttiin tilan käyttäjiltä kokemusta lämpötilasta seitsenasteisella skaalalla kuuman ja kylmän välillä (-3...3). Kyselytutkimuksen lisäksi samassa tilassa mitattiin fyysisiä olosuhteita, kuten säteilylämpötilaa, huonelämpötilaa, ilmankosteutta ja ilman virtausnopeutta ("vetoa"). Ennen lämpövihtyvyyden mittausta mittaukseen osallistuville esiteltiin mittauksen tarkoitus, perusteet ja sisältö sekä lämpövihtyvyyssasteikon eri arvojen kuvaukset (mitä tarkoittaa esim. "viileä" tässä yhteydessä). Henkilötietoja tai henkilökohtaiseen terveyteen liittyviä tietoja ei kerätty.

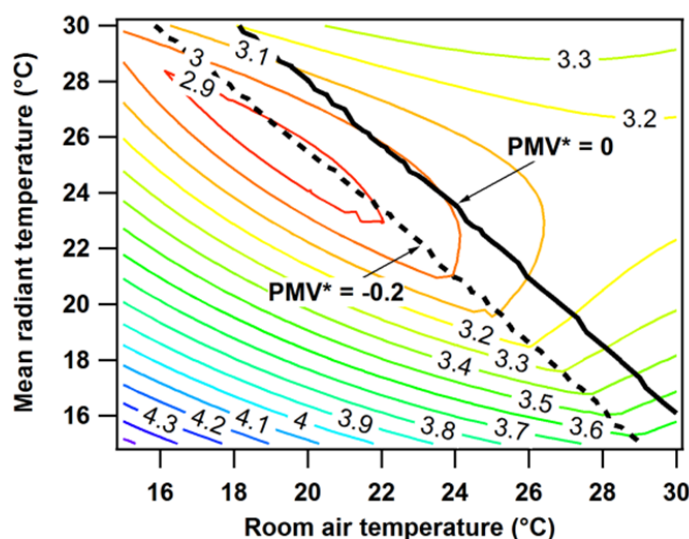
Fysikaalisten suureiden mittaukset tehtiin kalibroiduilla mittalaitteilla soveltaen ASHRAE 55P-standardia (2003) ja Sisäilmastoluokitusta 2018 (SIY 2018). TSV-arvon mittaamiseen käytettiin erityisesti tätä käyttö-tarkoitusta varten kehitettyä hymiönaama-asteikkoa (kuva 2), jonka avulla ASHRAE 55P-standardin mukaista lämpövihtyvyyden asteikkoa pyrittiin saamaan tilan käyttäjälle intuitiivisemmaksi. TSV-arvon lisäksi kysyttiin suullisesti arviota mahdollisesta vedontunteesta. Eksergiaperustaiseen malliin tarvitaan lisäksi tietoa ulkoilman lämpötilasta ja kosteudesta sekä ihmisen metaboliatasosta ja vaatetuksesta. Ulkoilman olosuhteiden tila saatiin Ilmatieteen laitoksen tilastoista. Henkilön aktiivisuustasoa arvioitiin havainnoimalla tekikö ko. henkilö mittaushetkellä tai sen välittömässä yhteydessä töitä istuen vai seisten. Vaatetusta arvioitiin havainnoimalla täyttikö vaatetus suurin piirtein normaalin talvi- ja kesävaatetuksen kriteerit (= ei suuria poikkeamia).



Kuva 2. Lämpöviihtyvyyden mittari.

5.1.2 Mallit ja niiden testaus

Seuraavassa vaiheessa laskettiin mittaustulosten perusteella ihmiskehon eksergiankulutuksen minimiarvojen esiintyvyys mitatuissa olosuhteissa, ja verrattiin niitä TSV- ja PMV-arvoihin. Tavoitteena oli arvioida eksergiamallin toimivuutta lämpöviihtyvyyden tarkasteluun. Aiemmissä tutkimuksissa (Roelofsen 2002, Kosonen ja Tan 2004, Lan ym. 2012, Wu ym. 2012) oli todettu, että paras tuottavuus kesällä ei esiinny tavallisesti käytettyjen lämpöviihtyvyydshallien osoittamassa parhaan viihtyvyyden tuottamissa olosuhteissa (jolloin esim. $PMV = 0$), vaan hiukan näitä viileämmissä olosuhteissa ($PMV = -0,6 \dots -0,2$). PMV-arvon laskemiseen käytetään operatiivista lämpötilaa, jolloin saadaan laaja valikoima sopivia ilman lämpötilan (T_a) ja säteilylämpötilan (T_r) yhdistelmiä. Käytännön toimijoiden kokemukset näyttivät kuitenkin osoittavan, että paras viihtyvyys saavutetaan ennemminkin pienellä alueella näiden yhdistelmiä. Ihmiskehon eksergiankulutuksella näyttäisi olevan minimi hiukan $PMV=0$ arvoa alempana, ja pienemmällä T_a , T_r alueella (kuva 3). Eri tutkimusryhmien laskelmat näyttäisivät tukevan tätä tulosta, myös pohjoisissa olosuhteissa (Isawa ym. 2003, Prek 2005, Shukuya 2006, Tokunaga ja Shukuya 2011, Simone ym. 2011, Ala-Juusela ja Shukuya 2014). Mutta mittauksia ei toistaiseksi ollut käytettävissä mallin validoimiseksi pohjoisissa olosuhteissa.



Kuva 3. Ihmiskehon eksergiankulutustasot vs. PMV-arvot 0 ja -0.2 ilman ja säteilylämpötilan funktiona (Ala-Juusela ja Shukuya 2014).

Yllä mainitut havainnot johtivat myös ajatukseen, että ihmiskehon eksergiankulutustasoon perustuva malli voisi olla sopiva myös työn tuottavuuden mallintamiseen. Näin saataisiin tarkempi kuva parhaan mahdollisen tuottavuuden tukemiseksi tarvittavista lämpöolosuhteista, ja voitaisiin käyttää olosuhteiden säätelyyn mahdollisimman vähän energiaa.

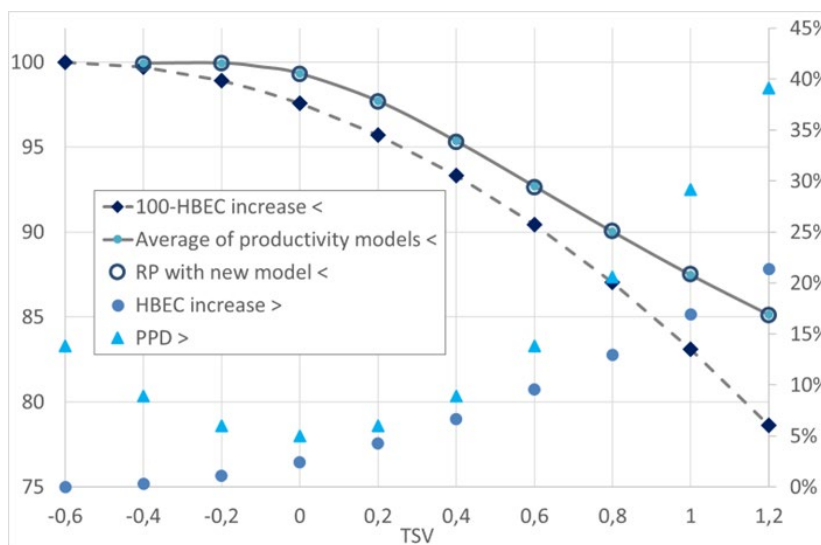
VTT:llä kehitetty uusi malli perustuu aiemmin kehitettyihin malleihin tuottavuuden ja lämpötilan, PPD- tai PMV-arvojen välisestä yhteydestä (Kosonen ja Tan 2004, Roelofsen 2002, Lan ym. 2012). Sen kehittämiseksi yhdistettiin näihin aiempia tuloksia TSV-arvon ja HBEC-arvon välisestä yhteydestä (Simone ym. 2011). Se antaa arvion suhteellisesta tuottavuudesta (RP, Relative Productivity) mitatuissa olosuhteissa (Ala-Juusela 2017):

$$RP = -3.52644669 \cdot 10^{-5} \cdot RHX^5 + 1.56773333 \cdot 10^{-2} \cdot RHX^4 - 2.78542858 \cdot RHX^3 + 247.250224 \cdot RHX^2 + 10964.7862 \cdot RHX + 194416.08,$$

jossa RP on suhteellinen tuottavuus, % maksimista ja RHX on suhteellinen ihmiskehon eksergiankulutustaso (HBEC minimi/HBEC todellinen)

Jos todellinen TSV arvo on saatavissa, voi ihmiskehon eksergiankulutustason laskea Simone ym. kehittämällä mallilla, muussa tapauksessa tarvitaan tietoa ympäristön olosuhteista. TSV-arvon sijaan ei voida käyttää PMV-arvoa, sillä se perustuu rajattuun määrään tietoa ympäristön tilasta.

Uuden mallin antamat parhaat suhteellisen tuottavuuden arvot osuvat jälleen kohtaan, jossa lämpövihtyvyys on hieman viileän puolella kesäolosuhteissa (kuva 4). Uusi malli rajoittuu lämpövihtyvyysarvoon TSV tai PMV > -0,6.



Kuva 4. Uuden mallin antamat suhteellisen tuottavuuden arvot verrattuna aiempien mallien keskimääräiseen arvoon, PPD-arvoon ja ihmiskehon eksergiankulutuksen suhteelliseen arvoon.

Mittaus tuloksia käytettiin lämpövihtyvyysmallin testaamisen lisäksi tuottavuuden laskemiseen mittausolosuhteissa uudella mallilla ja verrattiin tuloksia aiemmin kehitettyihin malleihin. Näin pyrittiin arvioimaan uuden laskentamallin käytettävyyttä ihmistyön tuottavuuden ennustamiseen tietyissä sisäolosuhteissa.

5.2 Hiukkasten sisä-ulkosuhteen arviointimalli

Sisäilman ajasta ja hiukkaskoosta riippuvaa pitoisuutta akkumulaatiomoodissa (0.1 - 1 µm) $C(t, d)$ voidaan arvioida seuraavan yhtälön avulla

$$VdC(t, d) = [G + qC_{OA}(t, d)(1 - E(d)) + q_L P(d)C_{OA}(t, d) - qC(t, d) - q_L C(t, d) - \beta(d)C(t, d)V] dt,$$

missä

V on huoneen tilavuus

G on hiukkastuotto huoneen sisällä

q on koneellisen ilmanvaihdon ilmavirta

$C_{OA}(t, d)$ ajasta ja hiukkaskoosta riippuva ulkoilman pitoisuus

$E(d)$ on tuloilmasuodatuksen erotusaste

q_L on vuotoilmavirta

$P(d)$ on hiukkasten läpäisy rakennuksen vaipan läpi

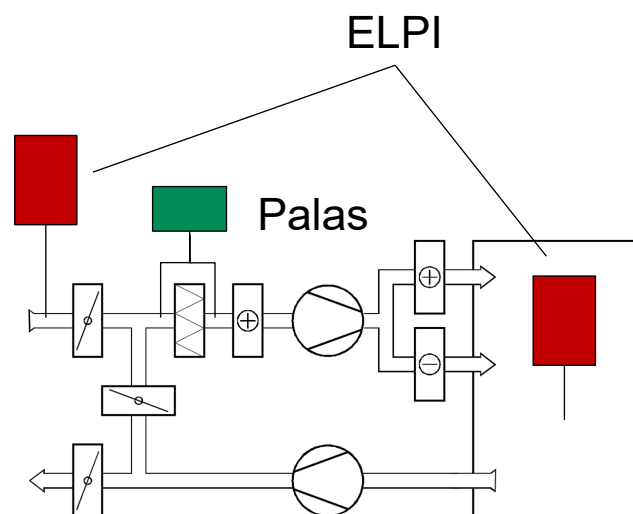
$\beta(d)$ on depositio huoneen pinnoille

Hiukkasten sisä-ulkosuhte I/O voidaan periaatteessa arvioida pitoisuuksien $C(t, d)/C_{OA}(t, d)$ perusteella. Yhtälöä 1 ei kuitenkaan ole yleensä mahdollista ratkaista analyttisesti, koska ulkoilman pitoisuus $C_{OA}(t, d)$ vaihtelee satunnaisesti ja voimakkaasti. Tämän vuoksi arviointimallissa sisäilman pitoisuus lasketaan integroimalla yhtälö numeerisesti käyttäen lähtötietona ajallisesti vaihtelevaa ulkoilman pitoisuutta $C_{OA}(t, d)$.

Mallissa on myös muita yleensä tuntemattomia tekijöitä kuten vuotoilmavirta q_L ja hiukkasten läpäisy P rakennuksen vaipan läpi. Läpäisyä voidaan arvioida kirjallisuudesta löytyneiden tutkimusten perusteella. Näissä on havaittu, että rakennuksen vaippa toimii tehokkaana suodattimena nanokoon hiukkasille sekä suurille, yli 10 mikrometrin kokoisille hiukkasille. Läpäisyllä on maksimi kokoalueella 0.1 - 1 mikrometriä (Mosley ym. 2001). Tällä kokoalueella hiukkaset tunkeutuvat tehokkaasti vuotoilmavirtojen mukana sisäilmaan.

Arviointimallin todentamiseksi hankkeessa tehtiin kenttämittauksia Helsingissä sijaitsevassa toimistorakennuksessa yhteistyössä Tampereen yliopiston Aerosolifysiikan laitoksen kanssa. Kenttäkohteena olleen toimistorakennuksen huoneen ilmavirrat mitattiin tulo- ja poistoilmasta balometrillä. Tuloilmasuodattimien erotusasteet hiukkaskoon funktiona määritettiin optisella hiukkaslaskurilla (Palas Fidas Frog).

Tampereen yliopisto teki koehuoneessa pitkäaikaismittauksia kahden viikon ajan. Huoneesta mitattiin jatkuvasti hiukkaspitoisuutta sähköisellä alipaineimpaktorilla (ELPI). Hiukkaspitoisuutta mitattiin myös samanlaisella mittalaitteella tuloilmasta kohteen ilmanvaihdon konehuoneessa. Koekohteen ilmanvaihdon periaatekaavio sekä mittauspisteiden sijainti on esitetty kuvassa 5.

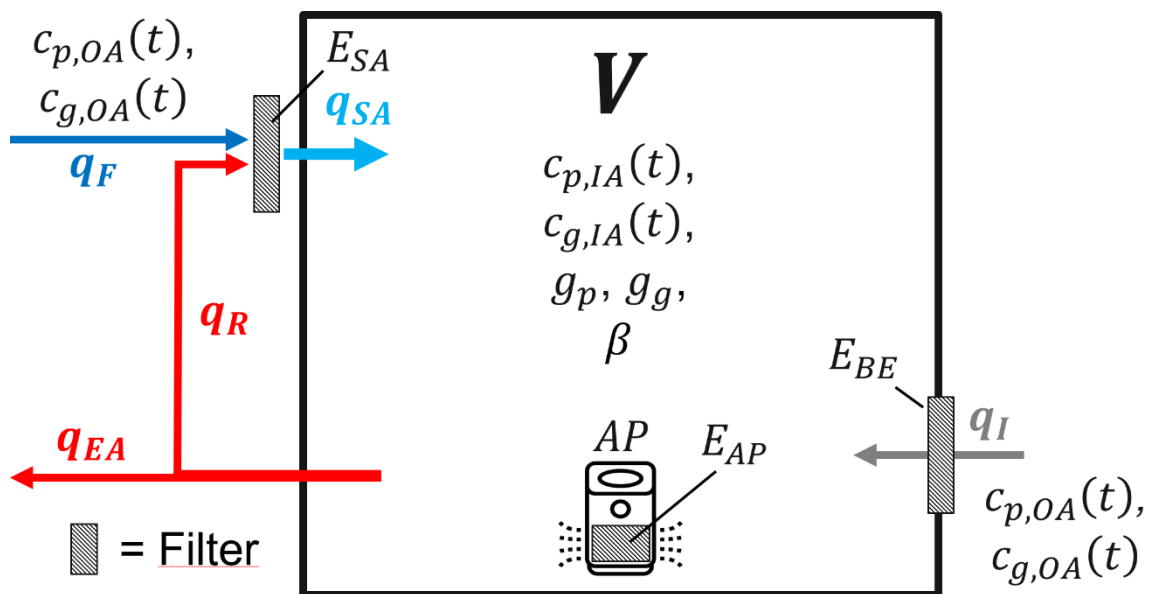


Kuva 5. Hiukkasten sisä/ulkoilmasuhteen määrittämisessä käytetty mittausjärjestely.

5.3 Sisäilman laskentatyökalu

Laskentatyökalu perustuu massataseyhtälön ratkaisuun, jonka avulla ratkaistaan epäpuhtauspitoisuudet tarkasteltavassa tilassa, jossa pitoisuuksien oletetaan olevan täydellisesti sekoittuneet. Laskennan lopputuloksena saadaan hiukkas- ja kaasumaisten epäpuhtauksien pitoisuudet aikasarjoina ja hiukkaspitoisuuden perusteella voidaan laskea suhteellinen sairaspitoisuusarvio. Laskentatyökalun periaate on esitetty kuvassa 6.

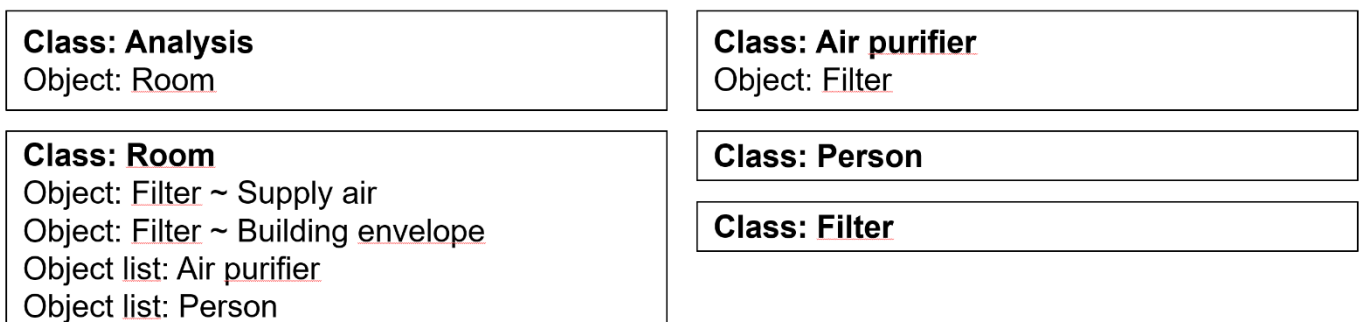
Laskentatyökalulla tehdyissä simulaatioissa keskityttiin tarkastelemaan ulkoilman pienhiukkasten sekä hiilidioksidin pitoisuuksia sisäilmassa hyödyntäen vertailukohtana projektin aikana hankittua mittausdataa, jota hyödynnettiin myös mallin validointiin. Kokeellisesti analysoidun tilanteen lisäksi tarkasteltiin erilaisten tuloilmansuodatusratkaisujen, raitisilmavirtojen ja kiertoilmasuhteiden sekä ilmanpuhdistimien vaikutusta sisäilmanlaatuun.



Kuva 6. Periaatekuva laskentatyökalusta.

5.3.1 Laskentatyökalun toteutus ja rakenne

Laskentatyökalu toteutettiin python ohjelmointikielille hyödyntäen sen luokkarakenteita. Tämä lähestymistapa mahdollisti modulaarisen rakenteen, jota voidaan laajentaa tulevaisuudessa. Laskentatyökaluun implementoidut luokat on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Laskentatyökalun luokkarakenne.



5.3.2 Massatasemalli

Massatase sisäilman hiukkaspitoisuudelle tilassa voidaan esittää yhtälöllä

$$\frac{V dc_{p,IA}(t)}{dt} = q_F c_{p,OA}(t)(1 - E_{SA}) + q_R c_{p,IA}(t)(1 - E_{SA}) + q_I c_{p,OA}(t)(1 - E_{BE}) - (q_F + q_R + q_I) \cdot c_{p,IA}(t) + g_{p,gen} - g_{p,loss},$$

jossa

V	huoneen tilavuus,
t	aika,
$c_{p,IA}(t)$	sisäilman hiukkaspitoisuus,
$c_{p,OA}(t)$	ulkoilman hiukkaspitoisuus ajanhetkellä t ,
q_F	raitisilmavirta,
q_R	kiertoilmavirta,
q_I	vuotoilmavirta,
E_{SA}	tuloilmasuodattimen hiukkaskokohtainen erotusaste,
E_{BE}	rakennuksen vaipan hiukkaskokohtainen erotusaste,
$g_{p,gen}$	hiukkaslähte, ja
$g_{p,loss}$	hiukkasnielu.

Aikariippuvan ulkoilman $c_{p,OA}(t)$ pitoisuuden vuoksi sisäilman pitoisuutta ei voi ratkaista suoraan yllä olevasta yhtälöstä, joten yhtälön ratkaisussa on hyödynnettävä numeerisia menetelmiä. Sisäilmanpitoisuus ajan hetkellä t_{i+1} voidaan ratkaista yhtälöstä

$$c_{p,IA}(t_{i+1}) = c_{p,IA}(t_i) + \Delta c_{p,IA}(t_i),$$

jossa pitoisuuden muutos

$$\Delta c_{p,IA}(t_i) = (f_{p,SA} + f_{p,EA} + f_{p,LA} + f_{p,AP} + g_{p,gen} + g_{p,dep}) \cdot \frac{\Delta t}{V},$$

ja

$f_{p,SA}$	tuloilman hiukkasvuo,
$f_{p,EA}$	poistoilman hiukkasvuo,
$f_{p,LA}$	vuotoilman hiukkasvuo,
$f_{p,AP}$	ilmanpuhdistimen poistama hiukkasvuo,
$g_{p,gen}$	hiukkasten tuotto, ja
$g_{p,dep}$	hiukkasten depositio.

Siilin ym. (2023) esittää yhtälöissä esiintyvät termit sekä vastaavat yhtälöt kaasumaisille epäpuhtauksille yksityiskohtaisesti.

5.3.3 Suhteellinen sairaspitoisuus

Suhteellinen sairaspitoisuus perustuu hiukkasten kokonaismassapitoisuuteen, joka voidaan laskea tuloksena saaduista lukumääräpitoisuuksista käyttäen yhtälöä

$$c_{p,m} = c_{p,n} \rho_p \left(\frac{4\pi}{3} \left(\frac{d_p}{2} \right)^3 \right),$$

jossa

$c_{p,m}$	hiukkasten hiukkaskokohtainen massapitoisuus,
$c_{p,n}$	hiukkasten hiukkaskokohtainen lukumääräpitoisuus,
ρ_p	hiukkasten tiheys (1000 kg/m ³), ja
d_p	hiukkasen halkaisija.

Kokonaismassapitoisuus $c_{p,mtot}$ saadaan summaamalla hiukkaskoko kohtaiset massapitoisuudet. Tämän jälkeen arvio vuosittaisille sairaspöissaoloille voidaan laskea yhtälöstä

$$SIC_p = 0.3108 \cdot c_{p,mtot}^{0.674}$$

ja suhteellinen sairaspöissaoloarvio yhtälöstä

$$SIC_{rp} = \frac{SIC_p}{d_{work}}$$

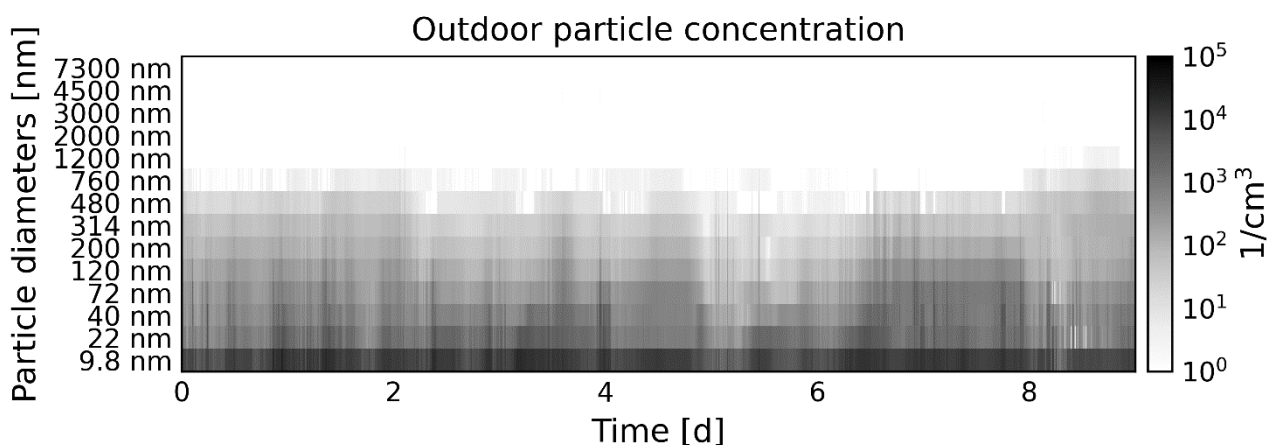
jossa d_{work} on vuosittaisten työpäivien lukumäärä (Seppänen & Fisk 2006, Salmela et al., 2017).

5.3.4 Tarkasteltava tila, laskentatyökalun validointi ja skenaariot

Laskentatyökalulla tarkasteltava tila oli toimistokohde, jonka pinta-ala oli 25 m² ja tilavuus 66 m³, ja se sijaitsi Helsingin keskustassa. Tilan ilmanvaihtokerroin oli viisi (5 ACH), kiertoilmasuhte 0.6 ja tuloilmansuodattimen erotusaste vastasi luokkaa F7 käytöstä poistetun yleisilmanvaihdon suodatinstandardin EN 779 mukaisella luokituksella.

Laskentatyökalun validointiin käytettiin projektissa tuotettua hiukkasdataa sekä ulko- että sisäilman pitoisuuksille. Ulkoilman hiukkaspitoisuutta, joka on esitetty kuvassa 8, käytettiin lisäksi kaikkien muiden laskentojen reunaehtona ulkoilman hiukkaspitoisuudelle. Koska ulkoilman hiilidioksidipitoisuudesta ei ollut käytettävissä mittausdataa, pitoisuuden oletettiin olevan vakio 425 ppm. Myös vuotoilmavirta määritettiin kokeellisen data perusteella ($q_I = 19$ m³/h) ja hiukkasten rakennuksen vaipan läpäisyä arvioitiin kirjallisuuden perusteella (Kulmala ym. 2022).

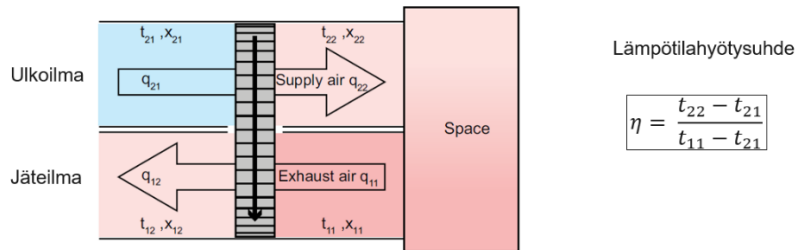
Mittauskampanjan aikana toimisto oli tyhjiällä, mutta simulaatioissa tilassa oletettiin olevan neljä henkilöä, jotka tuottivat ulos hengittäessään hiilidioksidia 5.0e-6 m³/s, mikä vastaa tyypillistä hengitystiheyttä kevyessä fyysisessä aktiviteetissa (6 litraa minuutissa).



Kuva 8. Laskennan reunaehtona käytetty ulkoilman hiukkaspitoisuus. (Silvonen ym. 2022).

5.4 Ilmanvaihdon energiantalteenotto

Energiantalteenotossa mitattiin lämpötilahyötysuhdetta, joka määritellään kuvan 9 merkintöjen mukaan.



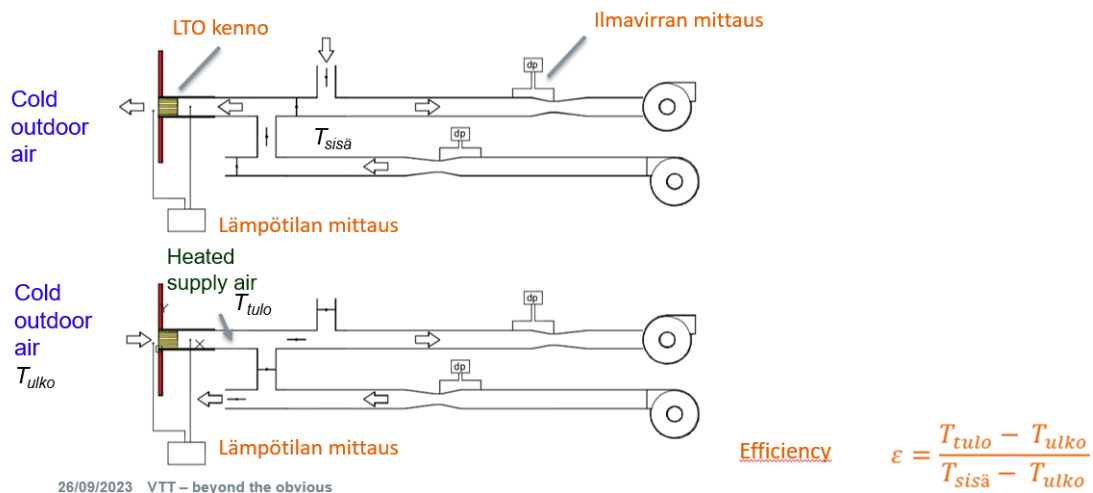
Kuva 9. Lämmöntalteenottolaitteen periaate ja lämpötilahyötysuhteen laskenta.

Lämmöntalteenoton (LTO) hyötysuhteen laskemisessa käytettiin NTU-menetelmää (Number of Transfer Units):

$$NTU_0 = \frac{1}{q_m c_P} \left(\frac{1}{1/(hA)_h} + \frac{1}{1/(hA)_c} \right) = \frac{hA}{2 q_m c_P}$$

Hyötysuhde $\varepsilon = \frac{NTU_0}{1 + NTU_0}$

Nusseltin luku $Nu = \frac{hd}{k}$



26/09/2023 VTT – beyond the obvious

Kuva 10. Lämmöntalteenottoratkaisun prototyypin mittausjärjestelyt. Regeneratiivisen kennon läpi johdettiin vuorotellen kylmää ja lämmintä ilmaa samalla kun mitattiin ulko-, tulo- ja sisäilman lämpötilaa.

LTO-ratkaisujen toiminnan tutkimiseksi valmistettiin sekä regeneratiivinen että rekuperatiivinen koekappale. Regeneratiivinen ratkaisu oli sylinterimuotoinen kappale, jonka halkaisija oli 100 mm ja jonka kanavat olivat heksagonaalisia. Ratkaisu tehtiin 3D-tulostamalla polylyktidista (PLA). Regeneraatio toteutettiin syklistisesti niin että LTO-kennon läpi johdettiin vuorotellen viileää ulkoilmaa ja lämmintä sisäilmaa 60 sekunnin jaksoissa. Vertailun vuoksi valmistettiin sekä perinteinen suorakanavainen ratkaisu että uudenlainen toteutus.

Rekuperatiivinen kenno koostui päällekkäin ladotuista levyistä ja se oli ulkomitoiltaan 12x12x18 cm kokoinen. Perinteinen kenno oli tehty sileistä metallilevyistä ja uudenlainen puolestaan lämmönsiirtoa tehostavilla rakenteilla toteutettuna.



5.5 Ilmansuodatuskonsepti

Tehtävässä arvioitiin nykyisiä talotekniikan ilmansuodatusratkaisuja huomioiden käyttöolosuhteiden ja ilmanlaadun asettamia ja tarpeita ja haasteita projektissa kehitetyn palvelukonseptin kohdemarkkina-alueella. Arvioitavia teknologioita olivat mekaaniset, sähköiset ja kaasusuodattimet sekä näiden yhdistelmät. Erytystä huomiota kiinnitettiin kestäväen kehityksen mukaisiin, energia- ja kustannustehokkaiden sekä korkean suorituskyvyn suodatusratkaisujen hyödyntämismahdollisuuksiin. Arvioinnissa hyödynnettiin tutkimusryhmän kokemuksia ja asiantuntemusta eri ilmansuodatinteknologioista rakennusten sisätilojen, teollisuussovellusten ja ajoneuvojen sisätilojen suodatuksessa.

Potentiaalisimpien suodatinteknologioiden suorituskykyä ja soveltuvuutta palvelu- ja liikerakennusten ilmanlaadun parantamiseksi tutkittiin laboratoriotestein VTT:n suodatinmittausjärjestelmissä hyödyntäen yleisilmanvaihdon hiukkassuodattimien mittausten menetelmää EN ISO 16890-2. Laboratoriokokeissa määritettiin tuloilman hiukkassuodattimien hiukkaskokoluokittainen erotusaste ja painehäviö mitoitetuilla ilmamäärillä ja otsapintanopeuksilla. Myös suodattimien läpäisevin hiukkaskoko (MPPS, Most Penetrating Particle Size) mitattiin hyödyntäen korkean suorituskyvyn suodattimien menetelmää ISO 29463-5. Tuloilmasuodattimien hiukkaskokoluokittainen erotusaste ja painehäviö mitattiin myös hankkeen aktiivitutkimuskohteissa (toimistorakennus Helsingissä ja Tampereella). Lisäksi tarkasteltiin näiden kohteiden tulo- ja poistoilman tilavuusvirtoja hankkeen tarkempiin tutkimuksiin valituissa huoneissa.

Tuloilman hiukkassuodattimen valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat käyttökohde, sisäilman laadulle asetetut tavoitteet sekä ulkoilman laatu. Rakennusten energiatehokkuusstandardeihin liittyvä EN 16798-3 määrittelee ulkoilmalle (ODA, outdoor air) kolme luokkaa ja tuloilmalle (SUP, supply air) viisi luokkaa ilman hiukkas- ja kaasupitoisuuksien perusteella. Eurovent on käyttänyt tätä luokittelua ja WHO:n ilmanlaatuohjeita (WHO 2021) suosituksessaan standardin EN ISO 16890 mukaisten yleisilmanvaihdon tuloilmasuodattimien valintaan eri ympäristöissä (Eurovent 2022). Suomessa sisäilman hiukkaspitoisuudelle on asetettu tavoitetasot mm. Sisäilmastoluokituksen luokissa S1-S3 (SIY 2018) ja Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa STM 545/2015 (STM 2015). Näiden taustatietojen, hankkeen tapaustutkimusten, konsortion yritysten kommenttien ja VTT:n asiantuntija-arvion perusteella määritettiin FutureSpaces-palvelukonseptin suodatusluokat tuloilmalle.

Sisäilmastopalvelun ilmansuodatuskonsepti kehitettiin edellä mainittujen arviointien, laskentatyökalujen, laboratorio- ja kenttämittausten ja näiden analysoinnin perusteella.

6. Tulokset

6.1 Lämpöviihtyvyys ja työn tuottavuus

6.1.1 Lämpöviihtyvyys mittauskohteissa

Lämpöviihtyvyyden tavoitearvot määritellään ns. Predicted Mean Vote (PMV) eli ennustetun keskimääräisen lämpöviihtyvyydsarvion mukaisesti. On huomattava kuitenkin, että PMV-arvo edustaa suuren joukon keskimääräistä arviota lämpöviihtyvyydestä, eikä sellaisenaan täysin sovellu yksittäisten arvioiden tarkasteluun.

PMV-arvot riippuvat VTT:n mittaamien suureiden lisäksi suhteellisesta kosteudesta, jonka arvo saatiin Tampereen yliopiston mittauksista. Niissä tapauksissa, joissa ei mitattu ilman nopeutta ja lämpötilaa VTT:n toimesta, käytettiin Tampereen yliopiston mittaamaa ilman lämpötilaa. Mittaustulosten perusteella lasketut PMV-arvot esitetään saatavilla olleiden TSV-arvojen rinnalla (taulukko 1 ja kuva 11). Laskentaan käytettiin CBE Thermal Comfort työkalua (Tartarini ym. 2020). Mittaustulosten puuttuessa on arvioitu, että operatiivinen lämpötila on lähellä ilman lämpötilaa ja että ilman nopeus on alle 0,1 m/s. Näitä voidaan pitää melko hyvinä approksimaatioina, sillä tämän mittausdatan muissa kevään mittauspisteissä ero operatiivisen lämpötilan ja ilman lämpötilan välillä on hyvin pieni (<0,3 °C) ja ilman liikenopeus kaikissa paitsi yhdessä



tapauksessa (KH2 8.12.2021) on alle 0,2 m/s (useimmiten selvästi alle 0,1 m/s). Metabolialarviona on käytetty tyypillistä istuen tehtävän toimistotyön tasoa 1,1 met ja vaatteiden eristävydeksi on arvioitu tyypillisen talvivaatetuksen mukaan 1 clo:ksi talvella ja 0,6 clo:ksi kesällä (silmämääräinen arvio mittaustilanteissa).

Taulukko 1. Mittaustulosten ja niiden puuttuessa approksimaatioiden perusteella lasketut PMV- ja PPD-arvot verrattuna tilan käyttäjien lämpöiihtyvyyssarvioon (TSV). (vuosi = 2021, paitsi kahdessa viimeisessä mittauksessa 19.1. ja 3.2.2022.) (T_a = ilman lämpötila, T_o = operatiivinen lämpötila, rh = suhteellinen ilman kosteus, clo = vaatetuksen eristävyys).

Pvm/tila/aika	T_a (°C)	T_o (°C)	rh(%)	clo	TSV	PMV	PPD
10.3./FH1/klo 10	20,7	21,1	10,1	1	-3	-0,56	12%
10.3./FH1/klo 14*	22,7	22,7	9,1	1	-2	-0,20	6%
11.3./FH1/klo 10	21	21,3	12,9	1	-1	-0,5	10%
18.3./KH1/klo 9:30	21,5	21,8	13,8	1	-1	-0,34	7%
18.3./KH1/klo 12:30*	23,4	23,4	12,5	1	0	0,02	5%
3.6./FH1/klo 11	23,0	23,2	27,1	0,6	+1	-0,65	14%
3.6./FH2/klo 11:20	21,5	21,6	27,6	0,6	0	-1,11	31%
13.8./FH1/klo 11:20	22,3	22,5	53,0	0,6	0	-0,68	15%
8.12./KH2/klo 10:25	19,6	20,0	6,7	1	-2**	-0,89	22%
19.1./KH2/klo 10	20,5	20,7	18,2	1	-1**	-0,60	12%
3.2./KH2/klo 10	19,53	20,2	9,43	1	-2**	-0,77	17%

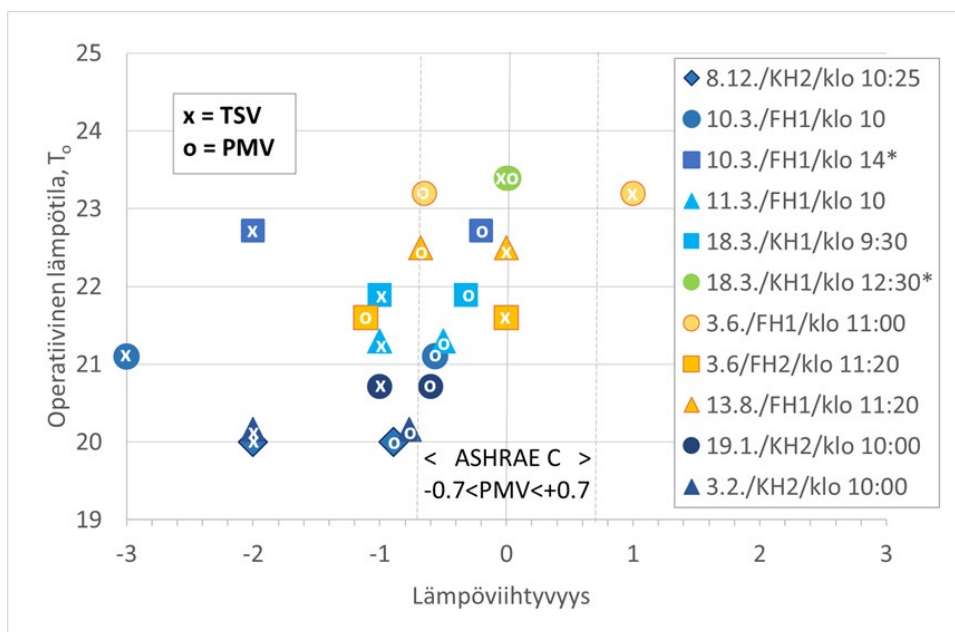
*oletus että $T_o = T_a$, koska ei mittausta säteilylämpötilasta

**8.12.2021 kolme TSV-arvoa saatu: -1, -2 & -3 > k.a. -2; 19.1.2022 kaksi TSV arvoa, molemmat -1; 3.2.2022 kaksi arvoa, -1 ja -3 > k.a. -2.

ASHRAE 55P-standardissa (2003) määritellään kolme lämpöiihtyvyyssluokkaa (Taulukko 2). PPD-arvo (Predicted Percentage of Dissatisfied) kertoo sen, kuinka suuri osa tilan käyttäjistä olisi todennäköisesti tyytymätön tilan lämpöolosuhteisiin. Jos tilasta saatavat PPD- ja PMV-arvot eivät mahdu kyseisten luokkien vaihteluväleihin, ei tila täytä standardin vaatimuksia riittävälle lämpöiihtyvyydelle.

Taulukko 2. ASHRAE 55P-standardin lämpöiihtyvyyssluokat.

Luokka	PPD	PMV väli
A	<6	-0.2<PMV<+0.2
B	<10	-0.5<PMV<+0.5
C	<15	-0.7<PMV<+0.7



Kuva 11. PMV- ja TSV-arvot operatiivisen lämpötilan funktiona (* $T_o=T_a$)

Yksittäisen TSV-mittauksen tavoitearvona voidaan pitää arvoa 0 (sopiva), joka saavutettiin kahdessa kesän mittauksessa F-rakennuksessa ja yhdessä kevään 2021 mittauksista K-rakennuksessa. Yhdessä kevättalven mittauksessa F-rakennuksessa annettu arvio -3 (kylmä) on kaukana tavoitearvojen ulkopuolella. Samassa tilassa TSV-arvo on myös johdonmukaisesti paljon pienempi kuin PMV-arvo. Tämä saattaa johtua ko. tilassa vallinneesta vedon tunteesta, joka tyypillisesti vähentää lämpöolosuhteisiin tyytyväisten osuutta. Ero näiden arvojen välillä on tähän nähden kuitenkin kohtalaisen suuri. Kyseisen tilan operatiivinen lämpötila oli myös tavoitearvojen sisällä, eikä säteilylämpötila ollut merkittävän alhainen. Toisaalta tässä samassa tilassa kesäajan mittauksissa TSV-arvo on johdonmukaisesti isompi kuin PMV-arvo (kuva 11).

Mielenkiintoinen tulos on myös K-rakennuksen talvimittaus (8.12.2021), jossa saatiin kolmen henkilön arvio lämpöviihtyvyydestä samassa tilassa samaan aikaan. Tulos vaihteli merkittävästi, kylmän tunteesta (-3) vain hieman viileään (-1). Laskennallinen PMV sai arvon -0,89, joka on suurempi kuin TSV-arvojen keskiarvo -2, mutta selvästi tavoitearvojen ulkopuolella (kuva 11). Tämä osoittaa selkeästi, miten suurta vaihtelua lämpöviihtyvyyden tunteessa voi olla yksilöiden välillä, ja myös miten tärkeää olisi, että tilan käyttäjillä olisi mahdollisuuksia vaikuttaa lämpöaistimuksen aiheuttaviin tekijöihin. Yksinkertaisimmillaan tämä voisi olla vaatetuksen säätäminen tai - jos kyse on vedon tunteesta - mahdollisuus siirtyä huoneen sisällä vedottomampaan paikkaan.

Maaliskuun 2021 mittauksissa tilojen laskennalliset lämpöolosuhteet vastaavat pääosin ASHRAE 55P-standardin B-luokkaa. Kaksi A-luokkaa vastaavaa tulostakin saatiin (10.3./FH1/klo 14 ja 18.3./KH1/klo 12:30). Kesän ja joulukuun 2021 mittauksissa lasketut PMV- ja PPD-arvot ovat juuri ja juuri tavoitearvojen sisällä tai jopa tavoitearvojen ulkopuolella, jolloin tilojen olosuhteet eivät täytä ASHRAE 55P-standardin vaatimuksia, vaikka tiloissa työskennelleet ihmiset antoivat osittain erilaisia arvioita viihtyvyydestään. Mittausten perusteella KH2 tilan ympäristössä olisi parantamisen varaa: ASHRAE:n raja-arvot saavutettiin vain yhdessä mittauksessa kolmesta (C-luokka), ja tiloissa työskennelleiden henkilöiden arviot lämpövihtyvyydestä olivat johdonmukaisesti viileän puolella.

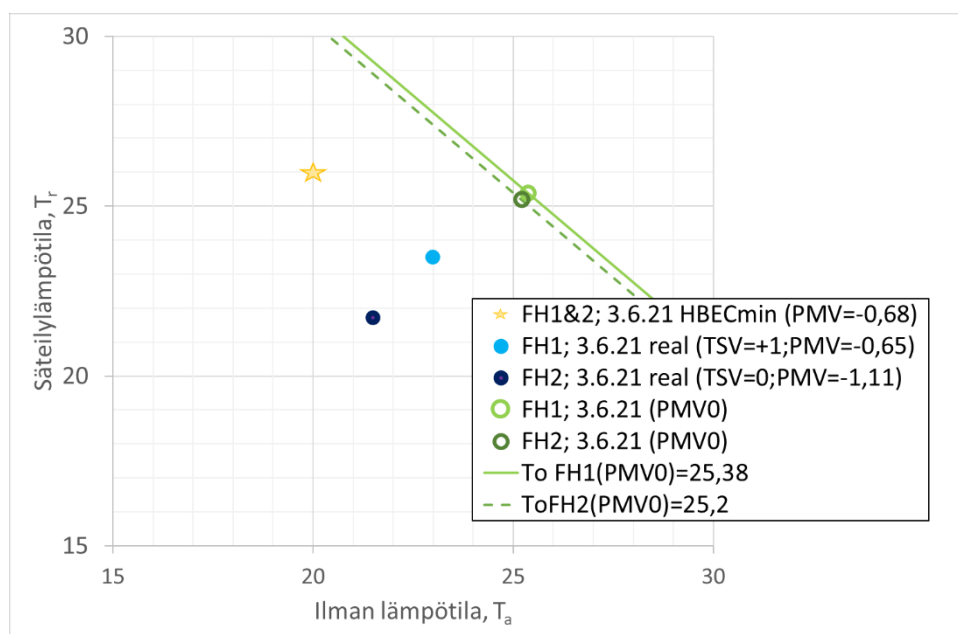
Vertailtaessa laskettuja PMV-arvoja ja mitattuja TSV-arvoja huomataan, että keväällä ja talvella jälkimmäiset ovat johdonmukaisesti alempia kuin laskennalliset arvot, paitsi kevään 2021 viimeisessä K-rakennuksen mittauksessa, jossa ko. arvot ovat erittäin lähellä toisiaan (kuva 11). Kesän mittauksissa taas laskennalliset arvot ovat alempia kuin mitatut arvot. Näin lyhyen mittausjakson perusteella on vaikea arvioida

mistä tällainen ero voi johtua, sillä syyt voivat olla moninaiset, ja riippua esim. tilan käyttäjän mieltymyksistä, edellisten päivien lämpötilakehityksestä, tilan muista ominaisuuksista, tai vaikka organisaation toimintaan liittyvistä tekijöistä, tai jopa näiden yhdistelmästä.

Lämpöviihtyvyyden mittaukset on raportoitu yksityiskohtaisesti VTT:n väliraportissa (Ala-Juusela ja Laamanen 2022).

6.1.2 Lämpöviihtyvyys eksergiamalla käyttäen

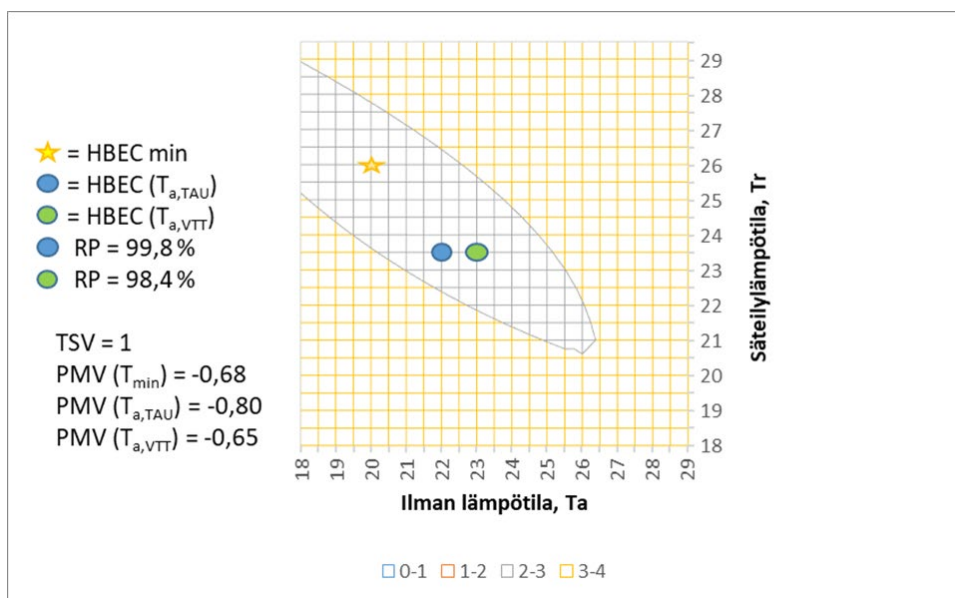
Ihmiskehon eksergia-analyysiin perustuvassa mallissa oletetaan, että paras lämpöviihtyvyys saavutetaan olosuhteissa, jossa ihmiskehon eksergiankulutus on minimissään. Mallin testaamiseksi laskettiin tehtyjen mittausten antamissa olosuhteissa saavutettava eksergiankulutuksen minimitaso säteilylämpötilan ja ilman lämpötilan funktiona (kuva 12). Ilmankosteus ja nopeus pidettiin vakiona, samoin vaatetuksen eristävyys ja metaboliataso.



Kuva 12. Eksergiankulutuksen minimitaso säteilylämpötilan ja ilman lämpötilan funktiona.

6.1.3 Lämpöviihtyvyyden ja tuottavuuden välinen yhteys

Lämpöviihtyvyyden ja tuottavuuden välisen yhteyden arviointiin kehitettiin laskentamalli, joka perustuu aiempiin lämpöolosuhteisiin perustuviin tuottavuusmalleihin. Se soveltuu olosuhteisiin, joissa PMV-arvo on $>-0,6$. Kesäajan mittauksissa ei yhdessäkään ollut tällaista tilannetta. Yhdessä mittauksista käyttäjän arvio oli $TSV = 0$. Lähimmäksi $PMV = -0,6$ päästiin 3.6.2022 FH1 tilassa, jossa PMV arvo oli $-0,65$. Tilan käyttäjän antama lämpöviihtyvyyсарvio (TSV) oli $+1$ (hiukan lämmin). Kuva 13 havainnollistaa eksergiankulutuksen minimikohdan ja mittaustulosten antamien eksergiankulutusten sijaintia lämpötilakartalla, sekä suhteellisen tuottavuuden arvoja. Kyseisessä tilassa oli samaan aikaan käynnissä myös Tampereen yliopiston ilman lämpötilamittaukset, hieman eri paikassa kuin VTT:n mittaama lämpötila. Suhteellisen tuottavuuden analyysiin käytettiin molempia, jotta saatiin käsitystä lämpötilan vaihtelujen vaikutuksesta ihmiskehon eksergiankulutukseen ja sitä kautta suhteelliseen tuottavuuteen.



Kuva 13. Laskentamallin analyysi koekohteen tilasta.

FH1 tilan analyysi (3.6.2021) on esitetty yllä olevassa kuvassa.

HBEC = ihmiskehon eksergiankulutus

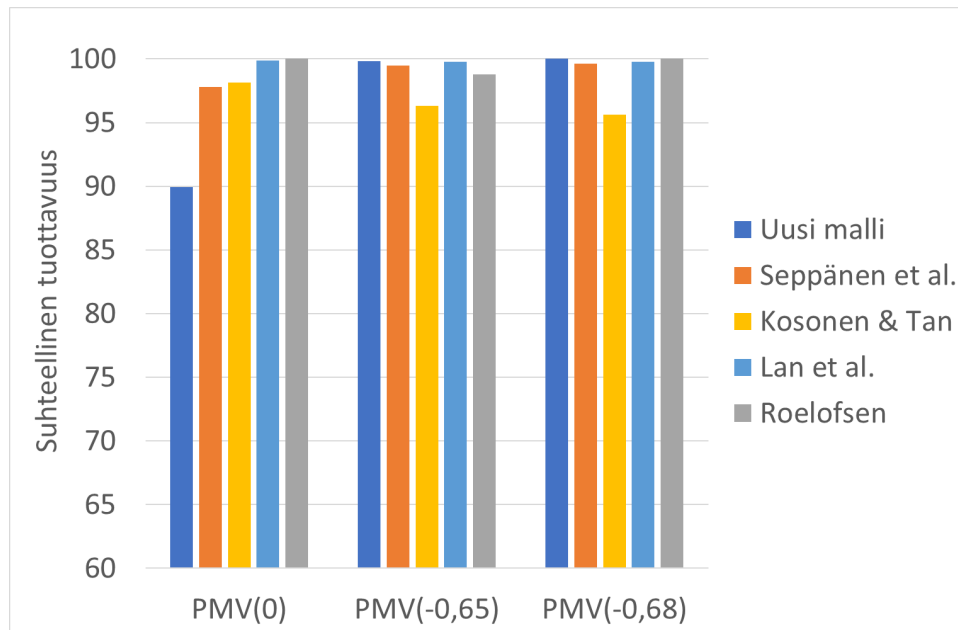
- min = minimikohta
- $T_{a,TAU}$ = Tampereen yliopiston mittaamalla ilmanlämpötilalla
- $T_{a,VTT}$ = VTT:n mittaamalla ilman lämpötilalla (yhtä aikaa ilman nopeuden kanssa, työpisteessä)

RP = suhteellinen tuottavuus

TSV = lämpöviihtyvyyssarvio

PMV = laskennallinen lämpöviihtyvyys

Samoilla arvoilla laskettiin myös suhteellinen tuottavuus muiden tuottavuusmallien avulla. Vertailu mallien välillä erilaiset PMV-arvot antavissa olosuhteissa on esitetty kuvassa 14.

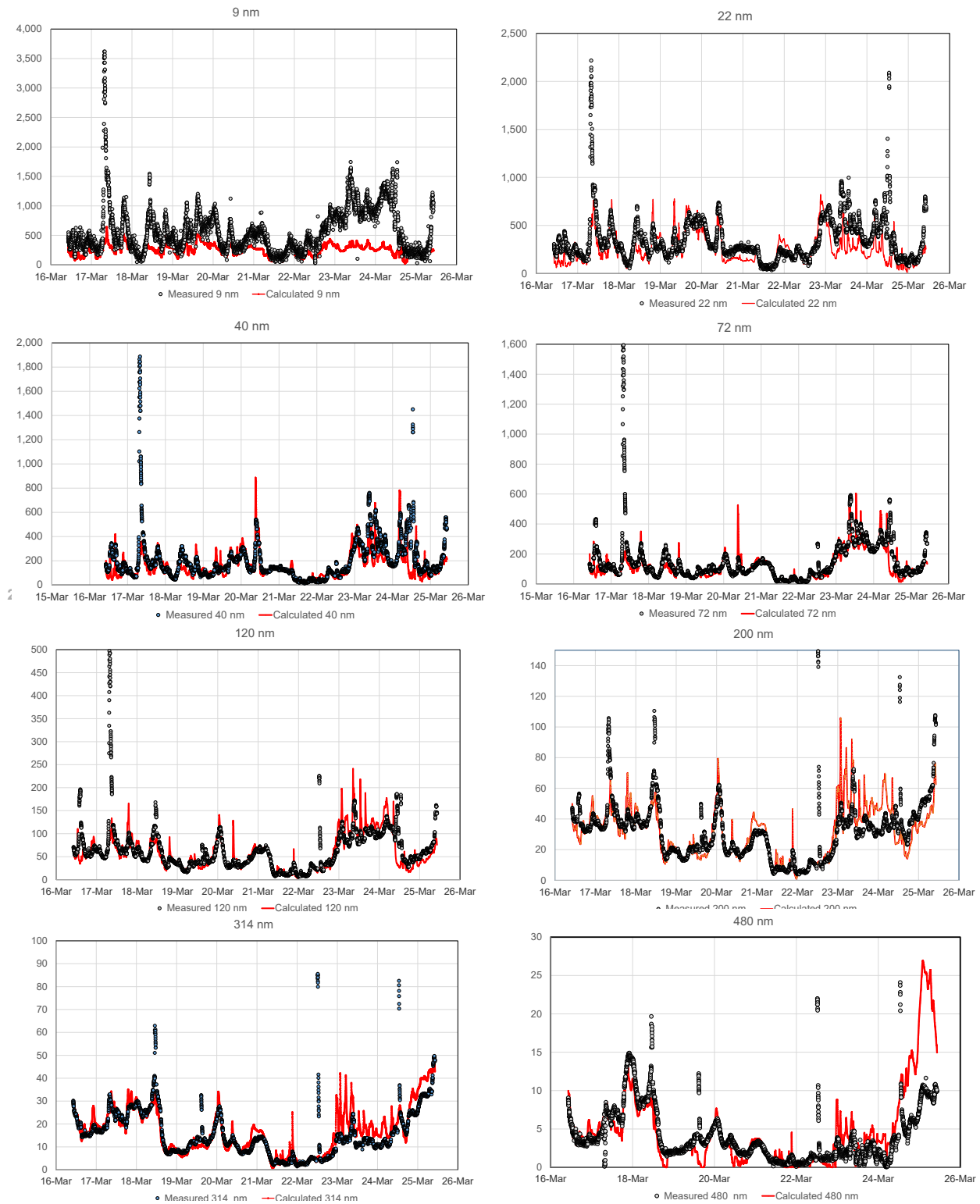


Kuva 14. Mallin vertailu muihin tuottavuusmalleihin.

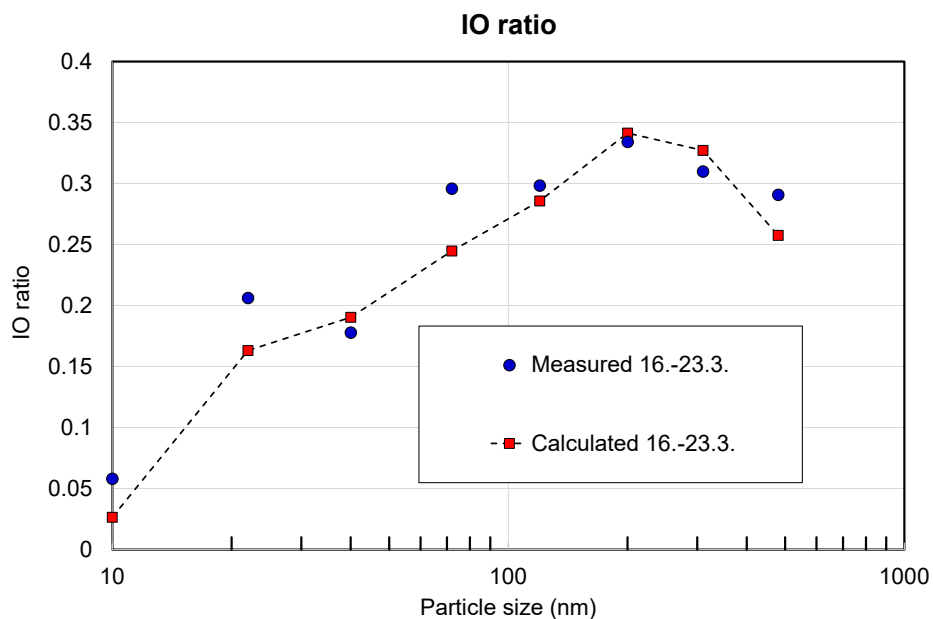
6.2 Hiukkasten sisä-ulkosuhteen arviointimalli

Laskentamallin antamia toimistohuoneen sisäilman hiukkaspitoisuuksia on verrattu sähköisellä alipaineimpaktorilla mitattuihin arvoihin kuvassa 15. Tulokset kattavat kokoluokat laajalla alueella välillä 9–480 nm. Tätä suurempia hiukkasia ei ollut tarpeeksi jotta oltaisiin saatu luotettavia tuloksia. Sisä- ja ulkoilmapitoisuuksien perusteella laskettu hiukkaskoriippuvainen I/O suhde on esitetty kuvassa 16.

Arviointimallin avulla laskettu vuotoilmavirta koekohteessa vaihteli välillä 0,27–0,53 1/h koneellisen ilmanvaihtuvuuden ollessa 5 vaihtoa tunnissa. Vuotoilmavirtaan vaikuttaa paljon rakenteen tiiviyden lisäksi ulkoilman olosuhteet kuten tuulen nopeus ja suunta sekä tuulen puuskat.



Kuva 15. Laskentamallin (punaiset viivat) ja ELPiillä mitatut (mustat pisteet) koekohteen sisäilman hiukaspitoisuudet eri kokoluokissa.

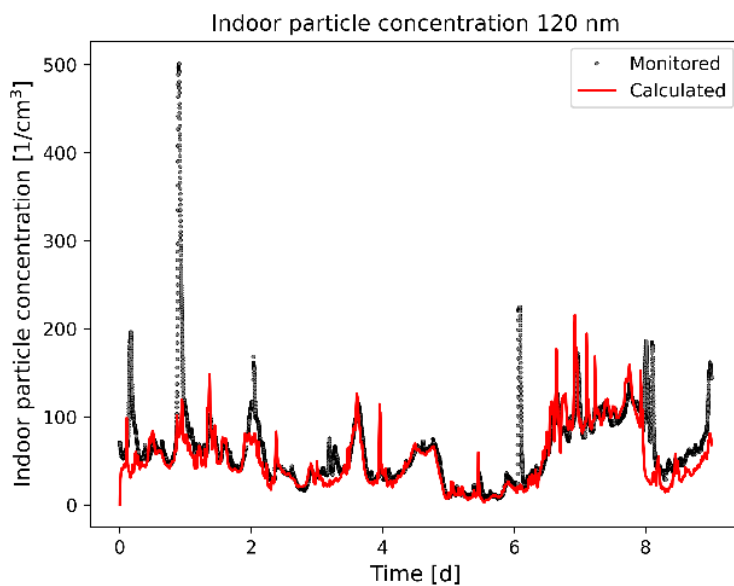


Kuva 16. Keskimääräinen sisä/ulkoilmasuhte hiukkaskoosta riippuen

6.3 Sisäilman laskentatyökalu

6.3.1 Laskentatyökalun validointi

Laskentatyökalun validointi osoitti mallinnetun hiukkaspitoisuuden vastaavan hyvin mitattuja arvoja laajalla hiukkaskokoalueella, kuten kuvan 17 esimerkki osoittaa. Isommille hiukkaskokoluokille (>760 nm) mittauksissa havaittiin vain vähän hiukkasia, mikä ei mahdollistanut luotettavaa validointia.

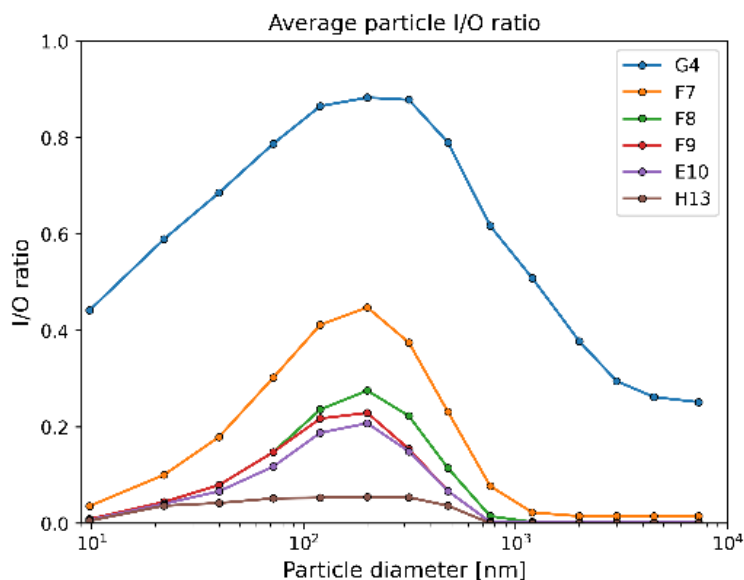


Kuva 17. Hiukkasten lukumääräpitoisuus mitattuna ja mallinnettuna.

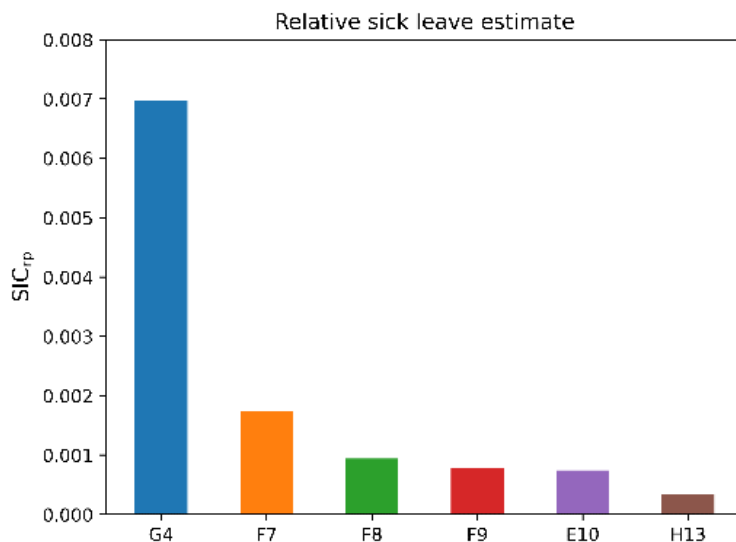
6.3.2 Tuloilmansuodatus

Sisäilman hiukkaspitoisuutta tarkasteltiin varioimalla tuloilmansuodatusta karkeasta suodatuksesta HEPA-luokan suodatukseen pitäen muut parametrit mittaustilannetta vastaavina.

Tulokset osoittavat, että tuloilmansuodatus on tehokas tapa alentaa sisäilman hiukkaspitoisuutta. Kuva 18 korostaa eroa eri tasoisten suodattimien suorituskyvyssä, mikä näkyy myös kuvan 19 suhteellisissa sairaspissaoloarvioissa.



Kuva 18. Hiukkasten lukumääräpitoisuuden sisä-ulkosuhde eri tuloilmansuodatinvaihtoehdoilla.

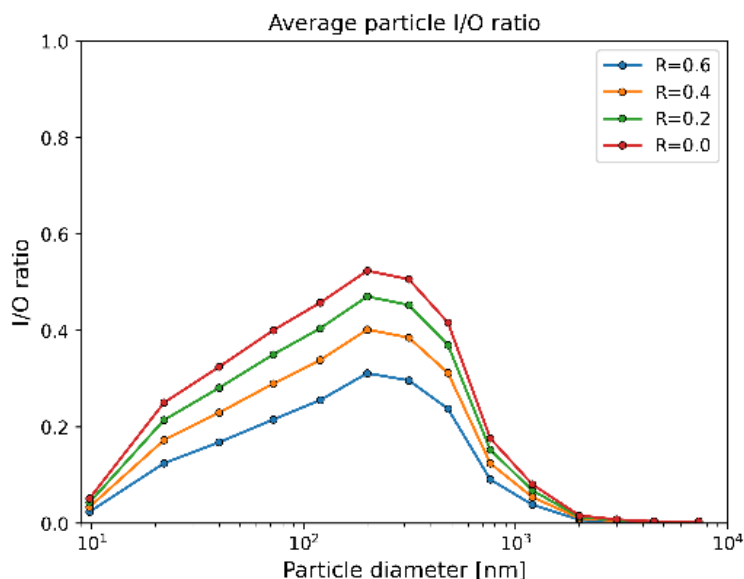


Kuva 19. Suhteellinen sairaspissaoloarvio eri tuloilmansuodatinvaihtoehdoilla.

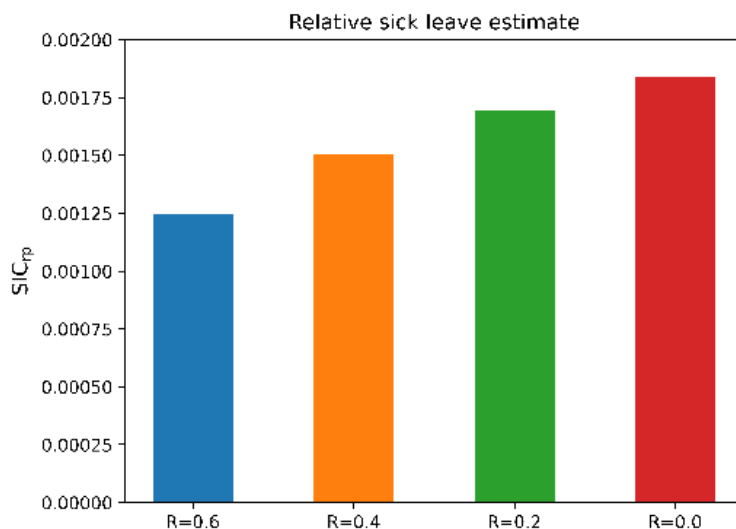
6.3.3 Kiertoilmasuhteen vaikutus

Kiertoilmasuhteen vaikutusta sisäilman hiukkaspitoisuuteen tarkasteltiin varioimalla kiertoilmasuhdetta $R = \{0.6, 0.4, 0.2, 0.0\}$. Muut parametrit pidettiin mittaustilannetta vastaavina.

Kiertoilmasuhdevertailun tulokset osoittavat kiertoilmasuhteen nostamisen laskevan sisäilman hiukkaspitoisuutta ja vastaavasti suhteellista sairaspissaoloarviota, kuten kuvat 20 ja 21 osoittavat.



Kuva 20. Hiukkasten lukumääräpitoisuuden sisä-ulkosuhde eri kiertoilmasuhteilla.



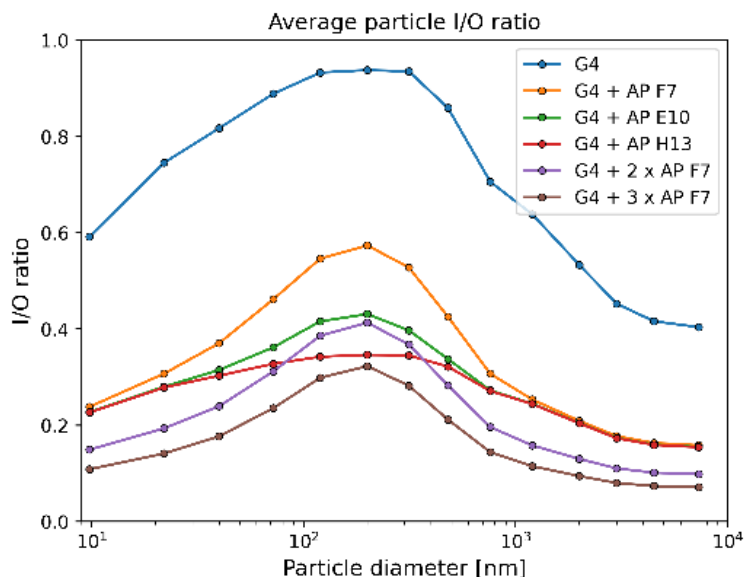
Kuva 21. Suhteellinen sairaspissaoloarvio eri kiertoilmasuhteilla

6.3.4 Ilmanpuhdistimien vaikutus

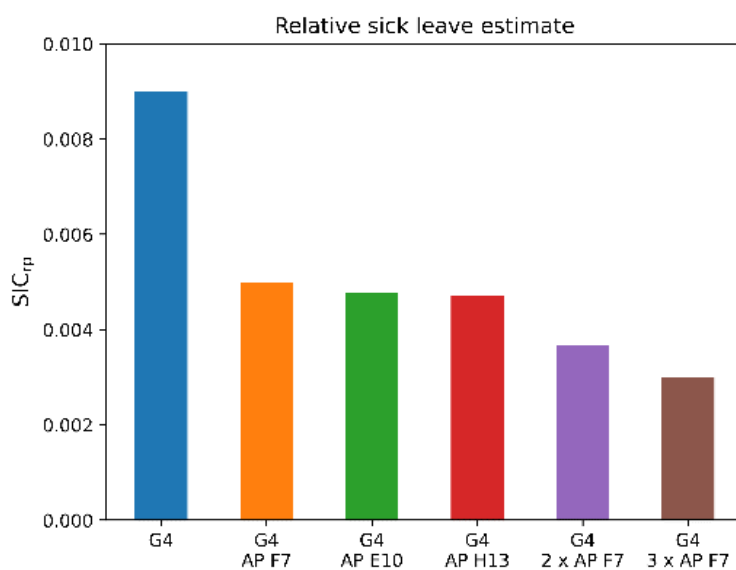
Ilmanpuhdistimien vaikutusta sisäilman hiukkaspitoisuuteen tutkittiin tilanteessa, jossa tuloilman suodatus vastasi G4-luokkaa ja ilmanvaihto toteutettiin kokonaan raitisilmalla ($R = 0.0$). Varsinaista ilmanvaihtoa avustettiin ilmanpuhdistimella, jossa oli F7, E10 tai HEPA13-luokan suodatin ja jonka ilmavirta oli kaksi kertaa raitisilmavirtaa suurempi. Seuraavassa vaiheessa tila varustettiin kahdella ja kolmella vastaavilla F7-luokan suodattimella varustetuilla ilmanpuhdistimilla.

Tulokset osoittavat, että ilmanpuhdistimet alentavat tehokkaasti sisäilman hiukkaspitoisuutta. Kuvat 22 ja 23 kuitenkin osoittavat, että suodatuksen tehostaminen F7-luokasta HEPA13-luokkaan ei ole kovin teho-

kas tapa laskea hiukkaspitoisuutta eikä siten myös suhteellista sairaspitoisuutta. Sen sijaan F7-luokan suodatuksella varustettujen ilmanpuhdistimien lisääminen eli puhtasilmavirran selkeä kasvattaminen on tehokkaampi keino alentaa sisäilman hiukkaspitoisuutta ja suhteellista sairaspitoisuutta.



Kuva 22. Hiukkasten lukumääräpitoisuuden sisä-ulkosuhde eri ilmanpuhdistinratkaisulla.



Kuva 23. Suhteellinen sairaspitoisuus eri ilmanpuhdistinratkaisulla.

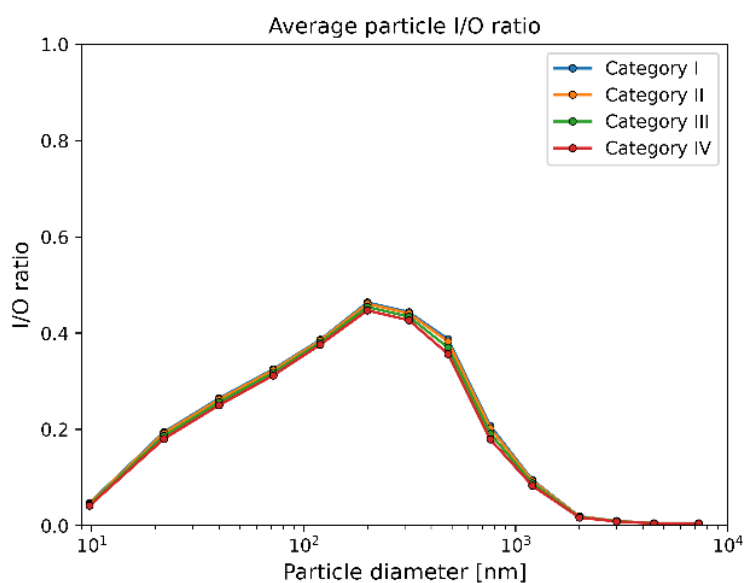
6.3.5 Raitisilmavirran vaikutus

Raitisilmavirran vaikutusta sisäilman hiukkaspitoisuuteen tarkasteltiin varioimalla ilmavirtaa standardin EN 16798 kategorioiden I-IV mukaisesti. Standardin mukaiset ilmavirrat on esitetty taulukossa 3. Tarkastelussa ei käytetty kiertoilmaa ($R = 0.0$) ja vuotoilmavirran oletettiin olevan mitätön.

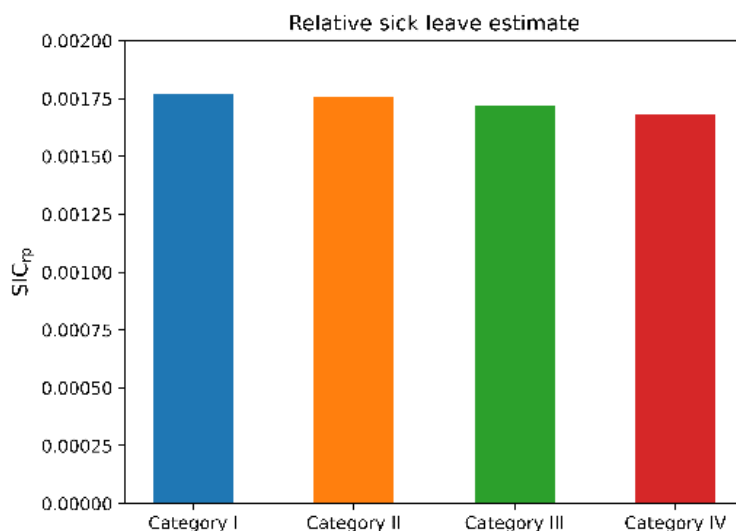
Taulukko 3. Raitisilmavirta standardin EN 16798 mukaisesti tilalle, jossa on neljä henkilöä.

Kategoria	Raitisilmavirta [m ³ /h]
I	234.0
II	163.8
III	93.6
IV	63.0

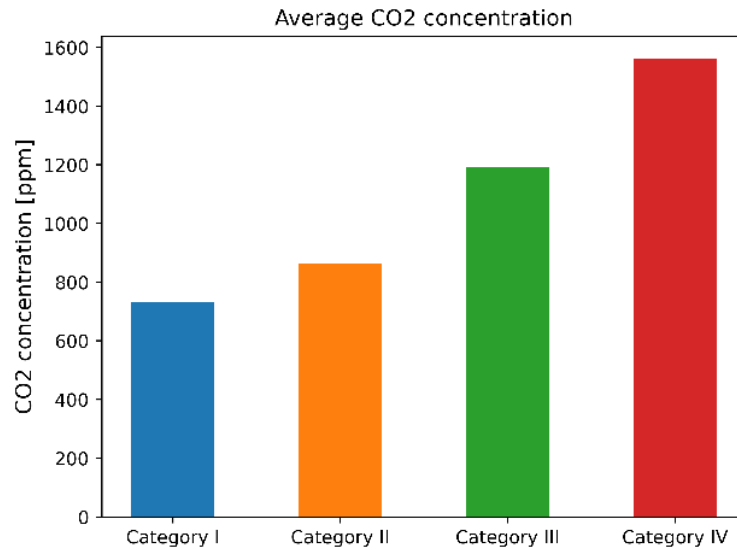
Tuloskuvat 24 ja 25 osoittavat, että raitisilmavirran kasvattamisella ei ole juuri vaikutusta sisäilman hiukkaspitoisuuteen tai suhteelliseen sairaspitoisuuteen, kun hiukkaslähde on ulkoilma. Kuva 26 puolestaan osoittaa lisätyn raitisilmavirran laskevan merkittävästi keskimääräistä hiilidioksidipitoisuutta. Tämä tarkastelu korostaa toisaalta myös eroa sisä- ja ulkolähteiden välillä.



Kuva 24. Hiukkasten lukumääräpitoisuuden sisä-ulkosuhte EN-16798 eri tuloilmavirroilla.



Kuva 25. Suhteellinen sairaspitoisuus EN-16798 eri tuloilmavirroilla

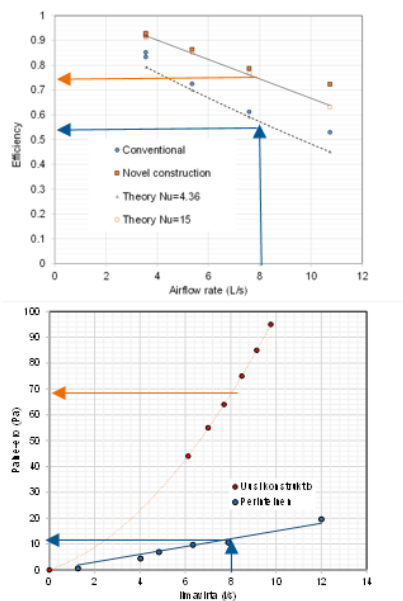


Kuva 26. Hiilidioksidipitoisuus EN-16798 eri kategorioiden tuloilmavirroilla.

6.4 Ilmanvaihdon energiantalteenotto

Uudenlainen rakenne mahdollistaa tehokkaamman lämmönsiirron ja siten myös aiempaa paremman lämmön talteenoton hyötysuhteen. Kuvassa 27 on vertailtu perinteisen, suorakanavaisen ja uudenlaisen rakenteen mukaista regeneratiivista lämmöntalteenottoa. Kuten tuloksista nähdään, uuden ratkaisun hyötysuhde on kaikilla mitatuilla ilmavirtauksilla huomattavasti perinteistä ratkaisua korkeampi.

Uudenlainen ratkaisu lisää myös painehäviötä LTO-kennon yli, mikä lisää puhallinenergian tarvetta. Alla olevassa laskelmassa on vertailtu lisääntyneitä puhallinenergiaa saavutettuun lämpöenergian lisäykseen suhteessa perinteiseen ratkaisuun. Kuten nähdään, tässä tapauksessa suhde on 3,7-kertainen, eli saavutettava lämmitystehon lisäys on selvästi korkeampi kuin puhallinenergian kasvu.



tulko=4°C, tsisä=22°C

	Perinteinen $\eta=0.56$	Uusi $\eta=0.75$
Painehäviö (Pa)	12	68
Puhallinenergia (W)	1.92	10.88
Tuloilman I-tila (°C)	14.1	17.5
Talteenotettu I-teho (W)	96.8	129.6
Lämpötehon lisäys (W)		32.8
Puhallinenergian lisäys (W)		8.9

Lämmitysteho $\phi = q_m c_p \Delta T$

Puhallinenergia $P = \frac{q \Delta p}{\eta}$

Kuva 27. Perinteisen ja uuden LTO-kennon hyötysuhteet ja painehäviöt. Uudella ratkaisulla painehäviö on suurempi, mutta saavutettava lämmitystehon lisäys on selvästi korkeampi kuin puhallinenergian kasvu.

6.5 Ilmansuodatuskonsepti

6.5.1 Tuloilman suodatusluokat

FutureSpaces-palvelukonseptin suodatusluokat tuloilmalle on esitetty taulukossa 4. Konseptin pääasiallinen toiminta-alue on kuvattu vihreällä pohjalla, joista yleisin tilanne tummanvihreällä. Esimerkiksi tavoiteltaessa Sisäilmastoluokituksen luokkaa S2 vastaavaa hiukkaspitoisuutta ($<10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sisätilassa, joka on jatkuvassa käytössä (esim. toimisto) ja alueella, jonka ulkoilman hiukkaspitoisuus on suuri (ODA 2), tuloilman suodatuksen tulisi olla luokkaa ePM1 70 % ISO EN 16890 mukaisella suodattimien luokituksella. Tämä vastaa arviolta luokkaa F8 käytöstä poistetun yleisilmanvaihdon suodatinstandardin EN 779 mukaisella luokituksella (Eurovent, 2022).

Taulukko 4. Tuloilman suodatusluokat EN ISO 16890 mukaisella suodattimien luokituksella.

Outdoor air quality $\mu\text{g}/\text{m}^3$			Required Indoor Air Quality $\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{2.5}$				
			S1 <10	S2 <10	S3 <25	Temporary or short term occupancy	No occupancy
Particle size range			Supply Air Quality $\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{2.5}$				
			SUP 1 <1,25	SUP 2 <2,5	SUP 3 <3,75	SUP 4 <5	SUP 5 <7,5
	PM2.5	PM10	ePM1	ePM1	ePM2.5	ePM10	ePM10
ODA (P) 1	<5	<15	70%	50%	50%	50%	50%
ODA (P) 2	<7,5	<22,5	80%	70%	70%	80%	50%
ODA (P) 3	>7,5	>22,5	90%	80%	80%	90%	80%

6.5.2 Laboratoriomittaukset

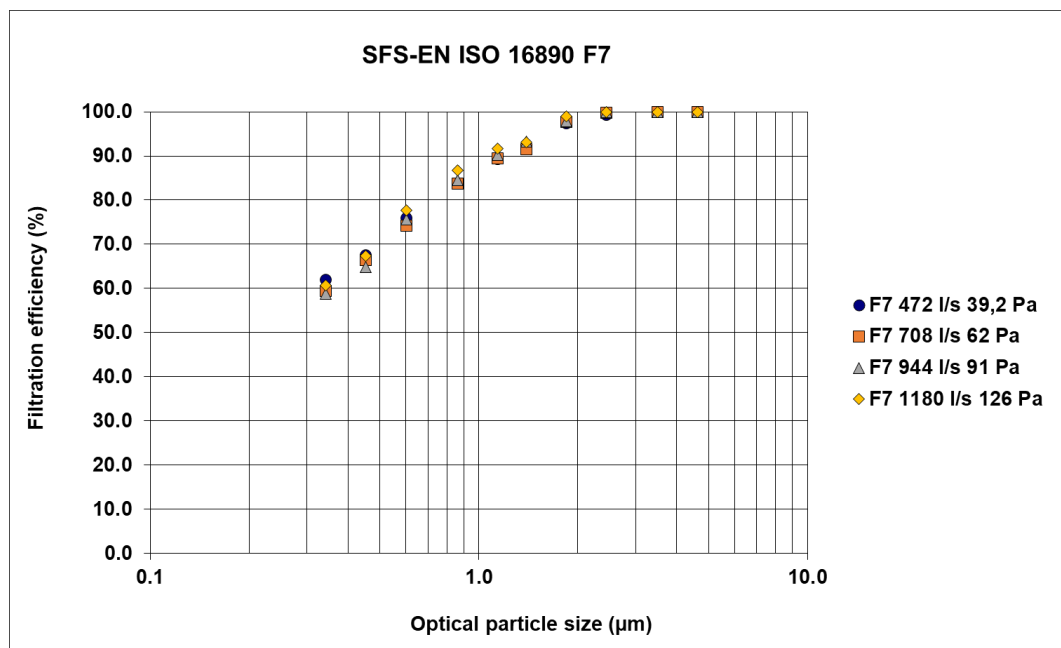
Mittauksiin valittiin mekaanisia kuitusuodattimia (EN779 mukainen suodatusluokka M5, F7, F9 ja E10), yhdistelmäsuodatin (F7 hiukkassuodatus ja kaasusuodatus) ja sähköavusteinen yhdistelmäsuodatin (Lifa Air 3G). Sähköavusteisten suodatin oli varustettu jatkuvatoimisella hiukkasvaraajalla. Mittaukset tehtiin puhtaille suodattimille.

Mittausten yhteenveto on esitetty taulukossa 5. Mittausilmavirta oli $3400 \text{ m}^3/\text{h}$ (944 l/s). Kuva 28 esittää esimerkin hiukkaskokoluokittaisen erotusasteen mittauksesta yleisilmanvaihdon suodattimelle eri ilmavirroilla. Kuva 29 esittää vastaavan mittauksen korkean suorituskyvyn suodattimelle.

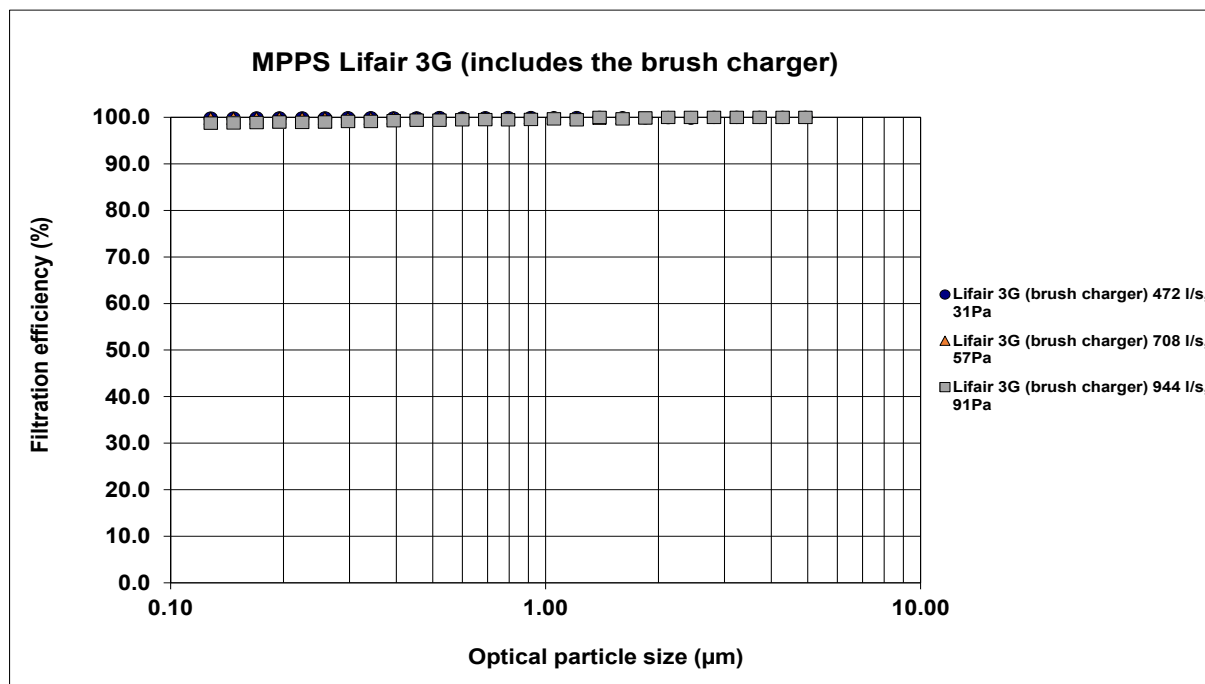
Taulukko 5. Tuloilmansuodattimien laboratoriomittausten yhteenveto (ilmavirta 3400 m³/h).

Luokka	Suodatin	Painehäviö (Pa)	Erotusaste% koko 0,4µm	Erotusaste% koko 1µm	Erotusaste% koko 2,5µm
M5	Camfil F5 pussisuodatin	45	7	26	86
F7	Camfil F7 pussisuodatin	91	59	90	100
F7	Camfil F7 kompakti-kombisuodatin*	150	60	92	100
F7	Camfil F7 +varaaja kompaktikombisuodatin*	150	91	97	100
F9	Camfil F9 pussisuodatin	160	84	99	100
E10	Camfil E10 kompaktisuodatin	60	98	99	100
N.A.	Lifa 3G +varaaja kombipussisuodatin*	91	99	100	100

*) hiukkas- ja kaasusuodatin



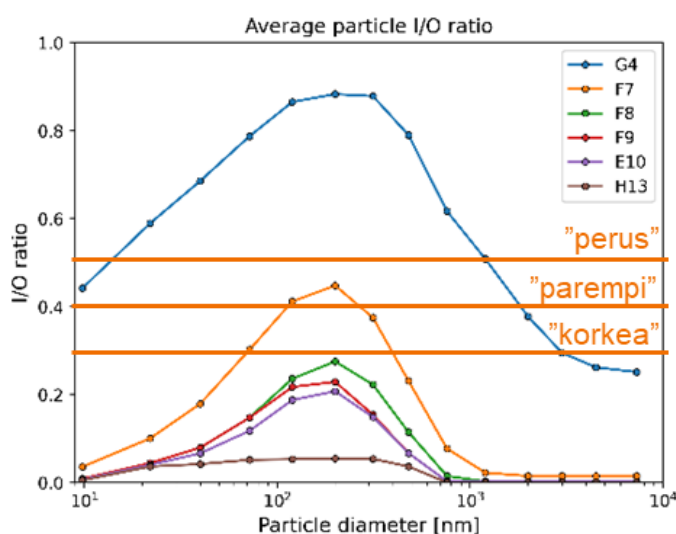
Kuva 28. Mekaanisen kuitusuodattimen (F7) suodatustehokkuus eri ilmavirroilla.



Kuva 29. Sähköavusteisen kuitusuodattimen suodatustehokkuus eri ilmavirroilla.

6.5.3 Suodattimen valinta I/O-suhteen ja läpäisevimmän hiukkaskoon perusteella

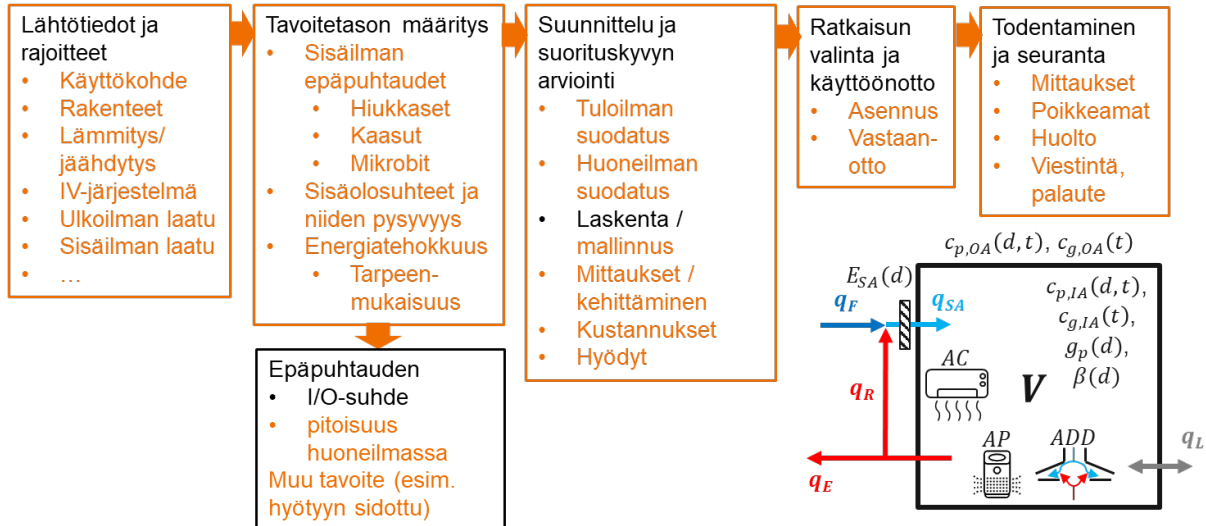
Tuloilmasuodatuksen tavoitetasoa ja suodattimien valintaa voidaan arvioida rakennuksen sisä-ulkosuhteen hiukkaspitoisuuden perusteella. Kuva 30 esittää esimerkin laskennasta rakennuksen hiukkaskokoluokittaiselle sisä-ulkosuhteelle hiukkasten lukumääräpitoisuuksien perusteella. Läpäisevin hiukkaskoko on n. 200 nm. Sisäilmastopalvelun taso voidaan määrittää tässä tapauksessa läpäisevimmän hiukkaskoon perusteella, joka on n. 200 nm. Perustasoksi on määritetty I/O = 0.5, mikä saavutetaan F7 / ePM1 50...65 % mukaisella tuloilmasuodatuksella. Paremman palvelutason vastaavat arvot ovat I/O = 0.4, F8 / ePM1 65...90 % ja korkealuokkaisen palvelutason I/O = 0.3, F8 tai F9 / ePM1 80...90 %.



Kuva 30. Suodattimen valinta läpäisevimmän I/O-suhteen perusteella.

6.5.4 Sisäilmastopalvelun ilmansuodatuskonsepti

Kuva 31 esittää sisäilmastopalvelun ilmansuodatuskonsepti on esitetty yleisellä tasolla. Konseptin keskeiset osiot ovat rakennuksen lähtötietojen selvittäminen, tavoitetason määrittäminen huomioiden sisäilman eri epäpuhtaudet, suunnittelu ja suorituskyvyn arviointi, ratkaisun valinta ja käyttöönotto sekä seuranta ja todentaminen.



Kuva 31. Sisäilmastopalvelun ilmansuodatuskonsepti.

7. Tulosten tarkastelu

7.1 Lämpöviihtyvyys ja työn tuottavuus

Lämpöviihtyvyyden arviointiin tarkoitetun laskentamenetelmän testaamiseen tehtyjen laskelmien tulokset tukevat aiempia havaintoja siitä, että ihmiskehon eksergiankulutuksen minimitaso saavutetaan sellaisessa pisteessä näiden lämpötilojen yhdistelmää, jossa PMV-taso on hieman negatiivisen puolella.

Koska tuottavuutta ei päästy mittaamaan, voidaan ainoastaan todeta, että uusi malli antaa hieman erilaisia arvioita tuottavuudesta mitatuissa olosuhteissa kuin aiemmat mallit, erityisesti niissä olosuhteissa, joissa PMV-malli ennustaa parasta mahdollista lämpöviihtyvyyttä (PMV=0). Tämä voisi viitata siihen, että uusi malli ennustaa lämpöviihtyvyyden ja tuottavuuden välillä olevan jonkinlaista samansuuntaista yhteyttä. Mutta mallin testaus ei onnistunut täysinmääräisesti vähäisen mittausdatan saatavuuden johdosta.

7.2 Hiukkasten sisä-ulkosuhteen arviointimalli

Mittauskohteen olosuhteet olivat validoinnin kannalta ihanteelliset: huone jossa mittauksia tehtiin oli tyhjiöllään koko mittausjakson aikana, joten siellä ei ollut sisäisiä päästölähteitä. Lisäksi ilmanvaihto toimi jatkuvasti samalla teholla, joten myös koneellisen ilmanvaihdon ilmajärrät pysyivät vakiona.

Koekohteessa tehdyt pitkäaikaismittaukset hallituissa olosuhteissa osoittavat, että kehitetty arviointimalli antaa luotettavia tuloksia hiukkaskokoriippuvaisesta sisä-ulkosuhteesta. Arviointimallilla lasketut sisäilmapitoisuuden vaihtelut seurasivat myös hyvin mitattuja arvoja lukuun ottamatta pienintä noin 10 nanometrin kokoluokkaa. Tässä kokoluokassa voivat jo hiukkasten muuntumisprosessit vaikuttaa tuloksiin, mitä laskentamalli ei ota huomioon.



Ulkoilmasta siirtyy sisäilmaan hiukkasia kaikilla kokoalueilla, mutta suhteellisesti suurinta läpäisy oli koe-kohteessa kokoalueella 0,1 – 0,3 mikrometriä. Tällä kokoalueella sisäilmassa oli pienhiukkasia noin 30 % ulkoilman pitoisuudesta. Pienhiukkasten haitallisten terveysvaikutusten vuoksi on oleellista että torjuntaratkaisut kohdistuvat tehokkaasti tämän kokoluokan hiukkasiin.

Arviointimallin avulla laskettu vuotoilmavirta koekohteessa oli mittausten aikana 5 - 10 % koneellisen ilmanvaihdon ilmavirrasta. Vuotoilmavirtojen tunteminen on oleellista torjuntatoimien kannalta, koska vuotojen mukana pienhiukkasia kulkeutuu hallitsemattomasti sisäilmaan. Vuotoihin kannattaakin kiinnittää huomiota, mikäli rakennusten sisäilman laatua halutaan parantaa.

7.3 Sisäilman laskentatyökalu

Tulokset vahvistavat käsitystä tuloilmansuodatuksen tehokkuudesta keinona estää ulkoilman hiukkasmaisia epäpuhtauksien kulkeutuminen sisätiloihin ja osoittavat, että tehokas tuloilmansuodatus voi vähentää sairaspöissaoloja jopa kertaluokalla verrattuna karkeaan suodatukseen. Tehokkaamman tuloilmansuodatuksen implementoiminen olemassa olevaan rakennukseen ei kuitenkaan välttämättä ole mahdollista, sillä tehokkaamman suodatuksen korkeampi painehäviö saattaa johtaa siihen, että ilmanvaihtojärjestelmä ei pysty tuottamaan tarvittavaa ilmavirtaa tai ainakin ilmavirran tuottamiseen energiakulutus kasvaa. Tässä tapauksessa yhtenä vaihtoehtona on hyödyntää sähköavusteisia korkean suodatustehokkuuden ja matalan painehäviön suodatusratkaisuja.

Sellaisissa tilanteissa, joissa tehokkaampaa tuloilman suodatusta ei voi käyttää, on mahdollista hyödyntää ilmanpuhdistimia, joskaan niitä ei pitäisi lähtökohtaisesti käyttää pysyvänä ratkaisuna. Myös kiertoilmasuhteen nostaminen, yhdistettynä tehokkaaseen suodatukseen, vähentää sisäilman hiukaspitoisuutta. On kuitenkin syytä huomata, että suodatuksen lisäksi riittävästä raitisilmasta huolehtiminen on oleellista, jotta hiilidioksidipitoisuus pysyy alhaisena, sillä korkean hiilidioksidi pitoisuuden on osoitettu alentavan kognitiivista suorituskykyä.

Suhteellinen sairaspöissaoloarvio antaa käsityksen hiukkasmaisten epäpuhtauksien terveysvaikutuksista, mikä on tärkeää kustannus-hyötyanalyysin kannalta. Luotettavaan analyysiin tarvittaisiin kuitenkin tarkempaa eri kokoisten hiukkasten sekä muiden sisäilman epäpuhtauksien terveysvaikutuksista

Tulokset osoittavat työkalun hyödyllisyyden sisäilmanlaatuun liittyvissä tarkasteluissa, mutta työkalussa on vielä kehitettävää: (i) työkalu perustuu täydelliseen sekoittumiseen, mikä ei kuvaa riittävän hyvin kaikenlaisia tiloja, (ii) vuotoilmavirta on arvioitu tarkasteluissa vakioksi, (iii) tilojen käyttöaste on vakio tarkasteltavana ajanjaksona, mikä ei ole realistinen oletus, sekä (iv) työkalu ei vielä mahdollista syvällistä kustannusten ja hyötyjen analyysia. Työkalun jatkokehityksessä näitä puutteita tullaan korjaamaan sekä lisäksi tarkastelua laajennetaan kattamaan myös tarpeenmukaisen ilmanvaihdon sekä ilmanvaihdon energiatehokkuuden tarkastelu.

7.4 Ilmanvaihdon energiantalteenotto

Kehitetty uudenlainen LTO ratkaisu mahdollistaa ilmanvaihdon lämmöntalteenoton tehokkuuden parantamisen merkittävästi. Tämän ansiosta voidaan LTO-laitteiston kokoa pienentää, minkä ansiosta uudenlaisia LTO ratkaisuja voidaan asentaa joustavasti esimerkiksi korjausrakentamisen yhteydessä asuntoihin, joiden energiatehokkuutta halutaan parantaa, mutta joissa on aiemmin ollut vain painovoimainen ilmanvaihto tai pelkkä koneellinen poistoilmanvaihto. Samalla asuntojen sisäilman laatu paranee, kun ilmanvaihto on riittävä ja hallittu. Korjausrakentamisen yhteydessä tehtävä pelkkä ulkovaipan lisäeristys vähentää lämpöhäviöitä rakennuksen vaipan läpi, mutta samalla rakenteiden tiivistys voi tuoda uusia sisäilmaongelmia heikentyneen ilmanvaihdon myötä. Uuden LTO-kennon rakenteen avulla voidaan huoneistokohtainen ilmanvaihto toteuttaa aiempaa helpommin.

Uudenlaisella LTO-ratkaisulla on sovellusmahdollisuuksia perinteisen ilmanvaihdon lisäksi myös koh-teissa joissa ilmanvaihdon tilavaraus on rajoitettu. Näitä ovat esimerkiksi ajoneuvot, laivat ja junat.



Ratkaisu edistää terveellisten ja viihtyisien sisäilmaolosuhteiden saavuttamista energiatehokkaasti kestävä kehityksen mukaisesti.

7.5 Ilmansuodatuskonsepti

Tuloilman suodatuksen luokittelutaulukkoa voidaan hyödyntää arvioitaessa sisäilman hiukkaspitoisuuden tavoitetasoon sopivaa suodatusratkaisua eri ulko-olosuhteissa ja sisätilan käyttötarkoituksissa. Taulukkoa voi hyödyntää myös hiukkaspitoisuuksien sisä-ulkosuhteeseen perustuvassa suodattimien mitoituksessa. Luokittelua voidaan hyödyntää myös rakennusten uusien suorituskykyindikaattorien (KPI, Key Performance Indicator) laadinnassa.

Tuloilmasuodattimien laboratoriomittauksista saatiin merkittävää lähtödataa laskentatyökalujen kehittämiseen. Suodattimien erotusaste ja painehäviö eri ilmavirroilla oli odotetun mukainen. Sähköisesti avustetun ratkaisun erotusaste oli hyvin korkea ja painehäviö pieni verrattuna vain mekaaniseen suodattamiseen perustuvissa suodattimissa. Vaikka kyseessä oli jatkuvatoimisella hiukkasvaraajalla toteutettu ratkaisu, sen suorituskyky voi hieman alentua pitkäaikaisen käytön ja kuormituksen aikana. Hiukkasvaraaja oli toteutettu siten, että se muodostaa vain vähän otsonia. Suodattimessa oli myös kaasusuodatuskerros, joka suodattaa ilmassa ja varaajassa syntyneen otsonin sekä muita kaasumaisia epäpuhtauksia.

Hiukkaspitoisuuksien sisä-ulkosuhteessa rajoitetaan usein massapitoisuuksiin (PM2.5). Mm. Sisäilmastoluokitus määrittää S1-luokan massapitoisuuksien suhteeksi alle 0.5 ja S2-luokan alle 0.7 (SIY 2018). Sisä-ulkosuhte on kuitenkin hyvin riippuvainen hiukkaskoosta. Kunnianhimoisempi tavoite onkin määrittää sisä-ulkosuhte rakennuksen läpäisevimmän hiukkaskoon perusteella. Tällä varmistutaan, että rakennus kykenee suojaamaan käyttäjiään kaikilta ulkoilmasta sisäilmaan kulkeutuvilta hiukkasmaisilta epäpuhtauksilta. Käytännön sovelluksissa lähtökohtana voi olla esimerkiksi 0.3 µm hiukkaskoko, joka voidaan mitata riittävän luotettavasti ja kustannustehokkaasti optisilla hiukkasmittareilla.

Sisäilmastopalvelun ilmansuodatuskonsepti on hyödynnettävissä eri rakennustyypeille, ilmanvaihtojärjestelmille ja epäpuhtauksille, vaikkakin se FutureSpaces-hankkeessa keskittyi tuloilman hiukkassuodattamiseen koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla varustetuissa palvelu- ja toimistorakennuksissa. Konsepti on yleinen, ja jokainen siinä esitetty aihealue vaatii asiantuntemusta ja yksityiskohtaista tietoa käytäntöön sovellettaessa. Lähtökohtana konseptin kehittämisessä on ollut siirtyminen mittauspainotteisuudesta enemmän laskentaan ja mallinnukseen, kun kokonaispalvelukonsepti kehittyy ja siihen liittyvän datan määrä rakennuksista kasvaa. Tästä huolimatta tilanne voi olla usein se, että lähtöarvoja puuttuu tai niissä on merkittäviä epävarmuuksia, mitkä tulee todentaa tarkasteluin ja mittauksin paikan päällä.

8. Johtopäätökset

8.1 Lämpöviihtyvyys ja työn tuottavuus

Mitattujen huoneiden fysikaalisiin mittauksiin perustuva terminen viihtyisyys oli kokonaisuutena melko hyvä verratessa Sisäilmastoluokituksen 2018 tavoitearvoihin. Kohteissa oli kevättalvimittauksissa muutamia tavoitearvojen alituksia, mutta nekään eivät olleet kovin suuria. Talvella v. 2021 ja v. 2022 kovien pakkasten aikaan terminen viihtyisyys oli heikompi kuin kevättalven mittauksissa. Tavoitearvon ylitykset tapahtuivat mittauspisteissä, jotka sijaittivat ikkunan vieressä oleskelualueella.

ASHRAE 55P-standardin laskennallisiin PMV-arvoihin verratessa tavoitearvot saavutettiin kevään mittauksissa, mutta vain puolessa kesän ja talven mittauksista (3/6). Niissäkin, joissa tavoitearvot saavutettiin, jäätiiin juuri ja juuri C-luokan sisälle.

Lämpöviihtyvyyden kyselytutkimukset ja mittaustulokset erosivat toisistaan pääosin johdonmukaisesti ja samansuuntaisesti vuodenaikojen sisällä, joskin otanta oli äärimmäisen suppea, johtuen pääosin COVID-19-koronaviruspandemiaan liittyneistä etätyösuosituksista.



Ihmiskehon eksergiankulutuksen laskentaan perustuva lämpöviihtyvyyden arviointimalli antoi tässäkin samansuuntaisia tuloksia kuin aiemmin: ihmiskehon eksergiankulutuksen minimikohta on hieman alemmissa lämpötiloissa kuin esim. PMV-mallin antama parhaan lämpöviihtyvyyden kohta. Mittauksien vähäisyyden takia ei kuitenkaan voida aukottomasti todistaa, että kyseinen menetelmä antaisi täsmällisen kohdan lämpöviihtyvyyden maksimille.

Vielä vähemmän dataa oli käytettävissä tuottavuusmallin validointiin, mutta jo yksi mittauskohde osoitti, että malli antaa aiemmista malleista poikkeavan tuloksen. Tuloksen hyvyydestä ei kuitenkaan voida tehdä mitään johtopäätöksiä käytettävissä olevan datan perusteella. Mittauksia pitää siis jatkaa, ja mieluiten yhdistää niihin myös tuottavuuden mittauksia.

8.2 Hiukkasten sisä-ulkosuhteen arviointimalli

Esitetyn arviointimallin avulla voidaan sisäilman hiukkaspitoisuuksia arvioida luotettavasti ulkoilman hiukkaspitoisuudesta riippuen. Malli avulla voidaan tutkia ulkoilman pienhiukkasten kulkeutumista sisäilmaan aiempaa tarkemmin, mikä syventää tietämystä ja mahdollistaa kustannustehokkaiden altistumisen vähentämiseen tähtäävien ratkaisujen kehittämisen.

8.3 Sisäilman laskentatyökalu

Projektissa kehitettiin uusi laskentatyökalu hiukkas- ja kaasumaisille epäpuhtauksien pitoisuuksien arvioimiseksi sisätiloissa. Tulokset vastaavat mittauksia laajalle hiukkaskokoalueella ja tehdyt tarkastelut osoittavat työkalun hyödyllisyyden käytännössä. Sisäilmanlaatuun liittyviä kustannuksia ja hyötyjä on tarkasteltava vielä tarkemmin, jotta löydetään kustannustehokkaita ratkaisuja sisäilmanlaadun parantamiseksi. Näiden ratkaisujen energiatehokkuus- ja kestävyysvaikutuksia tulee tarkastella jatkossa laajemmin. Lisäksi epäpuhtauksille altistumisen terveys- ja tuottavuusvaikutuksia tulee pystyä arvioimaan tarkemmin. Edellä mainitut seikat korostavat myös monialaisen osaamisen tarvetta.

8.4 Ilmanvaihdon energiantalteenotto

Tulokset osoittavat, että 3D-tulostaminen mahdollistaa uudenlaisten rakenteiden toteuttamisen ainakin pienessä mittakaavassa ja että näillä on myös mahdollista parantaa LTO-ratkaisujen hyötysuhdetta merkittävästi. Ratkaisut perustuvat lämmönsiirtokertoimen parantamiseen LTO-kennon läpivirtaavan ilman virtauksia muuttamalla. Tuloksena on kompakti rakenne, jolla on monia mahdollisuuksia erilaisissa käyttösovelluksissa. Jatkokehityksellä voidaan rakennetta optimoida siten, että maksimoidaan saatu lisäenergia suhteessa lisääntyneeseen puhallinenergian tarpeeseen.

8.5 Ilmansuodatuskonsepti

Hankkeessa määritettiin tuloilman suositeltavat hiukkassuodatusluokat FutureSpaces-palvelukonseptissa. Tätä sekä hiukkaskokoluokittaisten sisä-ulkopitoisuuden suhteen laskentaa voidaan hyödyntää kuhunkin tilanteeseen sopivan tuloilmasuodatuksen valinnassa.

Ilmansuodatuskonsepti toteutettiin yleisellä tasolla, mutta sen soveltaminen FutureSpaces-hankkeessa keskittyi tuloilman hiukkassuodatukseseen. Tavoitteena oli luoda ilmansuodatuksen viitekehys kokonaispalvelukonseptille, mikä mahdollistaa siirtymisen mittauspainotteisuudesta enemmän laskentaan ja mallinukseen palveltavien rakennusten ”datapankin” kasvaessa. Lisätietoa ilmansuodatusratkaisusta voidaan edelleen hakea myös laboratorio- ja kenttämittauksilla.

Ilmansuodatuskonseptia on mahdollista laajentaa ja syventää mm. sisäilman suodatukseseen ja puhdistukseen. Sisäilman hiukkaslähteet ovat joissakin tapauksissa tärkeässä roolissa epäpuhtauksien leviämässä sisätiloissa (Jantunen, 2022). Esimerkiksi hengitystieinfektiota sairastava ihminen voi emittoida taudinaiheuttajia ilmaan hengittäessään, puhuessaan tai yskiessään. Toinen esimerkki on rakennuksen mikro-robivaurioista sisäilmaan leviävät hiukkasmaiset ja kaasumaiset epäpuhtaudet. Lisäksi suodatinratkaisun



kriteerejä, kuten vuosienergiakustannusta, voidaan syventää yksityiskohtaisilla mittauksiin perustuvilla tiedoilla sekä tuoda lisäkriteerejä esim. ultrapientien hiukkasten tai keuhkodesoituvien hiukkasten suodattamisen osalta.

9. Yhteenveto

Tutkimusraportti esittää sisäilmaston tuottavuustarkasteluja ja ilmanvaihtoratkaisuja, jotka toteutettiin FutureSpaces-hankekokonaisuudessa 2020-2023. VTT kehitti hankkeessa uuden menetelmän ihmiskehon eksergiankulutuksen laskemiseen perustuvaan työn tuottavuuden arviointiin, hiukkasten sisä-ulkosuhteen arviointimallin, uuden laskentatyökalun sisäilman epäpuhtauksien ja niiden tuottavuusvaikutuksien arviointiin, ratkaisuja ilmanvaihdon energiantalteenottojärjestelmien lämmönsiirto- ja tilatehokkuuden merkittävään parantamiseen sekä kestäväen kehityksen mukaisen sisäilmastopalvelun ilmansuodatuskonseptin.

Lähdeviitteet

- A-Insinöörit (2023). Experisense. <https://www.ains.fi/palvelumme/muut-asiantuntijapalvelut/experisense>. Viitattu 26.9.2023.
- Ala-Juusela, M. (2017). Energy efficiency, thermal comfort and labour productivity: A literature review and description of a method using human body exergy to calculate productivity. Appendix 4 in: Fawcett, Tina and Killip, Gavin. 2017. Frameworks for assessment, final report; D2.3 of IN-BEE project.
- Ala-Juusela, M. and Shukuya, M. (2014) Human Body Exergy Consumption and Thermal Comfort of an Office Worker in Typical and Extreme Weather Conditions in Finland. Energy and Buildings.
- Ala-Juusela, M. ja Laamanen, J. (2022) Lämpöviihtyvyyden mittaukset toimistotiloissa, Future Spaces-projekti. Väliraportti. VTT. https://www.futurespace.fi/files/ugd/d3cee9_e45f846a278d4900bf92550aa84c8dd1.pdf. Viitattu 28.9.2023
- ASHRAE standard 55 P. Thermal environmental conditions for human occupancy. February 2003.
- Eurovent (2022) Guideline 4/23 – 2022 Selection of EN ISO 16890 rated filter classes for general ventilation applications. Fourth edition. https://eurovent.eu/?q=file/14690/download&token=DKPL_Oq
- González-Torres, M., Pérez-Lombard, L., Coronel, J. F., Maestre, I. R., & Yan, D. (2022). A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. Energy Reports, 8, 626-637. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.280>
- Hänninen, O. & Asikainen, A. (eds.) (2013). Efficient reduction of indoor exposures Health benefits from optimizing ventilation, filtration and indoor source controls. Report 2/2013. National Institute for Health and Welfare. https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/110211/RAP2013_002_3rd%20edition_25%2011%202014_web.pdf?sequence=1
- Hänninen, O., Lehtomäki, H. & Korhonen, A. (2020). Ilmansaasteet ja kuolleisuus kärjessä, tautitaakka yli kaksinkertainen : Ympäristöaltisteiden kansanterveysvaikutukset. Ympäristö ja terveys, 51(1), pp. 6-13.
- Jantunen, M. J. (2022). Pandemic management requires exposure science. Environment International, 169, 107470.
- Kosonen, R. & Tan, F. 2004. Assessment of productivity loss in air-conditioned buildings using PMV index. Energy and Buildings volume 36 (2004) pp. 987–993.



- Kulmala, I., Silvonen, V., Salo, L., Rönkkö, T., Raunima, T., & Vinha, J. (2022). Modelling of particle size resolved I / O ratio in an office building. Indoor Air Conference 2022.
- Kulmala I, Parviainen H, Hall I and Pasanen P (2020). A Novel Method for Determining Infiltration of Mechanically Ventilated Buildings, Science and Technology for the Built Environment, 26:2, 250-256, DOI: 10.1080/23744731.2019.1620577
- Lan, L., Wargocki, P. and Lian, Z. (2012) Optimal thermal environment improves performance of office work. REHVA journal January 2012.
- Mosley, R.B., D.J. Greenwell, L.E. Sparks, Z. Guo, W.G. Tucker, R. Fortmann, and C. Whitfield (2001). Penetration of ambient fine particles into the indoor environment. Aerosol Science and Technology 34:127–36.
- Prek, M. (2005) Thermodynamic analysis of human heat and mass transfer and their impact on thermal comfort. International Journal of Heat and Mass Transfer 48. pp. 731–739
- Roelofsen, P. (2002) The impact of office environments on employee performance: The design of the workplace as a strategy for productivity enhancement. Journal of Facilities Management, Vol. 1 Iss: 3 pp. 247 – 264.
- Salmela, H., Taipale, A., Heinovaara, J., Moberg, J., & Enbom, S. (2017). Laskentamalli sisäilman puhdistusratkaisujen kustannusten vertailemiseksi. Sisäilmastoseminaari 2017.
- Seppänen, O., & Fisk, W. J. (2006). A Procedure to Estimate the Cost Effectiveness of the Indoor Environment Improvements in Office Work. In D. Clements-Croome (Ed.), Creating the Productive Workplace (2nd Edition, pp. 407–433). Taylor & Francis.
- Seppänen, O.; Fisk W. J. and Q.H. Lei, Q.H. (2006) Room Temperature and Productivity in Office Work. Lawrence Berkeley National Laboratory. Available at: <http://escholarship.org/uc/item/9bw3n707>
- SFS-EN 16798-3:2017 Rakennusten energiatehokkuus. Rakennusten ilmanvaihto. Osa 3: Muiden kuin asuinrakennusten ilmanvaihto- ja huoneilmastointijärjestelmien tehokkuusvaatimukset. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. <https://online.sfs.fi/>. Viitattu 26.9.2023.
- SFS-EN ISO 16890-1:2016. Yleisilmanvaihdon ilmansuodattimet. Osa 1: Tekniset määritelmät, vaatimukset ja hiukkasmaisen aineksen erotusasteeseen perustuva luokitusjärjestelmä (ePM). Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. <https://online.sfs.fi/>. Viitattu 26.9.2023.
- SFS-EN ISO 16890-2:2022:en. Air filters for general ventilation. Part 2: Measurement of fractional efficiency and air flow resistance. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. <https://online.sfs.fi/>. Viitattu 26.9.2023.
- SFS-EN 779:2012 Particulate air filters for general ventilation. Determination of the filtration performance. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Poistettu käytöstä 1.6.2018.
- SFS-EN ISO 29463-5:2022:en. High-efficiency filters and filter media for removing particles in air. Part 5: Test method for filter elements. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. <https://online.sfs.fi/>. Viitattu 26.9.2023.
- Shukuya, M. 2006. Comfortable high-performance and low-exergy built environment, in: International-Energy-Agency Programme on Energy Conservation in Buildings & Community Systems Conference (IEA/ECBCS), Lyon, France, 2006, pp. 893–898
- Shukuya, M.; Iwamatsu, T. and Asada, H. 2012. Development of human-body exergy balance model for a better understanding of thermal comfort in the built environment. Int. J. Exergy, Vol. 11, No. 4, pp.493–507.



- Shukuya, M.; Saito, M.; Isawa, K.; Iwamatsu, T. and Asada, H. 2009. Human-body Exergy Balance and Thermal Comfort. Working Report of IEA/ECBCS/Annex49, 2009.
- Siilin, N., Salmela, H., Kulmala, I. & Taipale, A. (2023). Novel computational tool for indoor air quality. Healthy Buildings 2023 Europe conference.
- Silvonen, V., Salo, L., Kulmala, I., Raunima, T., & Karjalainen, P. (2022). Characterization of indoor and outdoor particles in a mechanically ventilated office building. Indoor Air Conference 2022.
- Simone, A.; Kolarik, J.; Iwamatsu, T.; Asada, H.; Dovjak, M.; Schellen, L.; Shukuya, M. and Olesen, B.W. 2011. A relation between calculated human body exergy consumption rate and subjectively assessed thermal comfort. Energy and Buildings, vol 43, pp.1-9.
- SIY2018. SISÄILMASTOLUOKITUS 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. RT 07-11299.
- STM 545/2015. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista.
- Tartarini, F., Schiavon, S., Cheung, T., Hoyt, T., 2020. CBE Thermal Comfort Tool : online tool for thermal comfort calculations and visualizations. SoftwareX 12, 100563. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100563> (Tool available at: <https://comfort.cbe.berkeley.edu/>)
- Tokunaga, K. and Shukuya, M. 2011. An Experimental Study on Sweat Secretion and its Relation to Human-Body Exergy Balance in Hot and Humid Summer.
- Vinha, J. (2022). FutureSpaces-hanke. FutureSpaces-loppuseminaari. 24.8.2022. https://www.futurespace.fi/files/ugd/1b730d_0a3ed7c47b2940ff8c7b383bab8484da.pdf. Viitattu 26.9.2023.
- Wan, J.W; Yang, K.; Zhang, W.J. and Zhang, J.L. (2009) A new method of determination of indoor temperature and relative humidity with consideration of human thermal comfort, Building and Environment, Volume 44, Issue 2, February 2009, Pages 411-417, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.04.001>.
- World Health Organization (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/345329>.
- Wu, X., Zhao, J., Olesen, B.W. and Fang, L. (2010) A Novel Human Body Exergy Consumption Formula to Determine Indoor Thermal Conditions for Optimal Human Performance in Office Buildings, Energy and Buildings (2010), doi:10.1016/j.enbuild.2012.10.010

Certificate Of Completion

Envelope Id: B16E134A542A477FABD388EABA3CC2B3	Status: Completed
Subject: Complete with DocuSign: VTT-R-00637-23.pdf	
Source Envelope:	
Document Pages: 40	Signatures: 1
Certificate Pages: 1	Initials: 0
AutoNav: Enabled	Envelope Originator:
Envelopeld Stamping: Enabled	Christina Vähävaara
Time Zone: (UTC+02:00) Helsinki, Kyiv, Riga, Sofia, Tallinn, Vilnius	Vuorimiehentie 3, Espoo, .. . P.O Box1000,FI-02044 Christina.Vahavaara@vtt.fi IP Address: 130.188.17.16

Record Tracking

Status: Original	Holder: Christina Vähävaara	Location: DocuSign
29 September 2023 10:02	Christina.Vahavaara@vtt.fi	

Signer Events

Heidi Krohns-Välimäki
Heidi.Krohns-Valimaki@vtt.fi
Research Manager
Security Level: Email, Account Authentication (None), Authentication

Signature

DocuSigned by:
Heidi Krohns-Välimäki
C8D3A9772BFA41B...
Signature Adoption: Pre-selected Style
Using IP Address: 130.188.17.16

Timestamp

Sent: 29 September 2023 | 10:03
Viewed: 29 September 2023 | 10:37
Signed: 29 September 2023 | 10:38

Authentication Details

SMS Auth:
Transaction: 5cfc5cd7-4f77-4551-a351-4de137b9e68d
Result: passed
Vendor ID: TeleSign
Type: SMSAuth
Performed: 29 September 2023 | 10:37
Phone: +358 40 7237425

Electronic Record and Signature Disclosure:
Not Offered via DocuSign

In Person Signer Events	Signature	Timestamp
Editor Delivery Events	Status	Timestamp
Agent Delivery Events	Status	Timestamp
Intermediary Delivery Events	Status	Timestamp
Certified Delivery Events	Status	Timestamp
Carbon Copy Events	Status	Timestamp
Witness Events	Signature	Timestamp
Notary Events	Signature	Timestamp
Envelope Summary Events	Status	Timestamps
Envelope Sent	Hashed/Encrypted	29 September 2023 10:03
Certified Delivered	Security Checked	29 September 2023 10:37
Signing Complete	Security Checked	29 September 2023 10:38
Completed	Security Checked	29 September 2023 10:38
Payment Events	Status	Timestamps