



Tilan ilmanvaihdon arviointi CO₂-mittausten perusteella

Pia Huhtala

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2023

Talotekniikan tutkinto-ohjelma
LVI-talotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikan tutkinto-ohjelma
LVI-talotekniikka

HUHTALA, PIA;
Tilan ilmanvaihdon arviointi CO₂-mittausten perusteella

Opinnäytetyö 69 sivua, joista liitteitä 5 sivua
Huhtikuu 2023

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, kuinka epäpuhtaudet leviävät sisätilassa ilmavirtojen mukana. Työ liittyy tutkimushankkeeseen, jossa tutkitaan ilmateitse leviävien virusten ja tautien levittäytymistä. Työssä selvitettiin ryhmätyötilan hiilidioksidimittausten avulla, kuinka epäpuhtauspitoisuuksia voidaan käyttää tauti-indikaattorina ja millaisissa käyttötapauksissa ilmamäärät ovat infektioriskin kannalta vähäisimmät. Tutkimustyö on osa Business Finlandin rahoittamaa, monitieteistä E3 Excellence in Pandemic Response and Enterprise solutions -yhteisinnovaatioprojektia.

Työssä tarkastellaan tilan ilmanvaihdon riittävyyttä hiilidioksidimittausten perusteella sekä sitä, kuinka pitoisuus vastaa ilman vaihtuvuutta. Tilan hiilidioksidimitaukset perustuvat erilaisiin käyttötapauksiin: normaalia luokkatilaa vastaava käyttö viikon ajan sekä käyttö, jossa ilmanvaihtomääriä säädellään kontrolloiduissa käyttötapauksissa. Mittausanturit sijaitsevat pääosin oleskeluvyöhykkeellä ja ilmanvaihtokanavissa, lisäksi muutama anturi sijaitsee sisäänkäynnin alueella, jonne automaatiota on helppo asentaa.

Työn tuloksissa esitellään mittausdatasta kerätyt tulokset ja huomiot. Mittausten perusteella arvioitiin ilmanvaihtomäärien riittävyyttä tietyllä kuormituksella. Tulokset osoittavat, että tilan hiilidioksidipitoisuus kuvastaa ilman vaihtuvuutta hyvin ja on siten yhteydessä mahdolliseen infektioriskiin. Ilmanvaihtoa lisäämällä ei täysin voida ehkäistä ilmajälitteisten tautien leviämistä, mutta tehokkaampi ilmanvaihto tarjoaa kuitenkin suuren potentiaalin tartuntariskin madaltamiseen.

Asiasanat: hiilidioksidi, indikaattori, mittaus, epäpuhtaus, käyttöaste

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Building Services Engineering
HVAC Systems

HUHTALA, PIA:
Evaluation of Room Space Ventilation with CO₂ Measurements

Bachelor's thesis 69 pages, appendices 5 pages
April 2023

The purpose of this thesis was to examine the sufficiency of room ventilation on basis carbon dioxide measurements. The subject-matter is related to E3 - project (Excellence in Pandemic Response and Enterprise Solutions Co-Innovation).

The measurements were performed in a Tampere University of Applied Sciences campus classroom. 17 measuring transducers were disposed in the classroom. Each of them measured temperature and relative humidity, and some of them also measured carbon dioxide, total volatile organic compounds, and pressure. The measuring transducer sent data to the cloud, so it was possible to observe different use cases and measuring levels based on them. Transducers were located at different sides of the classroom. One measuring stand held three measurements transducers. Average values were calculated from the data. Some measurement transducers were also located in ventilation ducts.

Three different types of use cases were observed: follow-up after one week, three different amounts of air in the classroom situation, and load-based ventilation. Measurements data was collected throughout the spring of 2023. Observing on the measuring results, a conclusion can be made about ventilation sufficiency. Too high carbon dioxide-levels indicate "bad air" when air does not change enough. Clinical tests proof that spread of diseases are easier in spaces where air change rate is low, and the results of the thesis support the claim.

Key words: carbondioxide, measurements, sufficiency, air change rate

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
1.1	Työn rajaus	7
2	ILMANVAIHDON MITOITUS	8
3	EPÄPUHTAUDET ILMANVAIHDOS- SASSA	11
3.1	Lämpötila ja suhteellinen kosteus	11
3.2	Hiilidioksidipitoisuus	12
3.3	Hiukkaset ja VOC-yhdisteet	13
3.4	Epäpuhtauksien alkuperät.....	15
3.5	Ilmanlaadun vaikutus ihmiseen	19
3.6	Epäpuhtauskuorman vaikutus ilmanvaihdon mitoitukseen	22
3.7	Haitalliseksi tunnettuja pitoisuuksia ja M-luokitus.....	25
4	MITTAUKSEEN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ	27
4.1	Ajankohdan vaikutus	27
4.2	Mittalaitteen luotettavuus	29
5	MITTAUKSEN TOTEUTUS	30
5.1	Mittalaitteisto	31
5.2	Mitta-antureiden kalibrointi	35
6	TULOSTEN TULKINTA	37
6.1	Tulosten tulkinta, lämpötila ja RH.....	37
6.2	Tulosten tulkinta, hiilidioksidi	38
6.3	Tulosten tulkinta, hiukkaset ja VOC-yhdisteet.....	39
7	TULOKSET	40
7.1	Käyttötapaus 1, yleinen seuranta	40
7.2	Käyttötapaus 2, vajaalla ilmavirralla	41
7.3	Käyttötapaus 2, osittaisella ilmavirralla	43
7.4	Käyttötapaus 2, täydellä ilmavirralla.....	45
7.5	Käyttötapaus 3, muuttuvalla ilmavirralla	47
8	TULOSTEN TARKASTELU	49
8.1	Käyttötapaus 1	49
8.2	Käyttötapaus 2	50
8.2.1	Pienhiukkaset	55
8.3	Käyttötapaus 3	56
8.4	Poistoilmakanavisto	57
8.5	Kemialliset epäpuhtaudet.....	60
9	POHDINTA	61
	LÄHTEET.....	63

LIITTEET	65
Liite 1. Kalibrointitodistus 1(2).....	65
Liite 1. Kalibrointitodistus 2(2).....	66
Liite 2. Mittaussuunnitelma H1-24 1(3)	67
Liite 2. Mittaussuunnitelma H1-24 2(3)	68
Liite 2. Mittaussuunnitelma H1-24 3(3)	69

LYHENTEET JA TERMIT

CO ₂	Hiilidioksidi
Iv	Ilmanvaihto
Ilmanvaihto	Vanha käytetty ilma korvataan uudella puhtaalla ilmalla
Ilmastointi	Kierrättää sisäilmaa ja muuttaa sen ominaisuuksia
VOC	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (Volatile Organic Compounds)
TVOC	Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuus (Total Volatile Organic Compounds)
PAH	Polysyklinen aromaattinen hiilivety-yhdiste (syntyy eritoten palamisreaktioissa)
HTP	Haitalliseksi tunnetut pitoisuudet
RH	Ilman suhteellinen kosteus (Relative humidity)
ppm	Miljoonasosa (Parts per million)
ppb	Miljardisosa (Parts per billion)
µm	Mikrometri
PM _{2,5}	Pienhiukkaspitoisuus, jossa hiukkasen koko alle 2,5µm
PM ₁₀	Pienhiukkaspitoisuus, jossa hiukkasen koko alle 10 µm
Bar	Paineen yksikkö, bar
Pascal	Paineen yksikkö, Pa (100 000 Pa=1 bar)
Kognitiiviset kyvyt	Henkilön tiedon käsittelyyn liittyvät toiminnot, esimerkiksi ajattelu, muistaminen ja havainnointi

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö liittyy monitieteelliseen E3- hankkeeseen (Excellence in Pandemic Response and Enterprise Solutions Co-Innovation). Monitieteiseen projektiryhmään kuuluu talotekniikan, aerosolifysiikan, epidemiologian, solu- ja molekyylibiologian ja kiinteistökehittämisen tutkijoita.

Tutkimusprojektin tavoitteena on löytää ratkaisuja, joiden avulla voidaan havainnollistaa ja ehkäistä ilmateitse leviävien virusten ja taudinaiheuttajien leviäminen. Tilojen sisäilman pitäminen puhtaana ja riittävän vaihtuvana auttaa yhteiskunnan toimintoja jatkumaan keskeytymättömänä ja turvallisesti tautitilanteista johtumatta (E3, 2023).

Työn keskeisinä tutkimuskysymyksinä arvioidaan, kuinka epäpuhtaudet kulkeutuvat ilmapirran mukana, ja kuinka hiilidioksidia voidaan hyödyntää tilan käyttöasteen arvioinnissa. Ilman epäpuhtautta voidaan mitata suuntaa antavasti myös TVOC-pitoisuuden mukaan (Sisäilmayhdistys Ry, 2008). Tilakäyttäjät altistuvat päivittäin lukuisille eri mikrobeille, joten on tärkeää arvioida ilman eri pitoisuuksia laajasti ja eri menetelmillä.

1.1 Työn rajaus

Opinnäytetyö keskittyy sisäilman epäpuhtauksien pitoisuuden arviointiin mittaamalla tilan hiilidioksiditasoa. Epäpuhtauspitoisuus antaa kuvan tilan ilmanvaihdon toimivuudesta. Työ tarkastelee fysikaalisia ja kemiallisia tekijöitä, ja pohtii niiden mahdollista vaikutusta sisäilmasta johtuviin oireisiin. Kuitenkin eri tekijöiden aiheuttamiin terveydellisiin havaintoihin ja oireisiin voi tarkemmin ottaa kantaa ai-noastaan aiheeseen perehtynyt lääkäri tai muu terveydenhuollon asiantuntija, sillä oireet voivat olla hyvin yksilöllisiä ja näyttäytyä eri tavoilla eri ihmisillä. Työssä ei kehitetä uusia menetelmiä, vaan selvitetään näkökulmia lähtöaineiston perusteella sekä hiilidioksidipitoisuutta mittaamalla.

2 ILMANVAIHDON MITOITUS

Koneellista ilmanvaihtoa suunniteltaessa pyritään yleensä ilmanvaihtomäärien kokonaistasapainoon. Tämä tarkoittaa, että useammilla ilmanvaihtokoneilla on mahdollista ohjata keskenään eri määriä ilmavirtoja, mutta ilmanvaihtomäärät ovat rakennuskohtaisesti tasapainossa. Jokaisen yksittäisen tilan ei tarvitse olla tasapainossa ilmamäärien suhteen, vaan määriä voi jakaa niin, että ilma virtaa tilasta toiseen painesuhteiden avulla. On yleistä, että esimerkiksi käytävätiloihin johdetaan suuria ilmamääriä, ja suurin osa poistoilmapäätteistä voi olla wc-tiloissa. Näin ehkäistään likaisen ilma sekoittuminen oleskeluvyöhykkeen ilmaan. Kun wc-tiloissa on suuremmat poistoilmamäärät kuin käytävällä, on wc-tila tällöin alipaineinen, ja ilma virtaa likaisempaan tilaan päin (Sandberg, 2016, 98).

Ilmanvaihto mitoitetaan joko ohjearvojen perusteella, kokemusperäisesti tai eri kuormitusten perusteella. Taulukkoon 1. on kerätty ulkoilmavirran mitoitusohjearvoja julkaistujen Sisäilmaluokitusten mukaan eri aikakausilta, keskittyen pääosin toimisto- ja asuinhuoneiden ilmanvaihtovirran mitoitukseen. Taulukon oikeaan reunaan on koottu Rakentamismääräysten ohjearvoja D2- julkaisuista.

Vuoden 1976 D2- julkaisu Määräykset rakennuksen ilmanvaihtoon liittyen ei mainitse ilmamääriä, vaan vähimmäismäärinä on käytettävä viranomaisten ja sisäasiainministeriön määräyksissä ja ohjeissa hyväksytyjä arvoja, tai muita riittävän hyväksi osoitettuja arvoja, määräysten ja ohjeiden puuttuessa. Vuoden 1978 julkaisu sisältää sekä määräykset että ohjeet, johon tilakohtaiset ohjearvot on määriteltä. Muun muassa ulkoilmavirta on tuolloin ollut vähintään $0,35 \text{ dm}^3/\text{sm}^2$ (Ympäristöministeriö).

TAULUKKO 1. Ulkoilmavirtojen raja-arvoja eri lähteistä ja aikakausilta.

Julkaisu	S1	S2	S3	RakMK D2 Määräykset ja ohjeet
Sisäilmastoluokitus 2018 Toimitilat	1,5 dm ³ /s, m ² 16 dm ³ /hlö	1,0 dm ³ /s, m ² 11 dm ³ /hlö	1,0 dm ³ /s, m ² 6 dm ³ /hlö	2012: Toimistohuone 6 dm ³ /s, hlö 1,5 dm ³ /s, m ²
Sisäilmastoluokitus 2008 Toimitilat	1,5 dm ³ /s, m ² 16 dm ³ /hlö	1,5 dm ³ /s, m ² 13 dm ³ /hlö	1,5 dm ³ /s, m ²	2010: Toimistohuone 6 dm ³ /s, hlö 1,5 dm ³ /s, m ²
Sisäilmastoluokitus 2000 Asuin- ja työtilat	12 l/s, hlö	8 l/s, hlö	6 l/s, hlö	2003: Toimistohuone 6 dm ³ /s, hlö 1,5 dm ³ /s, m ²
Rakennuksen sisäilmasto 1995 (*epäpuhtauskuormaan perustuva)			1...6 dm ³ /sm ² 4...16 dm ³ /hlö	1987: Toimistohuone, 10 dm ³ /s, hlö 1 dm ³ /s, m ²
Rakennusten sisäilmasto 1989 Toimisto- ja asuinhuoneet		(Luokka: Hyvä) 7,5 dm ³ /hlö	(Luokka: Tyydyttävä) 5 dm ³ /hlö	1978: Toimistohuone, savuton 0,8 dm ³ /s Tupakointi sallittu 1,6 dm ³ /s

Julkaisut *Rakennusten sisäilmasto 1989*, *Rakennusten sisäilmasto 1995*, sekä *Sisäilmastoluokitus 2000* ilmoittavat erääksi ohjearvojen lähteeksi vuonna 1987 julkaistun D2 Rakennuksen sisäilmasto ja ilmanvaihto- ohjekortin. Rakennuksen sisäilmasto 1995 ja 1989 ovat nykyisiä Sisäilmastoluokituksia edeltäviä rakennusten sisäilmaston suunnittelua ohjaavia julkaisuja. Vuoden 1995 painoksessa ei otettu kantaa ulkoilmavirran mitoittamiseen yleisesti, vaan mitoitus perustui epäpuhtauskuorman avulla laskettavaan ilmamäärätarpeeseen. Ohjearvojen suhteen ohjattiin julkaisun D2 (1987) pariin.

Sisäilmastoluokitusta on käytetty muun muassa taloteknisen suunnittelun apuna, tavoitteenaan rakentaa entistä viihtyisämpiä ja terveellisiä rakennuksia. Luokista S1:n ohjearvojen mukaan suunniteltujen tilojen arvioidaan herättävän vähiten tyytymättömyyttä. Tällöin tavoitellaan määräystasoa parempaa sisäilmastoa. Sisäilmastoluokka S3 täyttää maankäyttö- ja rakennuslain nojalla annetut säädökset

koskien sisätilan ilman laadun ja lämpöolojen vähimmäisvaatimukset. Opinnäytetyössä sisäilmastoluokkia käytetään pääosin yleisen vertailun tukena, kun havainnoidaan sisäilman laatua.

Vuonna 1976 hyväksyttiin lakiesitys tupakoinnin vähentämisestä. Esitys sisälsi esimerkiksi julkisten tilojen savuttomuuden, sekä tupakointikiellon julkisessa liikenteessä (Savuton Suomi). Tupakkalaki on astunut voimaan 1.3.1977, mutta vielä Sisäilmastoluokitus 2000:ssa on maininta, jonka mukaan suunnitteluluokkien S1 sekä S2 mukaan suunniteltavat tilat ovat pääsääntöisesti savuttomia. Sisäilmastoluokituksessa 2008 mainitaan suunnittelun perustuvan tupakoimattomuuteen kaikissa sisäilmastoluokissa.

Tupakoinnin kieltäminen sisätiloissa on ollut yksi suurimmista kuormitustekijöiden muutoksista huoneilman laadulle. Yliämpö ja selkeästi mitattavat epäpuhtauslähteet ovat toimineet tarvittavien ilmavirtojen mitoitusperusteena. Ei kuitenkaan ole olemassa tiettyä, absoluuttista raja-arvoa ilmamäärille, vaan minimi-ilmavirrat ovat perustuneet kokeellisiin menetelmiin: kuinka ihmiset aistivat sisäilman laadun tilaan saapuessaan ulkoilmasta, ja kuinka sama ilma koetaan kun tilassa on vietetty hetken aikaa. Sittemmin on tilastollisesti ja kokeellisesti pystytty todistamaan miten ilmanvaihtuvuus vaikuttaisi sairauspoissaoloihin (Hagner, 2019, 79).

3 EPÄPUHTAUDET ILMANVAIHDOSSA

Miellyttäviä, terveellisiä ja turvallisia sisäilmaoloja ylläpidetään taloteknisten järjestelmien avulla. Jotta sisäilmastosta saadaan vaatimuksia vastaava, on tunnettava olosuhteet ja kartoitettava tilassa syntyvät epäpuhtaudet sekä näiden lähteet. Epäpuhtauslähteitä ovat niin ulkoilmassa esiintyvät epäpuhtaudet, jotka tulevat sisään ilmanvaihdon ja mahdollisten ilmapuotojen kautta, sekä rakennukset itsessään ja tätä käyttävät ihmiset. Rakennuksissa sisäilmaoloihin vaikuttavia päästöjä tulee niin rakennuksen käytöstä, kuin pinta- ja sisustusmateriaaleista. Siivous, ruuanlaitto ja ihmiset aiheuttavat tilaan kosteus-, epäpuhtaus-, sekä lämpökuormaa (Sisäilmayhdistys Ry, perustietoa sisäilmasta, 2020).

Lämpö- ja kosteuskuormat ihminen havaitsee varsinkin suurina pitoisuuksina ja kuormamuutoksina, mutta useat epäpuhtaudet ovat vaikeasti tunnistettavissa. Esimerkiksi ruuanlaitosta aiheutuvat hajut ovat orgaanisia haihtuvia yhdisteitä (VOC), eli kaikki aistittavat yhdisteet eivät ole välttämättä haitallisia tai epämiellyttäviä. Ihminen voi astia ruuanlaittoa seuraavan hajun, mutta vapautuvia yhdisteitä on useita, ja lukuisia eri VOC-yhdisteitä havainnoivat mittarit ovat usein kalliita. Lisäksi yksittäisen orgaanisen yhdisteen pitoisuus on yleensä pieni, eikä välttämättä ole havaittavissa edes mittausanturin avulla. Rakennusmateriaaleista johtuvat yhdistepitoisuudet yleensä laskevat rakennuksen iän ja käytön myötä (Sandberg, 2016, 66).

Sisäilmassa esiintyviä orgaanisia ja epäorgaanisia yhdisteitä on useita kymmeniä, eikä kaikkien vaikutusta ihmisille vielä tiedetä, jonka vuoksi useille yhdisteille ei ole määritelty tarkkoja raja-arvoja (Pitkäranta, 2015, 70).

3.1 Lämpötila ja suhteellinen kosteus

Sisäilman suhteellinen ilmankosteus on riippuvainen ulkoilman kosteudesta, varsinkin jos tilan ilmastointi ei sisällä kostutusta. Sisäilman suhteellinen kosteus ja lämpötila vaikuttavat koettuun viihtyvyyteen tilassa. Ulkoilman kosteuden lisäksi

kosteuskuormaa tulee myös sisältä. Kosteutta kertyy niin tilan käyttäjistä kuin toiminnoistakin, kuten onko tilassa vesihanaa tai muuta vedenkäyttöä. (Sisäilmayhdistys Ry 2020, Perustietoa sisäilmasta).

Korkea ilmankosteus on haitaksi sisäilman laadulle, ja aistitaan epämiellyttävänä sekä trooppisen ilmanalan kaltaisena. Kosteus aiheuttaa enemmän haittaa päästessään tiivistymään pinnoille. Pinnoille tiivistyminen voi aiheuttaa kosteusvaurioita myös rakenteisiin ja mikrobipitoisuuden nousua (Kaila, 2010, 350). Liian kuiva ilma taas koetaan monesti limakalvoja ärsyttävänä ilman pienhiukkaspitoisuksiakin, ja korkeahko lämpötila voi tehostaa kuivan ilman tuntua (Pitkäranta, 2016, 61).

Huoneilman lämpötila on yksi tärkeimpiä mittareita olosuhdeviihtyisyydelle, sillä ihminen aistii ihon kautta lämpötilan muutoksia. Lämpötilojen kokemukset ovat kuitenkin hyvin yksilöllisiä, johon vaikuttaa kokijan ikä, sukupuoli, vaatetus jne. Korkea lämpötila yhdistetään helposti huonoon ilmanlaatuun, ja korkea huonelämpö voikin viestiä riittämättömästä ilmanvaihdosta.

Lämmin tuloilma ei pääse sekoittumaan konvektiovirtauksena jo lämpimään huoneilmaan, huoneilmaa viileämmän tuloilman tämän mahdollistaessa. Liian kylmä tuloilmavirta taas, tai ikkunasta tuleva viima ja kylmän ilman liike aiheuttaa vedon tunnetta, viileämmän ilman liikkeessä muutoin lämpimässä tilassa. Olosuhteet koetaan epämiellyttäväksi monesti myös liian alhaisissa huonetiloissa (Air0,2023). Lämpötiloja tutkittaessa on tärkeää huomioida myös mittaushetken ulkoilman olosuhteet.

3.2 Hiilidioksidipitoisuus

Hiilidioksidipitoisuudella voidaan arvioida ilmanvaihdon riittävyttä, sillä ilman vaihtuvuus on riippuvainen tilan käyttöasteesta. Vaikka sisäilman hiilidioksidipitoisuus riippuu hieman myös ulkoilmasta, suurimman rasitteen antavat tilan käyttäjät, sillä rauhallisesta istumisesta rauhalliseen liikkumiseen yksi henkilö voi tuottaa 15–24 litran hiilidioksidivirran tunnissa (Finvac, 2020). Ilmanvaihtovirratt ovat sopivat, mikäli hiilidioksidipitoisuus saadaan laimennettua puhtaalla vaihtoilmalla riittävän alhaiselle tasolle. Hiilidioksidia syntyy kaikessa palamisessa, esimerkiksi

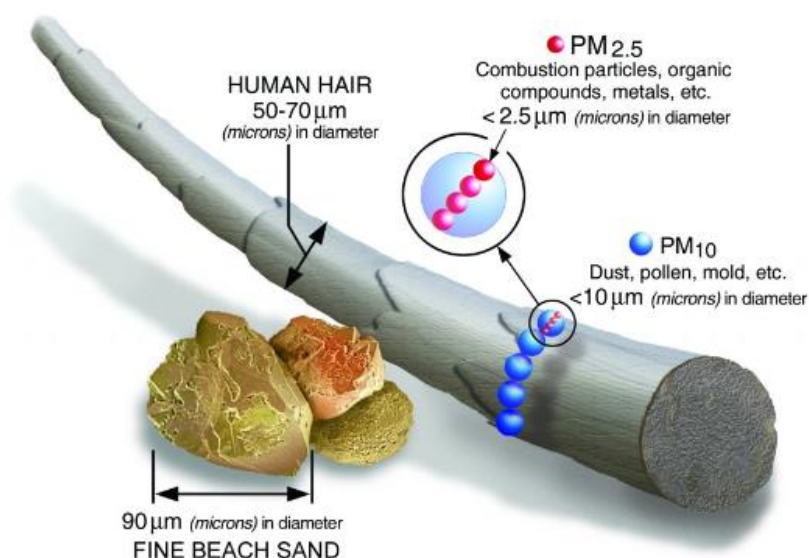
kynttilät ja kaasuliesi. Suurin päästölähde sisätiloissa on kuitenkin tilaa käyttävien henkilöiden aineenvaihdunta. Ihminen erittää epämiellyttäviä hajuja, jotka poistuvat kehosta hikoilun sekä uloshengityksen kautta (Sisäilmayhdistys Ry 2020, Perustietoa ilmanvaihdosta).

Hiilidioksidi (CO₂) koostuu hiilestä ja hapesta. Kaasumainen hiilidioksidi on hajuton, väritön ja myrkytön kaasu. Hiilidioksidi on kuitenkin hengitysilmaa raskaampaa, ja täten syrjäyttää ilman suuriksi pitoisuuksiksi kertyessään. Suuren hiilidioksidipitoisuuden voi aistia sisätiloissa ”huonona ilmaa”. Hiilidioksidi on mitattava epäpuhtaus, ja täten hiilidioksidia voidaan käyttää epäpuhtauksien indikaattorina. Korkea hiilidioksidipitoisuus viestii liian vähäisestä ilmanvaihdosta tilassa, ja voi suurina pitoisuuksina aiheuttaa päänsärkyä sekä väsymystä. Yleensä ulkoilman hiilidioksidipitoisuudeksi ilmoitetaan noin 400 ppm, kaupunkialueilla pitoisuus voi olla hieman korkeampi (Finvac, 2020). Sisäilmastoluokituksen S2-luokan mukaan tilan hiilidioksidipitoisuusrajaksi annetaan 950 ppm, joten ulkoilmasta johtuva hiilidioksidikuorma on erittäin vähäistä ja epäolennaista olettaen ettei raitisilmasäleikön välittömässä läheisyydessä ole merkittävää epäpuhtauslähdettä, esimerkiksi jäteilman ulospuhallusta. Hiilidioksidin lisäksi ihmisperäisen aineenvaihdunnan tuotteena erittyy muun muassa metaania sekä aldehydejä (Sandberg, 2016, 63).

3.3 Hiukkaset ja VOC-yhdisteet

Pienhiukkasista puhutaan yleensä kahdessa kokoluokassa, PM_{2,5} sekä PM₁₀. Luku viittaa hiukkasten massapitoisuuteen alle 2,5 µm ja alle 10 µm kokoisista hiukkasista (EPA, 18.7.2022). Pölyt ja kuidut kuuluvat karkeampaan, PM₁₀ luokkaan. Karkeampaa pölyä esiintyy eritoten rakennusvaiheessa, jossa pölyä aiheutuu kipsi-, betoni- ja sementtimateriaalien työstöstä, joten erityisesti Työterveyslaitos määrittelee rakennustyömaiden pölyisyydelle raja-arvoja (Pitkäranta 2016). Kuvassa 1. esimerkki pienhiukkasten kokoluokasta.

Pienempien hiukkasten luokassa puhutaan pienhiukkasista, joihin lukeutuu liikenteen hiukkaset ja puun poltosta paikallisesti aiheutuvat pienhiukkaset (Air0, 2023).



KUVA 1. Kuva havainnollistaa pienhiukkasten kokoluokkaa (EPA, 2022).

Orgaaniset haihtuvat yhdisteet ovat muun muassa rakennus- ja sisustusmateriaalien kautta osa elämää liiki kaikkialla. Yhdisteitä luovuttaa sisäilmaan myös siivous- ja kosmetiikka-aineet. Käytön alussa yhdistepitoisuudet voivat olla korkeammat, esimerkiksi siivotessa ja taloa rakennettaessa. Kun taloon muutetaan ja käytetään normaalin elämän mukaisesti, VOC-yhdisteet yleensä rakennusmateriaaleista vähenevät käytön myötä (Sisäilmayhdistys 2008).

Yhdistepitoisuuksia voidaan tarkastella ilmasta, mutta näiden pitoisuuksien tulkinta on vaikeampaa verrattuna hiilidioksidiin. Haihtuvia orgaanisia yhdisteitä on useita, eikä kaikkien terveydellisiä vaikutuksia tunneta. Mikäli VOC-pitoisuuksien mittaaminen ei ole osa sisäilmateknisiä mittauksia, vaan pyritään löytämään nimenomaisesti jokin yhdiste, on tarkempia mittausten ohjeita varten syytä ottaa yhteyttä aiheesta tutkivaan laboratorioon. Muun muassa ongelmaepäilyt sekä rakenteista tehtävät havainnot vaikuttavat VOC-mittausten tarpeellisuuteen.

Myös VOC-tulosten tulkinta on monimutkaisempaa kuin hiilidioksidin, sillä aurinon säteilylämpö voi vaikuttaa haihtuvien orgaanisten yhdisteiden esiintymiseen pinoilla ja ilmassa. Lisäksi myös kosteus voi vaikuttaa pitoisuuksiin (Pitkäranta 2016, 69).

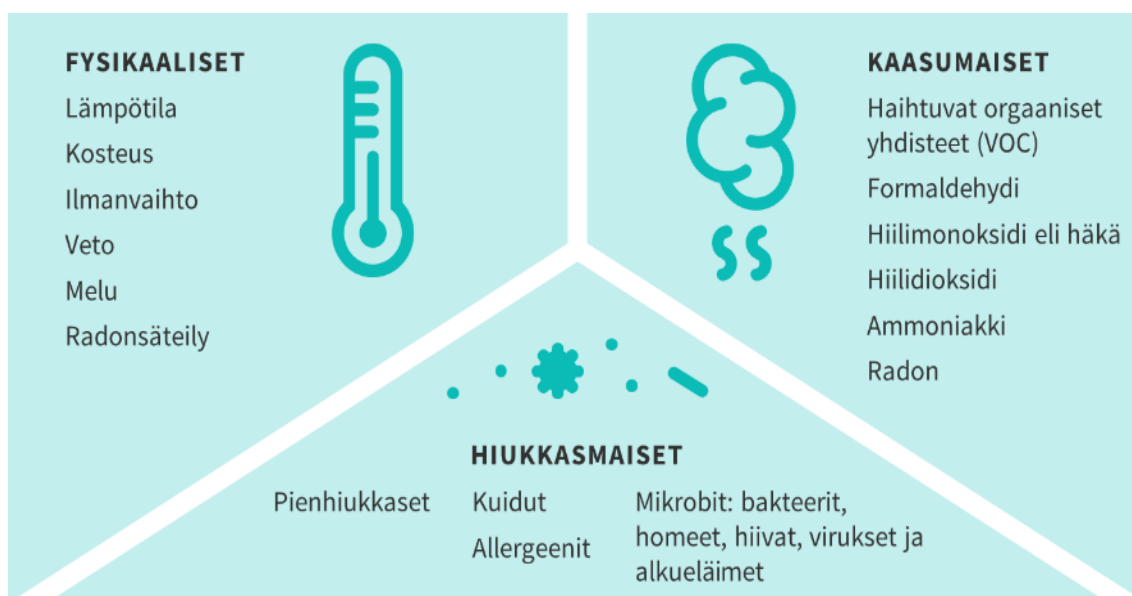
3.4 Epäpuhtauksien alkuperät

Sisäilman laatu koetaan eri tavalla riippuen kokijasta. Myös tekijöitä on useita. Taulukossa 2. esitellään työssä käsiteltäviä yleisimpiä ilmanlaatuun vaikuttavia tekijöitä.

TAULUKKO 2. Sisäilman laatua heikentäviä tekijöitä, näiden yleisimpiä syitä ja oireita.

Epäpuhtaus	Yleinen lähde	Oire
Hiilidioksidi	Ihmiset, aineenvaihdunta, riittämätön ilmanvaihto	Päänsärky ja väsymys korkeissa pitoisuuksissa
Aldehydi	Rakennusmateriaalit, desinfiointiaineet, kosmetiikka	Limakalvojen ärsytys, silmä- ja hengitystieoireet
Formaldehydi	Rakennusmateriaalit	Limakalvojen ärsytys, silmä- ja hengitystieoireet
Virukset ja bakteerit	Ihmiset, eläimet	Mahdollinen tautitartunta, limakalvojen ärsytysoireet
Home	Ulkoilman sieni-itiöt	Limakalvojen ärsytysoireet, allergiaoireet
Radon	Maaperä	Keuhkosityöpäriskin kasvu
Allergeenit	Eläimet, pöly, siitepöly	Silmä- ja hengitystieoireet, limakalvoärsytys, iho-oireet

Aldehydit ovat kemiallisia, reaktiivisia yhdisteitä, joista monet ovat pistävän hajuisia jo pieninä pitoisuuksina ja useimmiten ärsyttävät silmiä ja kehon limakalvoja. Aldehydejä esiintyy useissa rakennusmateriaaleissa, desinfiointiaineissa, kosmetiikassa ja tekstiileissä. Myös palamiskaasut sisältävät aldehydejä. Yleisimpiä sisäilman aldehydejä ovat formaldehydi, propanaali, butanaali, oktanaali. (Työterveyslaitos. N.d. Formaldehydin ja aldehydien analyysi ilmasta). Kuvassa 2. lueteltuna muutamia yleisimpiä sisäilman laatuun vaikuttavia tekijöitä.



KUVA 2. Sisäilman laatuun vaikuttavat erilaiset fysikaaliset, hiukkasmaiset ja kaasumaiset tekijät (THL, 2022).

Formaldehydi on useasti teollisuudessa käytetty kemikaali, ja aiheuttaa pieninäkin pitoisuuksina silmä- ja hengitystieärsytystä. Kemikaalia käytetään liima- ja pintakäsittelyaineiden valmistuksessa, ja sitä esiintyy erilaisissa lastulevyissä, laminaateissa, erilaisissa päällysteissä ja tekstiileissä (Sisäilmayhdistys Ry, 2008).

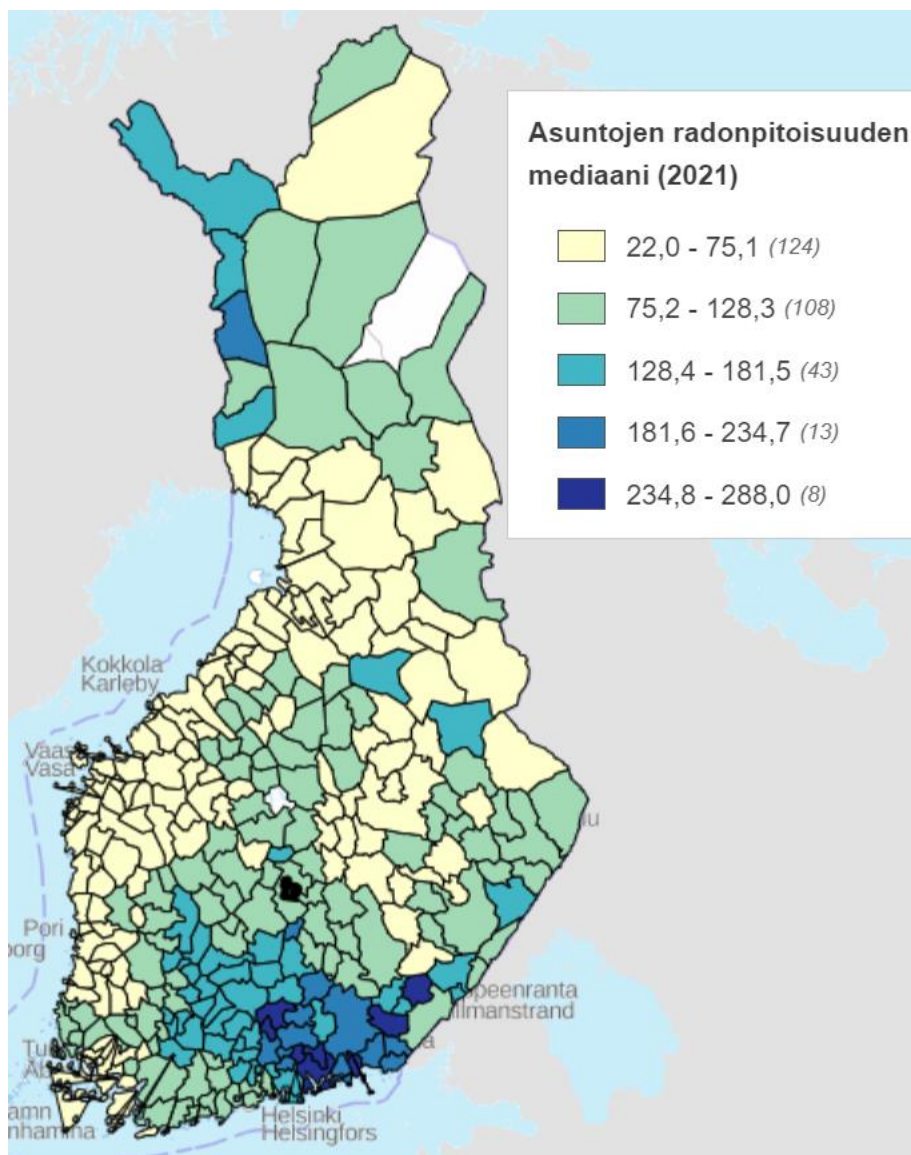
Yksittäisten bakteerien vaarallisuus riippuu potentiaalisesta taudinaiheuttamiskyvystä, joten bakteeripitoisuus ei välttämättä suoraan kuvaa terveydellistä haittaa. Eri bakteerilajien pitoisuuksille on vaikea asettaa raja-arvoja, kuitenkin eräänä ilmahygienian mittana voidaan pitää huoneilman kokonaisbakteeripitoisuutta (Sandberg, 2016, 68).

Yleensä poikkeuksena tavataan bakteereja jotka olisivat lähtöisin rakennuksesta, sillä yleensä lähteenä toimii elävä lähde. Huonetilassa voi olla myös ihmisperäisiä viruksia. Virukset eivät kuitenkaan pysty elämään huoneilmassa pitkiä aikoja. Lopulta virusperäisten tautien leviämisestä, ja ilmanvaihdon vaikutuksesta leviämiseen tiedetään vähän, vaikka riittävä ilmanvaihto laimentaa tartunnan aiheuttajien pitoisuutta (Terveyskirjasto, 2022). Useissa tutkimuksissa on todettu bakteerien ja virusten levittämien tautien runsas esiintyminen sekä alhaisen ilmanvaihdon yhteys. Lisäksi on todettu, että mitä useampi henkilö huoneessa työskentelee, sitä yleisempiä ovat vilustumissairauksien aiheuttamat poissaolot (Hagner, 2019, 61).

Kun ihminen toimii bakteerien lähteenä sisätiloissa, sienikasvustot ovat peräisin pääosin ulkoilmasta. Muun muassa kasvit ja lemmikit ovat myös perinteisiä mikrobien kantajia, jotka voivat aiheuttaa pääasiassa allergisia oireita ihmisestä riippuen. Sulan maan aikaan, eli noin huhtikuusta lokakuuhun, mikrobeja kulkeutuu ulkoilmasta sisälle rakennuksiin. Yleensä rakennuksen kosteusvauriot nostavat mikrobipitoisuuksia, sillä kosteus on tärkein mikrobien kasvua säätelevä tekijä. Kasvaakseen homeitiöt tarvitsevat vettä, lämpöä ja ravinteita. Itiöitä leijailee ilmassa lähes aina, ja mikäli itiön laskeutumisalusta sallii homeelle suotuisat olosuhteet, homekasvusto aloittaa kehittymisen (Kaila, 2010, 350–351). Home kiinnittyy ja voi aloittaa kasvuston helpommin huokoisilla alustoilla (paperi, puu yms.). Kasvuston syntyyn vaikuttaa eniten pitkäkestoiset olosuhteet, jolloin esimerkiksi likaantunut ja kostea ilmanvaihtokanavakin on homekasvustolle sopiva alusta (Aalto, 2021, 9).

Kun ilman mikrobimäärä kasvaa, voi itiöiden aiheuttamia oireita ilmetä. Oireet ovat yleensä laaja-alaisia, eikä eri henkilöillä oireilu ilmene välttämättä samankaltaisena. Yleisimpiä oireita ovat muun muassa silmien ärsytys, nenä- ja kurkkui-reet kuten yskä, allergista nuhaa ja iho-oireita. Home voi aiheuttaa kuumetta ja päänsärkyä, sekä väsymystä ja pahoinvointia. Lisäksi homeenhaju piintyy herkästi asuntoon sekä vaatteisiin, vaikkei varsinaisia terveyshaittoja ilmenisikään (Kaila, 2010, 350–351).

Radium on muun muassa Suomen maaperässä, erityisesti graniitissa ja moreenissa esiintyvä radioaktiivinen maa-alkaliaineisiin lukeutuva alkuaine. Hajotesaan radium synnyttää jalokaasu radonia. Radioaktiivinen radon voi kulkeutua huoneilmaan maaperästä ilmanvaihdon, porakaivoveden, rakennusmateriaaleiden tai kiviainesten mukana. Erityisesti läpäisevälle maaperälle (esim. hiekka- ja sorapitoiset harjut) rakennetuissa rakennuksissa on löydetty korkeita radonpitoisuuksia. Korkea radonpitoisuus aiheuttaa kohonnutta keuhkosityöpäriskiä. Radonia voidaan ehkäistä huolehtimalla riittävän tiiviistä ja tuuletetusta alapohjasta (Sisäilmayhdistys ry, 2020). Kuvassa 3. esitetään Suomen kartassa radonpitoisuuden mediaani.



KUVA 3. Radonpitoisuudet esitettynä Suomen kartalla (STUK, 2023).

Allergia-oireet voivat johtua niin ulkopuolelta tulevista kuin sisäpuolen tekijöistäkin. Ihmisen vasta-ainejärjestelmä reagoi ärsyttäviin ja haitallisiin aineisiin, ja jollain kyseinen puolustusmekanismi voi toimia liioittelevasti. Allergeenejä ovat esimerkiksi pölypunkit, siitepöly ja valkuaisaineita sisältävät pölyt, kuten eläinperäiset hiukkaset. (Sandberg, 2016, 66)

Yleensä allergia ilmenee silmä-, iho- ja hengitystieoireina. (Sisäilmayhdistys ry, 2020, Terveysvaikutukset)

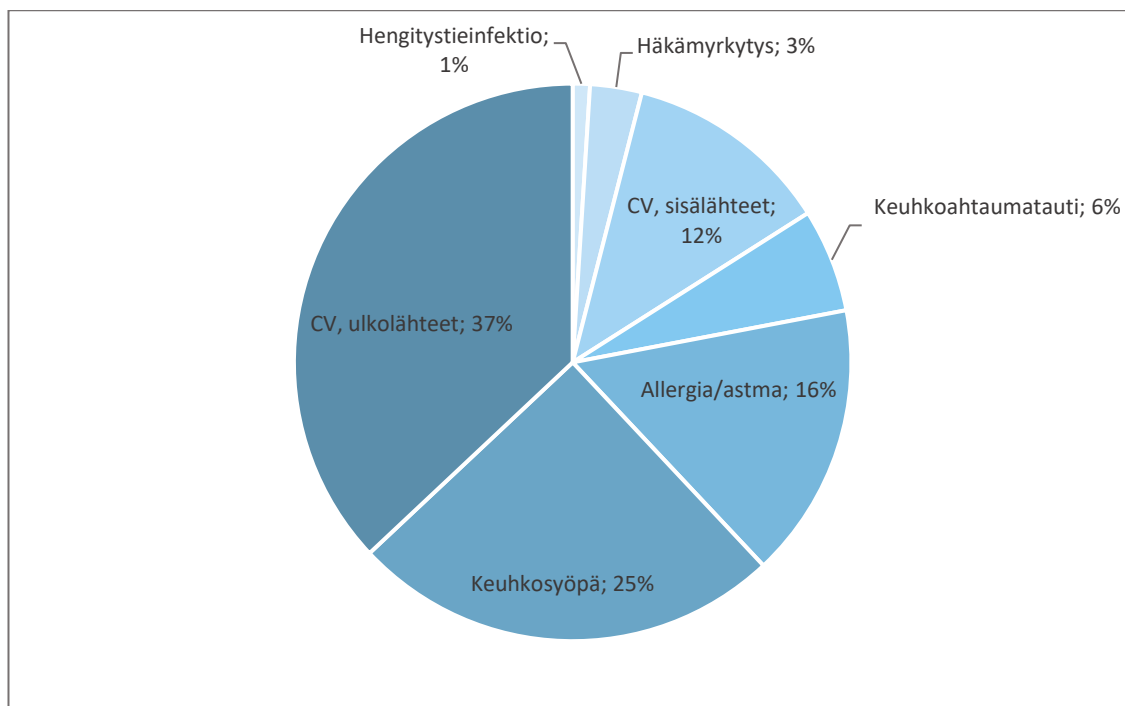
3.5 Ilmanlaadun vaikutus ihmiseen

Harvardin kansanterveyttä tutkiva oppilaitos Amerikassa suoritti tutkimuksen ilmanlaadun vaikutuksesta toimistotyöntekijöiden työskentelytehoon (eng. Associations between acute exposures to PM2.5 and carbon dioxide indoors and cognitive function in office workers: a multicountry longitudinal prospective observational study). Harvardin johtamassa tutkimuksessa todettiin, että työympäristön sisäilman laadulla voi olla merkittäviä vaikutuksia työntekijöiden kognitiivisiin kykyihin, esimerkiksi keskittymiskykyyn ja palautumisaikaan. Ilmanlaatu voi vaikuttaa myös työntekijän tuottavuuteen (Harvard T.H. Chan, 9.9.2021).

Tutkimushanke kesti vuoden, ja hankkeeseen osallistui vapaaehtoisia toimistotyöntekijöitä kuudesta eri maasta, vaihtelevilta aloilta. Tutkimuksessa havaittiin, että epäpuhtauksien lisääntyessä tilassa, ja sitä vastoin ilmanvaihtovirran nopeuden laskiessa, huonontunut ilmanlaatu vaikuttaa työntekijöiden reagointiaikaan sekä heikentyneeseen tarkkuuteen kognitiivisissa testeissä. Ilmanvaihtovirran sekä epäpuhtauksien suhdetta tilassa todettiin hiilidioksidipitoisuuden mittauksella.

Tutkimuksen johtajan, Jose Laurentin, mukaan tutkimus osoittaa hälyttäviä merkkejä siitä, kuinka ilman saasteet vaikuttavat aivoihimme. Tulokset osoittavat, että pienhiukkastason nousu liittyy kognitiivisten toimintojen akuuttiin heikkenemiseen (Harvard T.H. Chan, 9.9.2021).

Tänä päivänä ihminen viettää noin 90 % ajastaan sisätiloissa. (Sisäilmayhdistys Ry, 2008). Ilman mukana liikkuvat epäpuhtaudet aiheuttavat merkittäviä terveyshaittoja ihmiselle. Pienhiukkasille altistuminen on yksi merkittävimmistä vakavien tautien aiheuttajista (THL, 2019). Kaaviossa 1. esitetään huonosta sisäilmasta aiheutuneita sairauksia, sekä näiden osuutta tautitaakassa.



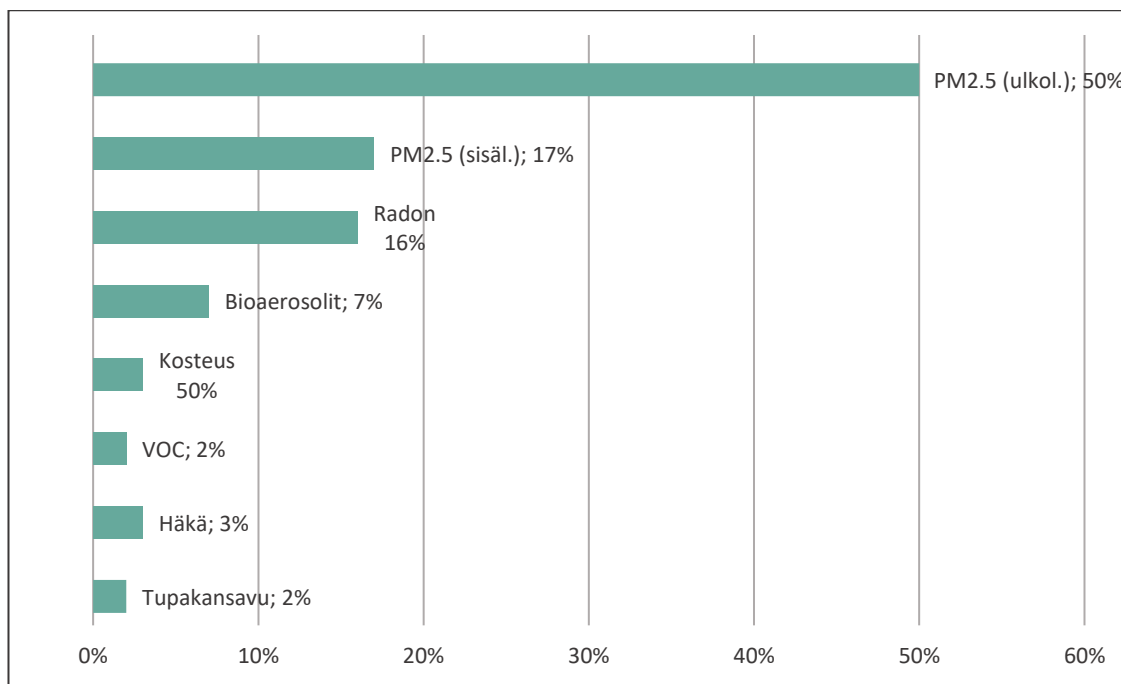
Kaavio 1. Sisäilma-altisteisiin liittyvä tautitaakka sairauksittain Suomessa 2010. CV: Sydän- ja verenkiertoelinten sairaudet (Sanberg, 2016, 56).

Kuten kaaviosta 1. nähdään, vakavista ja jopa hengenvaarallisista taudeista muodostuu noin kolme neljäsosaa. Merkittävimpiä ovat sydän- ja verenkiertoelinten sairaudet (CV) sekä keuhkosityöpä, seuraavaksi tulevat astmat, allergiat sekä keuhkohtaumatauti.

Kaksi kolmasosaa terveyshaitoista aiheutuu pienhiukkasille altistumisesta. Suomessa paljon esillä olleet bioaerosolit ja kosteushaitat näkyvät kaaviossa 1. vain 10 % osuudella, kun taas radonilla on suuri vaikutus.

Tällä tarkastelutavalla tupakansavun, VOC-yhdisteiden sekä hiilimonoksidin (häkä) merkitykset jäävät pieneksi. Vakavien tautien lisäksi sisäilma-altisteet aiheuttavat yleisoireita, ärsytys- sekä viihtyvyyshaittoja. Mikäli oireet ilmaantuvat taikka vahvistuvat rakennukseen saavuttaessa, ja laimenevat nopeasti rakennuksesta poistuttaessa, on hyvin suuri todennäköisyys, että kyseisessä rakennuksessa on sisäilmahaittoja aiheuttavia tekijöitä (Sanberg, 2016, 56).

Ulkolähteiden osuus vakaviin terveyshaittoihin on yli puolet, kuten kaaviosta 2 nähdään.



Kaavio 2. Sisäilma-altisteisiin liittyvä tautitaakka altisteittain Suomessa vuonna 2010 (Sandberg, 2016, 57).

Sisäilman epäpuhtaudet liikkuvat huoneen sisäisten ilmavirtojen mukana. Kosketuksen ja ilman mukana leviävät bakteerit ja virukset aiheuttavat terveyshaittoja, ja esimerkiksi influenssaepidemioita. Kuitenkin kosketukseen verrattuna ilman osuus on pienempi niillä taudeilla jotka leviävät ilmaitse, joten ilmanvaihtoa lisäämällä ei voida poistaa ongelmaa kokonaan. Pintahygieniasta huolehtiminen on edelleen tärkeää (Sisäilmayhdistys Ry, Epäpuhtaudet, 2022). Bakteerit ja virukset, jotka ovat kiinnittyneet ilman mukana liikkuviin aerosoleihin, ovat monien hengitysteitse tarttuvien tautien leviämisyälä (Saari, S. & Kakko, L. 2021).

Infektoriskiin vaikuttaa tautia aiheuttavien mikrobien määrä ilmassa. Riittävä ilmanvaihto laskee niin hiilidioksiditasoja kuin mikrobipitoisuutta. Taudeille altistuminen ei välttämättä johda tartuntaan, joten ihmisperäisten aerosolien välttelyä realistisempaa on pyrkiä välttämään infektiota. Yksilöllinen vastustuskyky riippuu esimerkiksi henkilön iästä, fyysisestä kunnosta ja onko henkilöllä kroonisia tautia. Myös perinnölliset tekijät vaikuttavat. Taudinaiheuttajista johtuvan infektoriskin riittävä madaltaminen on absoluuttista suojautumista käytännöllisempää. Mikrobien aiheuttamat tartunnat vaihtelevat taudista riippuen, myös infektion aiheuttama mikrobimäärä on tautikohtainen (Terveyskirjasto, 2022). Tartuntariskin madaltamiseksi kehitettiin pohjoismaisena yhteistyönä mitoitushje ilmanvaihtoa

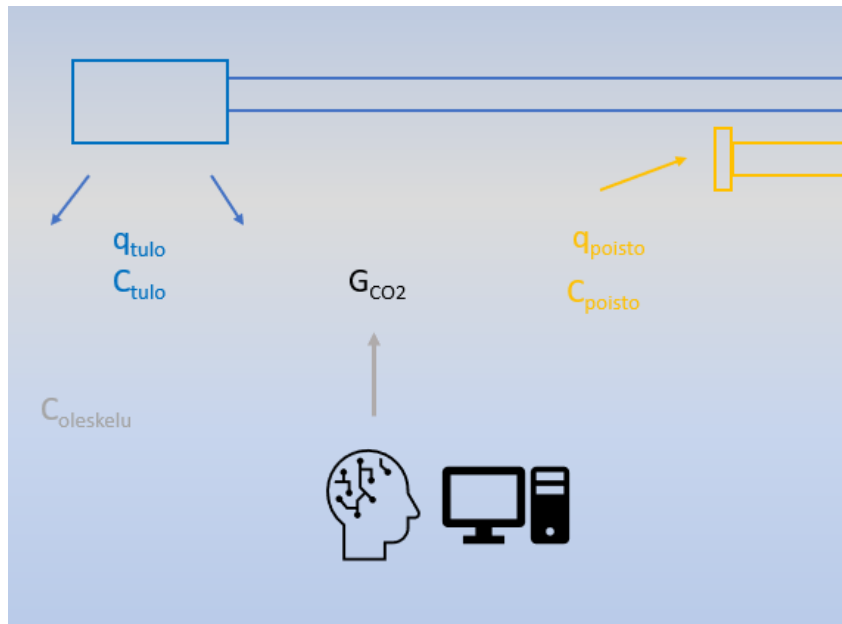
suunniteltaessa. Ohje julkaistiin 2022 lopussa, ja vertailtaessa Sisäilmastoluokituksen ohjearvoja luokkahuoneisiin ja toimistotiloihin, luokkien S1 ja S2 ovat melko lähellä infektoriskin mukaan laadittua ohjetta. Yli 55 m² luokkahuoneeseen suositeltu ilmanvaihtokerroin olisi 4,9 1/h, ja hiilidioksiditasoksi 962 ppm (Scanvac, 9.1.2023).

On myös tärkeä huomioida epäpuhtauksien lähteet. Joskin, rakennus on ihmisiä varten joten kyseisen epäpuhtauslähteen poistaminen tilasta ei tule kysymykseen, vaan ilmanvaihdolla on merkittävä osuus henkilölähteisten epäpuhtauskuormien poistamisessa ja laimentamisessa. Tupakoinnista, home- ja kosteusvaurioista, rakennusmateriaaleista aiheutuvia haittoja on alettu jo vähentämään lähteisiin puuttamalla (Sanberg, 2016, 57).

3.6 Epäpuhtauskuorman vaikutus ilmanvaihdon mitoitukseen

Konvektiovirtaukset johtuvat sisätiloissa huoneen sisältämästä lämpökuormasta, joita ovat esimerkiksi ihmiset, lämpöpatterit ja elektroniset laitteet (Sandberg, 2016, 390). Vaikka huoneilma tuntuu alttiilta eri vaikutteille, ei näitä voi täysin ehkäistä, eikä ole tarvetta. Virtaukset sekoittavat epäpuhtaudet tasaisemmin huoneilmaan, eikä yhden epäpuhtauslähteen lähetyvillä välttämättä ole tilan epäpuhtain ilma (Aalto, 2021, 70). Huoneilman sekoitustavasta riippuen, tilaan puhallettava tuloilma vaikuttaa huoneen sisäisiin virtauksiin aina. Vaikutuksen laajuus riippuu päätelaitteesta, puhalluskulmasta ja -tavasta sekä lämpötilasta (Aalto, 2021, 7).

Huonetilan tuloilmantarve q_{tulo} on mahdollista laskea määrittämällä tilan epäpuhtauskuorma. Mikäli tilan ilmanvaihto on tasapainossa, ei ole syytä huomioida huonetilavuutta. Kaavan 1 esimerkissä epäpuhtausindikaattorina käytetään hiilidioksidipitoisuutta. Indikaattorina voi toimia myös tilan TVOC-pitoisuus. Kuvassa 4. havainnoidaan kaavan 1 ja 1.1 tekijöitä. Kuvan ulkopuoliseksi tekijäksi voidaan lisätä ulkoilman pitoisuus, $C_{ulko} = 400$ ppm (Sisäilmayhdistys, 2020).



KUVA 4. Huonetilan hiilidioksiditaseesta on mahdollista määrittää tuloilmavirran tarve ©Pia Huhtala

Tasapainoisessa ilmanvaihdossa tulo- ja poistoilmavirrat ovat yhtä suuret, jolloin tulo- ja poistoilman pitoisuuksia $C_{poisto/tulo}$ voidaan hyödyntää, sillä pitoisuus on sama tilavuudesta riippumatta. Tällöin kaavassa esitetään tilan käyttäjästä lähtöisin oleva epäpuhtauskuorma G_{CO_2} hiilidioksidin muodossa (esimerkiksi cm^3/s),

$$q_{tulo} = \frac{G_{CO_2}}{C_{poisto} - C_{tulo}} \quad (1)$$

Kaavaa on mahdollista hyödyntää myös oleskeluvyöhykkeen pitoisuustavoitteen avulla, kun tavoite on tiedossa. Laskussa huomioidaan tilan tavoitearvot $C_{oleskelu}$, ja ulkoilman pitoisuus C_{ulko} (cm^3/m^3) olettaen pitoisuuden olevan 400 ppm.

$$q_{tulo} = \frac{G_{CO_2}}{C_{oleskelu} - C_{ulko}} \quad (1.1)$$

Tasapainotilanteessa ilmavirtojen ollessa yhtä suuret ja ilmanjaon ollessa täysin sekoittava, myös poistoilman epäpuhtauspitoisuuden voidaan olettaa olevan sama kuin huoneen oleskelutilan pitoisuus (Sandberg, 2016, 101).

Myös Finvacin oppaassa ilmanvaihdon mitoittamiseen muissa kuin asuinrakennuksissa on hiilidioksidin tuottoon perustuva ilmanvaihdon mitoitus. Annetun kaavan

avulla voidaan tutkia ilmanvaihdon riittävyyttä hiilidioksidipitoisuuden perusteella. Lasku huomioi tilaan virtaavan ulkoilmavirran q_{iv} (l/s), henkilöiden määrän sekä henkilön toimintaan perustuvan aineenvaihdunnan tehon ja hiilidioksidituoton q_{co2} (l/h). Lopputuloksena saadaan hiilidioksidipitoisuuden nousu yli ulkoilmapitoisuuden ΔC_{co2} (ppm).

$$\Delta C_{co2} = \frac{1000 \cdot \left(\frac{q_{co2}}{q_{iv}}\right)}{3,6} \quad (2)$$

Kun lopputulos kuvaa pitoisuuden nousua ulkoilmapitoisuuden yli, tilan lopullinen pitoisuus saadaan lisäämällä lopputulokseen 400 ppm. Kaava sisältää myös yksikkömuuntimia (Finvac, 2020).

Hiilidioksidin lisäksi voidaan epäpuhtauskuormana käyttää jotain tiettyä ainepitoisuutta, kuten kemianteollisuuden työpaikoilla esiintyviä ainepitoisuuksia. Useiden tämänkaltaisten aineiden pitoisuudet ovat vähäisemmät kuin hiilidioksidiin. Tällöin kaava on sama lähes kuin kaava 1, mutta G kuvaa pitoisuutta esimerkiksi muodossa mg/m^3 (tällöin epäpuhtausvirta muodossa mg/s), ja jakajana toimii oleskelutilan tavoitearvo oleskeluvyöhykkeellä $C_{oleskelu}$ (cm^3/m^3) kyseiselle ainepitoisuudelle (Sandberg, 2016, 101).

$$q_{tulo} = \frac{G}{C_{oleskelu}} \quad (3)$$

Asuinrakennuksille ilmanvaihto on riittävää, kun tilan ilmanvaihto kerroin on vähintään 0,5 1/h, eli puolet tilan ilmasta vaihtuu tunnin kuluessa 2,5 metriä korkeassa tilassa. Ilmanvaihtokerroin saadaan, kun tilaan tunnissa tuleva ilmavirta jaetaan huoneen tilavuudella.

$$\text{Ilmanvaihtokerroin} = \frac{\text{Ilmavirta} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)}{\text{Tilavuus} (\text{m}^3)} \quad (4)$$

(Sisäilmayhdistys Ry, 6.5.2020)

Ilmanvaihtoa suunniteltaessa on huolehdittava, että vähimmäismäärä ulkoilma-
virralle täyttyy, joka on $0,35 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{m}^2$. Ohje vastaa ilmanvaihtokerrointa 0,5 (Ym-
päristöministeriö).

3.7 Haitalliseksi tunnettuja pitoisuuksia ja M-luokitus

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus (654/2020) määrittelee HTP-arvoja, jotka
työnantajan on otettava huomioon. Haitalliseksi tunnetut pitoisuudet ovat työpai-
kan epäpuhtauspitoisuuksille asetettuja arvoja. Täysin turvallisia altistumisrajoja
ei voida määrittää, mutta tämänhetkisen tiedon mukaan altistuksista ei aiheudu
vaaraa, mikäli pääosin pysytään säädettyjen arvojen alapuolella. Taulukossa 3.
esitellään muutamia tähän opinnäytetyöhön liittyviä yleisimpiä HTP-arvoja. (HTP-
ARVOT 2020: Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet, 2020)

TAULUKKO 3. HTP-tavoitearvoja eri altistumisajoilla. Kemikaalit voivat esiintyä
HTP-tilauksessa eri nimellä.

Aine	HTP			
	8 h		15 min	
	ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³
Ammoniakki	20	14	50	36
Butanaali	25	75		
Formaldehydi	0,3	0,37	0,6	0,74
Hiilidioksidi	5000	9100		
Hiilimonoksidi	20	23	75	87
Propanaali	20	48		
Oktanaali			10	42

Aineiden vaihtelevat nimet johtuvat kemikaalien nimikkeistä HTP-luettelossa, sillä
kyseiseen dokumenttiin on kerätty myös muiden maiden epäpuhtauksien raja-
arvoluetteloissa käytettyjä nimikkeitä. Kaikille aineille ei ole määritetty tarkkoja
arvoja altistumisajalle, sillä vaikutusten arviointi on vaikeaa vähäisten esiintymis-
pitoisuuksien vuoksi (HTP-ARVOT 2020: Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet, 2020).

Rakennusmateriaalien päästöjä pyritään rajaamaan M-luokituksella. Luokitus edistää vähäpäästöisten rakennus- ja sisustusmateriaalien, ilmanvaihtotuotteiden sekä kalusteiden käyttöä ja kehitystä. M1- merkki kertoo ensimmäisen luokan ympäristömerkistä. Luokitus antaa raja-arvot haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästöille. Näitä päästöjä ovat esimerkiksi ammoniakki ja formaldehydi. Kyseinen luokitusmerkki tuotteessa kertoo tuotteen olevan vähäpäästöinen, eikä luovuta häiritsevää hajua M1-luokituksen mukaisesti (Rakennustieto, n.d, M1-luokitus).

Tavoitteena on käyttää vähäpäästöisiä tuotteita, jottei tuotteiden käyttö lisää tarvetta ilmanvaihtomäärien suurentamiselle. Päästöluokat on jaettu kolmeen luokkaan, M1, M2 ja M3. Luokista M1 on paras, ja luokkaan M3 kuuluvat kaikki muut, jotka eivät täytä luokan M2 vaatimuksia. *Sisäilmastoluokituksessa 2018* kerrotaan rakennusmateriaaleille vaatimukset M1- ja M2-luokissa [$\text{mg}/\text{m}^2\text{h}$]. Formaldehydin sallittu emissio on luokassa M1 $< 0,05$ ja luokassa M2 $< 0,125$. Ammoniakille sallittu emissio luokassa M1 on $< 0,03$ ja luokassa M2 sallittu määrä on $< 0,06$ (Sisäilmastoluokitus 2018). Raja-arvot kootaan taulukkoon 4.

TAULUKKO 4. Hiukkasten ja VOC-yhdisteiden tavoitearvoja

Aine	Raja-arvo
Pienhiukkaset (PM _{2,5})	S1 ja S2: $< 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ S3: $< 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$
VOC-yhdisteet	Yksittäinen yhdiste $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (TVOC $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
Formaldehydi	M1: $< 0,05 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$ M2: $< 0,125 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$
Ammoniakki	M1: $< 0,03 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$ M2: $< 0,06 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$

4 MITTAUKSEEN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

Niin ilmanlaadun tutkimukset kuin sisäilmateknisen selvityksen tekeminen vaatii erikoisosaamista, jotta tutkija tunnistaa mahdolliset tuloksiin vaikuttavat vauriot sekä sisäilmaa heikentävät ja siihen vaikuttavat tekijät. Rakennuksen painesuhteiden, vuotoilmareittien ja ilmanvaihtojärjestelmien ymmärtämiseksi tutkijan tulee tietää myös perusteet epäpuhtauksien liikkumiselle sekä näiden merkitys sisäilman laatuun (Pitkäranta, 2016, 12).

4.1 Ajankohdan vaikutus

Jotta tilan epäpuhtauksista saadaan todenmukainen altistumistilanne, on sisäilman mittaus suoritettava tilanteessa, joka vastaa tilan normaalia käyttöä. Kuten kappaleessa 3.6 (Epäpuhtauskuorman vaikutus ilmanvaihdon mitoitukseen) kerrottiin tilan sisäisistä virtauksista, tilassa tapahtuva liike vaikuttaa laskeutuneen pölyn sekoittumiseen sekä nostaa yleensä epäpuhtauspitoisuutta hiukkasten liikkeessä.

Sisäilman epäpuhtauksia tutkittaessa on otettava huomioon rakennuksen käyttöaikataulu, sekä ilmanvaihtojärjestelmän toiminta. Keskittykö käyttö arkipäiville ja tietyille ajankohdille enemmän kuin toisille. Epäpuhtauspitoisuuden tutkinta tulisi suorittaa tavanomaisessa käyttötilanteessa. Erilainen käyttö vaikuttaa epäpuhtauksien pitoisuuksiin, riippuen esimerkiksi kohteesta, viikonpäivistä sekä vuodenaajoista.

Sulan maan aikana, eli yleensä luonnon kasvukaudella ilmassa on enemmän mikrobeita kuin talviaikaan (Kaila, 2010, 350). Runsas mikrobipitoisuus ulkoilmassa ei välttämättä anna todenmukaista kuvaa sisäilman mikrobipitoisuutta tutkiessa. Keväällä, kesällä ja syksyllä suoritettujen epäpuhtaututkimusten tulosten esittelyssä on huomioitava ulkoilman mahdollinen vaikutus.

Useasti myös VOC-mittaukset antavat talviaikaan matalampia pitoisuustuloksia, sillä useat materiaalit reagoivat ilmankosteuden sekä lämpötilan mukaan (Pitkäranta, 2016, 35). Haihtuvia orgaanisia yhdisteitä luovuttavat muun muassa kalusteet, pinnoitteet, sisustus- ja tekstiilimateriaalit (Sisäilmayhdistys Ry, 2008).

Jotta mittaus voidaan suorittaa normaalikäyttöä vastaavassa tilanteessa, on mittauksaikaan ja mittauksen keston syytä kiinnittää huomiota. Edelleen vuodenaika vaikuttaa mittauksen keston, sillä säävaihtelut vaikuttavat rakennuksen lämpö- ja kosteustekniseen käyttäytymiseen sekä reagointiaikaan. Yleensä suositaan riittävän pitkiä mittausjaksoja, jotta tuloksia voidaan käsitellä ja analysoida luotettavasti, eikä vuodenajasta aiheudu tarpeettomia pitoisuuspiikkejä. Massiivisissa, ja usein kiviperäisissä rakenteissa, esimerkiksi tiili ja betoni, kosteuteen reagointi on hidasta jolloin suositaan pitempiä mittausjaksoja. Kevyemmissä rakenteissa, kuten puiset rankorakenteet, kosteuteen reagointi on huomattavasti nopeampaa, jolloin mittausjaksoa voidaan pitää lyhyempänä.

Mittausjakson pituuteen on huomioitava mahdollinen tapahtunut kosteusvaurio, sillä painesuhteet ja ilmanvirtaus vaikuttavat myös kosteuden siirtymiseen, ja kosteus puolestaan vaikuttaa nopeastikin lämpötiloihin sekä rakenteen kosteusmuutoksiin. On muistettava ettei mittausjaksoa pidentämällä välttämättä voida kompensoida mittaustuloksia vastaamaan optimaalisinta vuodenaikaa (Pitkäranta, 2016).

Seurantamittausjakson hyvä vähimmäispituus on noin viikon, jolloin seurantadataa saadaan koko ajalta, riippumatta tilan vuorokausikäytöstä. Tarvittaessa mittausjaksoa voidaan pidentää. Myös mikäli tutkittava syy on selkeästi kartoitettu, myös lyhyempi mittausjakso voi riittää. Hetkellisiä ja lyhyempiä mittausjaksoja tutkittaessa tulosten luotettavuus arvioidaan tapauskohtaisessa tarkastelussa.

Käytännössä koneellisen ilmanvaihdon aiheuttama paine-ero rakenteisiin on vuodenaikasta riippumaton, mutta voi vaihdella suurestikin vuorokauden sisällä. Tilan käytöstä aiheutuvat rakenteiden yli ulottuvat paine-erot voivat vaihdella useita kymmeniä Pascaleita. Tämän vuoksi on tärkeää, että mittausajanjakso sisältää mittaustuloksia ainakin parin arkipäivän sekä tavanomaisen käytön ajalta.

Riittävä mittausajanjakso myös tasaa pitoisuuksien vaihteluja.

Vaikka yksittäiset, ja nopeat pistokoemalliset sisäilmatutkimukset kertovat vain mittaushetken tilanteesta eikä luotettavan laajasti koko olosuhteesta, voi pitkäkestoinen mittaus olla mahdoton järjestää kustannussyistä taikka samanaikaisesta mittaustarpeesta toisaalla (Pitkäranta, 2016).

4.2 Mittalaitteen luotettavuus

Mittausjaksoa suunniteltaessa on pyrittävä valitsemaan tarkoitusta parhaiten palveleva mittauskalusto sekä menetelmät. Jos soveltuvaa mittauskalustoa ei löydy, on perusteltua myös ostaa mittaus ulkoisena palveluna. Mittausta ei tulisi tehdä väärää taikka tarpeettomia vain, että on jokin mittauslaite käytettävissä. Välineistö ja toteutustapa on syytä kertoa myös tuloksia esittelevässä raportoinnissa.

Mittalaitteen valinnassa on huomioitava mittaustarkkuus. Kuinka tarkkaa mittaustulosta haetaan, ja vastaako tarkkuus mitattavan ominaisuuden monimuotoisuutta kokonaisuudessaan. Kuitenkin, mikäli mittaussuoritus on virheellinen, ei tarkinkaan mittaristo anna oikeita tuloksia. Riippuen mitattavasta suureesta ja mittausjakson pituudesta, nähdään riittääkö mittausjaksona lyhyempi ja mittaritarkkuutena hieman karkeampi.

Lähes kaikkeen mittaukseen liittyy aina myös lopputuloksen epävarmuus. Tämä tarkoittaa, että mitattu tulos ei välttämättä vastaa todellisuutta. Jotta mittaustulos vastaisi mahdollisimman paljon todellista tilannetta, on mittausvirheet minimoitava tutkimuslaitteistosta- ja menetelmistä, mittaustapahtumasta sekä tulosten käsittelyssä. Tarpeen vaatiessa mittaus voidaan suorittaa toistamiseen, jolloin lopputulos voi olla paremmin todellisuutta vastaava. Saman tapahtuman mittaus kahdella välineistöllä vähentää laitteistoon liittyvää epävarmuutta, kun taas kahden samanlaisen mittaustapahtuman mittaus vähentää ajallisesta sekä paikallisesta vaihtelusta johtuvaa epävarmuutta mittaustuloksissa. Mittausvälineistön tarkoituksenmukainen ja säännöllinen kalibrointi on erittäin välttämätöntä todennukaisten tulosten saannissa.

Mittauslaitteet on huollettava valmistajan ohjeiden mukaisesti. Laittevalmistajan tuotetiedoissa annetaan ohjeet kalibrointimenettelyihin. Yleensä kalibrointi tehdään valmistajan tai jälleenmyyjän toimesta.

5 MITTAUKSEN TOTEUTUS

Rakennukseen liittyvän terveyden tutkinnassa on syytä noudattaa viranomaisten hyväksymiä menetelmiä ja toimintatapoja, joita on esitetty muun muassa *Sosiaali- ja Terveysministeriön Asumisterveysasetuksessa (545/2015, Finlex)*, sekä *Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeessa (Sosiaali- ja terveysalan valvontavirasto Valvira, 2016)*. Lisäksi voidaan käyttää *Asumisterveysohjetta 2003*, joka kuuluu Sosiaali- ja terveysministeriön oppaisiin, mikäli edellä mainituista oppaista ei löydy mainintaa tarvittavasta tekijästä. Runsaasti käytännön ohjeita mittaukseen ja tulosten analysointiin antaa ympäristöopas *Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus -opas (Pitkäranta, 2016)*.

Sisäilmateknillisiä tutkimuksia voidaan tutkia itsenäisenä kohteena, tai laajemman kuntotutkimuksen osana. Sisäilman mittauksilla pyritään löytämään tilassa olevat epäpuhtaudet ja niiden vaikutus sisäilman laatuun. Mikäli tilassa tai rakennuksessa ei ole havaittu esimerkiksi selkeää kosteusvauriota tai sisäilmaongelmaa, voi ilmanlaadun ja ilmanvaihdon toimivuuden arvioimiseen riittää TVOC- ja hiilidioksidimittaukset. Mittausten lisäksi tutkimuksessa on hyvä kirjata aistinvaraisesti tehtävät havainnot, mikäli näitä esiintyy. Ilmassa olevat erilaiset hajut tunnistaa yleensä parhaiten heti tilaan saavuttaessa, sillä ihmisen hajuaisi turtuu nopeasti hajuärsykkeisiin (Pitkäranta, 2016).

Opinnäytetyössä tutkitaan Tampereen ammattikorkeakoulun tiloissa, kuinka hyvin CO₂-mittauksilla voidaan arvioida käyttöastetta, tilan ilmanvaihdon riittävyttä, ja pohditaan onko antureiden sijoittelulla merkitystä. Työn mittausjaksoon liittyvä mittaussuunnitelma esitetään Liitteessä 2. Hiilidioksidia seurattaessa mittaus voidaan suorittaa joko pidempiaikaisena seurauksena, tai lyhyempinä hetkinä, mikäli tilan käyttö vastaa normaalikäyttöä. Tällöin mittauslukemia saadaan ryhmätyöskentelytilan käytöstä, ja lukemat ovat todennäköisesti suurimmillaan käyttöajan loppupuolella. Käyttötapauksissa vertaillaan eri ilmanvaihtomäärien vaikutusta tilassa, jossa noin 2,5 h tunnin luennon ajan aikaansa viettää määrätyn kokoinen testiryhmä. Taulukossa 5. esitellään käyttötapaukset pääpiirteittäin.

TAULUKKO 5. Työssä tutkittavat käyttötapaukset

Käyttötapaus	Asetus	Mittausajan kesto
Käyttötapaus 1	Yleinen seuranta	Viikko
Käyttötapaus 2	Vakioitu ilmavirta	Opetustuntien ajan, n. 2,5 h
Käyttötapaus 3	Vaihtuva ilmavirta	Opetustuntien ajan, n. 2,5 h

Käyttötapaus 1 suoritetaan viikon seurantana, kun tila on ominaisessa käytössä. Tällöin käyttöastetta ei seurata, ja ilmanvaihdon asetukset ovat automaattiset.

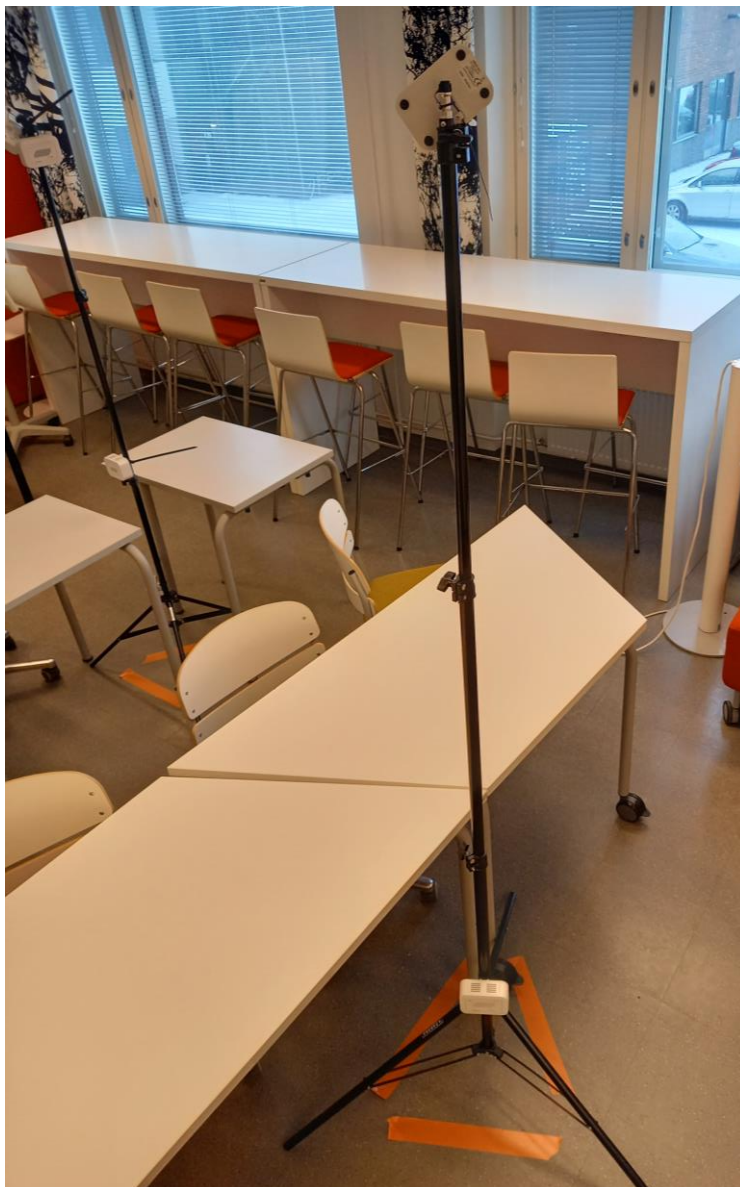
Käyttötapaus 2 suoritetaan opetustuntien aikana. Mittausajanjakso on noin 2,5 tuntia. Käyttötapauksessa tilan ilmanvaihtovirta asetetaan tietylle tasolle, ja luennolle osallistuvien henkilöiden määrä kirjataan ylös.

Käyttötapaus 3 suoritetaan samoilla lähtökohdilla kuin käyttötapaus 2, mutta vaihtuvan ilmavirran sijasta ilmanvaihto säädetään muuttuvaksi niin, että tilan hiilidioksiditaso pysyisi tietyssä arvossa.

5.1 Mittalaitteisto

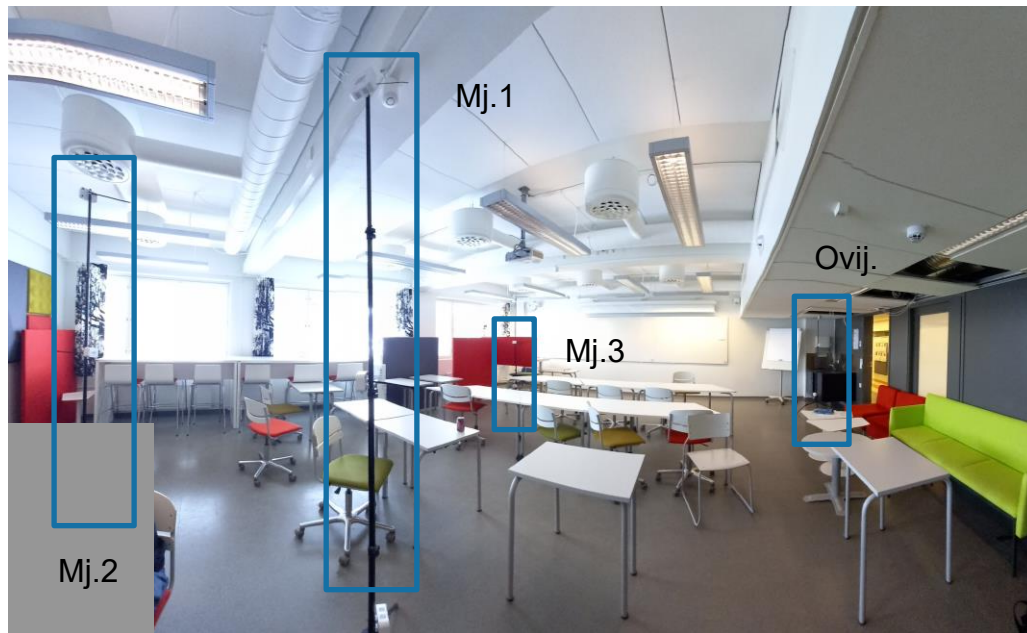
Työssä käytetään Miran DLS IAQ.THB+CO₂-lähettimiä, jotka mittaavat tilan hiilidioksidipitoisuutta, suhteellista ilmankosteutta, TVOC-tasoa, lämpötilaa ja painetta, kahdella anturilla mahdollista seurata myös pienhiukkastasoja. Lähetinmalli on tarkoitettu sisäilman laadun seuraamiseen esimerkiksi työpaikoilla ja kouluissa (Pietiko, 2023). Mittavälineistö koostuu yhteensä 17 anturista. Anturit sijaitsevat pääosin kolmen ryhmässä mittausjalustoilla, joilla voidaan säätää mittarin sijainnin korkeutta. Mittausjalustojen sijainti varmistetaan myös lattiaan merkattavin teippialuein, kuvassa 5. esimerkki. Antureiden sijainnin saa tallennettua myös mittausdataa keräävään pilvipalveluun, johon on mahdollista ladata tilan pohjakuva.

Lämpötila mitataan Celsius-asteikolla, ilman suhteellinen kosteus mitataan prosenttiosuutena, ilman paine barometrisena millibaareissa ja hiilidioksidin pitoisuus ppm-tasona.



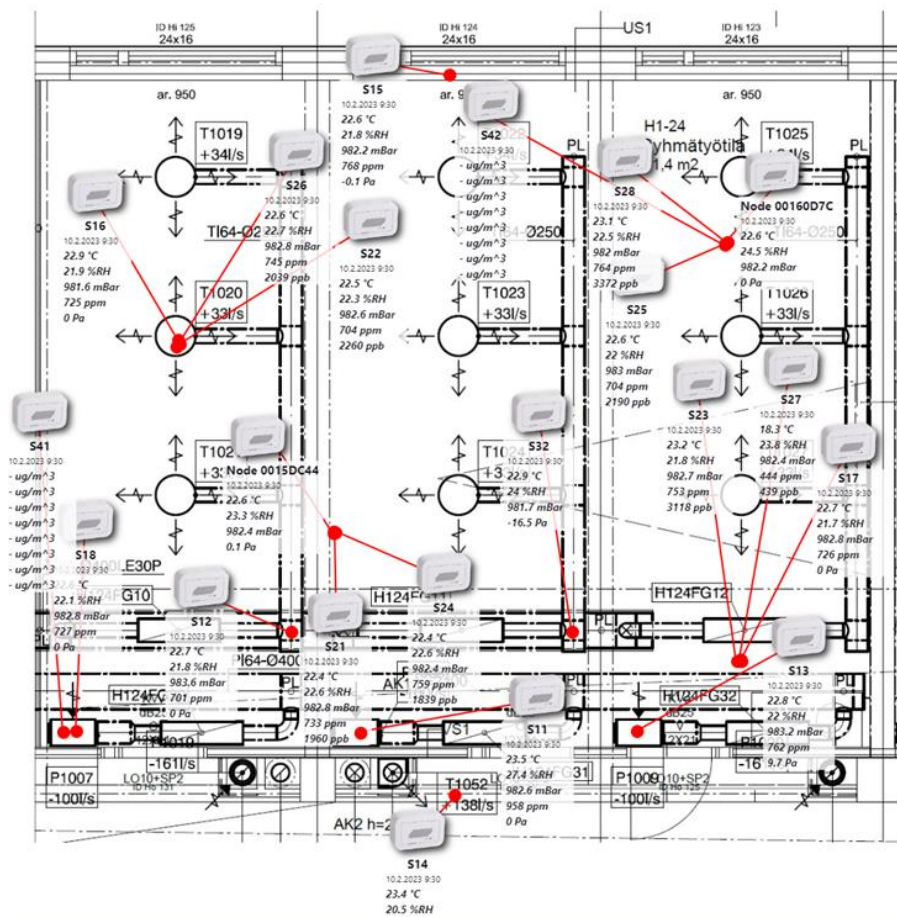
KUVA 5. Jalustassa 2–3 anturia, ja lattiassa teippi merkkäämassa jalustan sijaintia mittausjakson aikana. © Pia Huhtala

Kuvassa 6. esimerkki mittareiden sijainneista luokkatilassa. Lähetin kerää mittamansa datan, ja siirtää tiedon etäluettavaan dataloggeriin (Miran DLS APw+ keskusyksikkö), joka tallentaa datan Excel-muotoiseksi taulukoksi.



KUVA 6. Pohjakuvaan merkityt anturit näyttävät tiedot reaaliajassa. © Pia Huh-tala

Antureiden sijoittelu tilassa esitetään kuvassa 7. Antureiden sijoittelua on mah-dollista muuttaa pilvipalvelussa, mikäli mitattavassa tilassa tehdään muutoksia antureiden suhteen.



KUVA 7. Pohjakuvaan sijoitetut anturit

Tutkimukseen käytetyt anturit mittaavat eri suureita. Seuraavassa taulukossa 6. on koottuna tiedot antureista ja mitattavista suureista.

TAULUKKO 6. Mitattavat suureet antureittain

Node	T	RH	CO2	dP	TVOC
S11	x	x	x	x	
S12	x	x	x	x	
S13	x	x	x	x	
S16	x	x	x	x	
S31	x	x		x	
S32	x	x		x	
S33	x	x		x	
S21	x	x	x		x
S22	x	x	x		x
S23	x	x	x		x
S24	x	x	x		x
S25	x	x	x		x
S26	x	x	x		x
S27	x	x	x		x
S28	x	x	x		x
S17	x	x	x	x	
S18	x	x	x	x	
S14	x	x	x	x	
S15	x	x	x	x	

Mittarit asetetaan mittausjalustaan, hiilidioksidipitoisuuksia mitataan kussakin jalustassa kahdella anturilla, ja TVOC-pitoisuutta yhdellä anturilla. Lämpötilaa ja ilman kosteutta mitataan kaikilla antureilla.

5.2 Mitta-antureiden kalibrointi

Tutkimushankkeessa käytettävät anturit kalibroidaan mittausryhmän toimesta kohteeseen sopivalla referenssimittarilla. Mittauksia varten tehtävä kalibrointi ei vastaa antureiden virallista kalibrointia. Hankkeeseen liittyen muuna työnä rakennettu aerosolikammio toimii antureiden kalibrointitilana. Kammio kuvassa 8. Kammion automatiikka sisältää 4/2022 kalibroidun mittarin (kalibrointitodistus liitteessä 1), jonka voidaan olettaa näyttävän lähelle todenmukaisen hiilidioksiditason. Kammion sisältämää mittaria ei ole käytetty ulkopuolisessa käytössä.

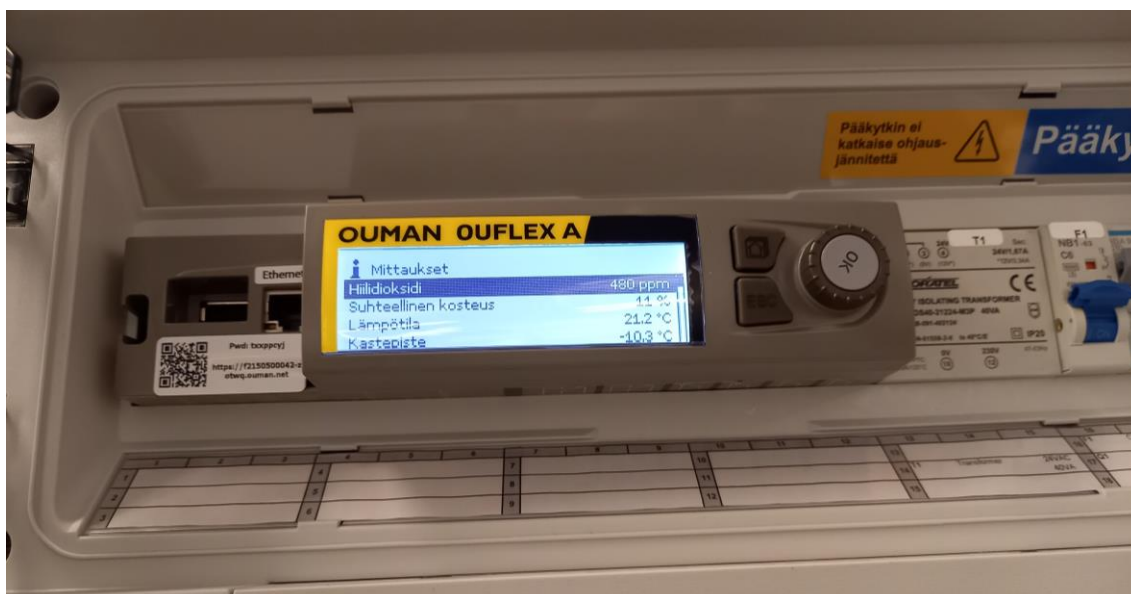


KUVA 8. Aerosolikammio © Pia Huhtala

Kammioon yhdistetään paineilma, joka puhaltaa kammion läpi. Kammiokaapin pohjassa on pitkä, suorakaiteen muotoinen rako, joten kammioon saadaan huuhteleva ilmavirtaus.

Paineilman käynnistyttyä kammioon kertynyt tutkijalähtöinen hiilidioksidipitoisuus laskee. Pitoisuus asettuu vaihtelevaan 475–485 ppm välille, joten keskiarvoisesti käytetään 480 ppm pitoisuutta mittareiden kalibroitireferenssinä. Kuvassa 9. mittarin suureita.

Kaikki anturit asetetaan kammion pohjalle, ja pilvipalvelun kautta asetetaan referenssitaso.



KUVA 9. Kammion sisältämän mittarin näyttö. © Pia Huhtala

Tasoasetusten tallennuksen jälkeen paineilma virtaus sammutetaan, ja varmistetaan mittareiden lukemat. Niin keskuslaite kuin pilvipalvelun grafiikat kertovat antureiden linjanmukaisista tuloksista, joten kalibroinnin voidaan olettaa onnistuneen 17 anturin kohdalla 19:stä.

Kahden anturin kalibroititaso jäi muita matalammalle, johtuen aiemmin tapahtuneista päivitysepäselvyyksistä. Kahdelle anturille on mahdollista asettaa vain 400 ppm referenssitaso, muihin asetetun 480 ppm sijasta.

Antureita voidaan tarvittaessa käyttää mittausjaksossa, kunhan tasoero huomioidaan tuloksissa.

6 TULOSTEN TULKINTA

Tulokset esitetään käyttötapauksittain. Suureiden mittatuloksia tulkitaan Asumisterveysasetuksen, asetuksen soveltamisohjeiden, Asumisterveysohjeen, Sisäilmastoluokituksen ja työsuojeluhallinnon asettamien arvojen mukaan. Tuloksia tarkastellaan myös laskennallisesti alussa esitettyjen kaavojen mukaan.

6.1 Tulosten tulkinta, lämpötila ja RH

Asumisterveysasetuksessa (STMa 545/2015) asuntojen lämpötilarajoiksi on annettu lämmityskaudelle + 18...+26 ° C, kesäajalle arvot ovat + 18...+ 32 ° C. Sisäilmastoluokituksesta 2018 annetaan luokassa S2 suunnittelu-arvot toimi- ja opetustiloille ym. työtiloille, jotka ovat lämmityskaudella + 20...+ 23 ° C, ja lämmityskauden ulkopuolella + 20...+ 25 ° C. Työsuojeluhallinnon mukaan kevyen työn lämpötilarajat ovat + 19...+ 25 ° C.

Lämpötilojen mittaustulosten perusteella voidaan arvioida, onko lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmä suunnitelmanmukainen.

Sosiaali- ja terveysministeriön *Asumisterveysohjeen 2003* mukaan on suositeltavaa, että sisäilman kosteus sijoittuisi välille 20–60 %. Varsinkin talvella suhteellinen kosteus (RH) voi sisätiloissa olla alle 20 %, jopa lähelle 10 %, joka johtuu pakkasilman vähäisestä vesisisällöstä. *Asumisterveysasetus 2016* mainitsee, ettei huoneilman kosteus saa olla pitkäkestoisesti suuri, että siitä aiheutuu mikrobikasvun riski. *Sisäilmastoluokitus 2018* ei ota kantaa ilman suhteelliseen kosteuteen suunnitteluluokissa, mutta mainitsee myös ylärajaksi 60 % mikrobikasvun riskin nojalla.

Tulosten tulkintaan annetut arvot lämpötilojen osalta on koottu taulukkoon 7.

TAULUKKO 7. Lämpötilojen tavoitearvoja eri lähteistä.

Lämpötilaolot	
Asumisterveysasetus	Lämmityskausi +18...+26 ° C Kesäkausi +18...32 ° C
Sisäilmastoluokitus	Lämmityskausi +20,5...+23 ° C Kesäkausi +21...26 ° C
Työsuojeluhallinto	Kevyt istumatyö +21...+25 ° C Muu kevyt työ +19...+23 ° C

Ilman suhteellisen kosteuden sekä lämpötilan avulla saadaan ilman kosteussisältö (g/m^3) joko laskemalla tai Mollier-diagrammia tulkitsemalla. Ulkoilman kosteussisältöön verraten asuintilojen sisältö on noin $1\text{--}3 \text{ g/m}^3$ lisää ulkoilman tulokseen, toimitiloissa kyseinen lisä on yleensä $<2 \text{ g/m}^3$ (Pitkäranta, 2015, 62).

6.2 Tulosten tulkinta, hiilidioksidi

Ulkoilman hiilidioksidipitoisuudeksi annetaan toistaiseksi keskimäärin 400 ppm, kaupunkialueilla pitoisuus voi paikoin olla suurempi. *Sisäilmastoluokitus 2018* antaa sisäilman laadulle tavoitearvot myös hiilidioksidille. Luokitus antaa hiilidioksidille pitoisuuslisän, kullekin suunnitteluluokalle omansa. Luokassa S1 pitoisuuslisä on $< 350 \text{ ppm}$, luokka S2 $< 550 \text{ ppm}$ ja luokassa S3 $< 800 \text{ ppm}$. Jos oletetaan ulkoilman pitoisuuden olevan 400 ppm, ei S2 luokan mukaan suunnitellussa tilassa hiilidioksidipitoisuus saisi ylittää 950 ppm. Talotekniikkainfo antaa sisäilman hiilidioksidin hetkelliseksi suunnitteluarvoksi enintään 800 ppm suurempi kuin ulkoilman pitoisuus suunniteltuna käyttöaikana.

Asumisterveysasetus 2015 kertoo toimenpiderajan ylittyvän, mikäli hiilidioksidipitoisuus ylittää ulkoilman pitoisuuden yli $1\ 150 \text{ ppm}$. Toimenpiderajalla tarkoitetaan pitoisuutta, jonka ylittyessä se, kenen vastuulla asia on, on ryhdyttävä tarpeenmukaisiin toimenpiteisiin jotta terveyshaitta selvitetään ja tarvittaessa poistetaan kokonaan tai rajoitetaan pitoisuuden nousua. (Asumisterveysasetus 2015, määritelmät). Raja-arvot on koottu taulukkoon 8.

TAULUKKO 8. Hiilidioksidipitoisuuden raja-arvoja

Hiilidioksidi tavoitearvot	
Sisäilmastoluokitus 2018	Hiilidioksidilisä luokassa S1: < 350 ppm S2: < 550 ppm S3: < 800 ppm
Asumisterveysasetus 2015	Toimenpideraja 1 150 ppm
Talotekniikkainfo	Hiilidioksidilisä < 800 ppm

6.3 Tulosten tulkinta, hiukkaset ja VOC-yhdisteet

Sisäilmastoluokitus 2018 antaa sisäilman laadulle tavoitearvoja pienhiukkasille, eli PM_{2,5}-hiukkasille. Suunnitteluluokissa S1 sekä S2 molemmissa tavoitearvo on < 10 µg/m³. Luokassa S3 arvo on < 25 µg/m³. Luokan S3 vastaavan arvon antaa pienhiukkasille myös *Asumisterveysasetus 2015*. *Sisäilmastoluokitus* ei ota kantaa PM₁₀ – pitoisuuteen, asumisterveysasetus ilmoittaa 24 tunnin pituiselle mittaukselle 50 µg/m³ pitoisuuden.

Asumisterveysasetuksen soveltamisohje (osa 3) 2021 antaa 24 tunnin pituiselle mittaukselle haihtuvien orgaanisten yhdisteiden tolueenivasteella lasketun kokonaispitoisuuden toimenpiderajaksi 400 µg/m³ sisäilmassa. Yksittäisen yhdisteen vastaava pitoisuusraja on 50 µg/m³, kun mittaus kestää 24 tuntia. Yksittäisiä VOC-yhdisteitä on useita satoja. Tolueenivasteella lasketulla tuloksella tarkoitetaan pitoisuutta, joka on laskettu vertaamalla yhdisteen detektorivastetta tolueenin detektorivasteeseen (*Asumisterveysasetus 2015, määritelmät*). Taulukossa 9. tavoitearvot koottuna.

TAULUKKO 9. Pienhiukkasten tavoitearvoja

	PM _{2,5}	PM ₁₀	VOC	TVOC
S1, S2	10 µg/m ³			
S3	25 µg/m ³			
Asumisterveysasetus	25 µg/m ³	50 µg/m ³	50 µg/m ³	400 µg/m ³

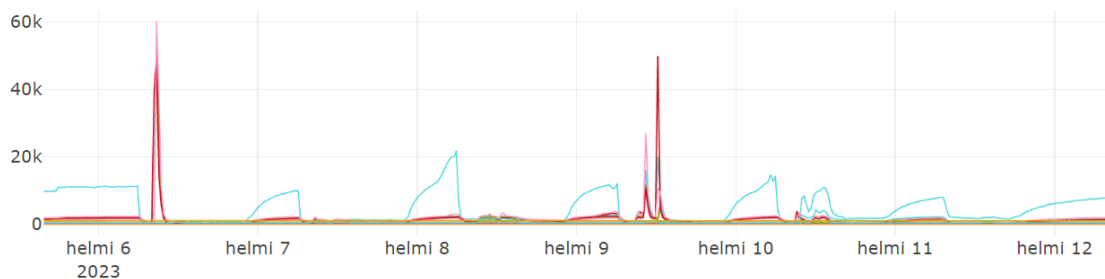
7 TULOKSET

Ennen kontrolloitujen käyttötapausten tulosten havainnointia, esitetään tulokset ryhmätyötilan yleiskäytöstä viikon ajalta. Anturit olleet tilassa yli kahden viikon ajan. Jokaisen mittaus tilanteen olosuhteet esitellään kappaleen alussa.

7.1 Käyttötapaus 1, yleinen seuranta

- Ei seurattua käyttöastetta, satunnainen
- Datakeskiarvot ovensuusta, sekä kahdesta tolpastä oleskeluvyöhykkeeltä
- Ilmanvaihto automaattiasetuksella
- Sisäänkäyntiovi jousituksella sulkeutuva, täten lähtökohtaisesti aina kiinni
- Verhojen/sädekaihtimien asennot mahdollisesti vaihdelleet
- Ulkoilman lämpötilat vaihdelleet 0 °C molemmin puolin muutaman asteen
- RH n. 86–90 %

Kuvassa 10. käyrästä mittausjaksosta. Kuvaajan eri värit havainnoivat eri antureita ja mitattavia suureita.



KUVA 10. Kuvaaja viikon ajalta yleistilanteesta. Kuva antureiden pilvipalvelusta

Viikon ajalta keskiarvot taulukoituna 10. taulukkoon, niin oleskeluvyöhykkeeltä kahdelta mittausjalustalta kuin oviaukon läheisyydestä yhdeltä mittausjalustalta.

TAULUKKO 10. Jalustakohtaiset datakeskiarvot yleisseurannasta

Oleskeluv. jalusta 1	T [° C]	RH [%]	CO ₂ [ppm]	TVOC [ppb]
S21, S24, S31	22,5	21,5	473,1	2033
Oleskeluv. jalusta 2				
S16, S22, S26	22,6	20,9	461,4	2318
Ovenpielijalusta				
S17, S23, S27	22,6	21,2	471,6	7657

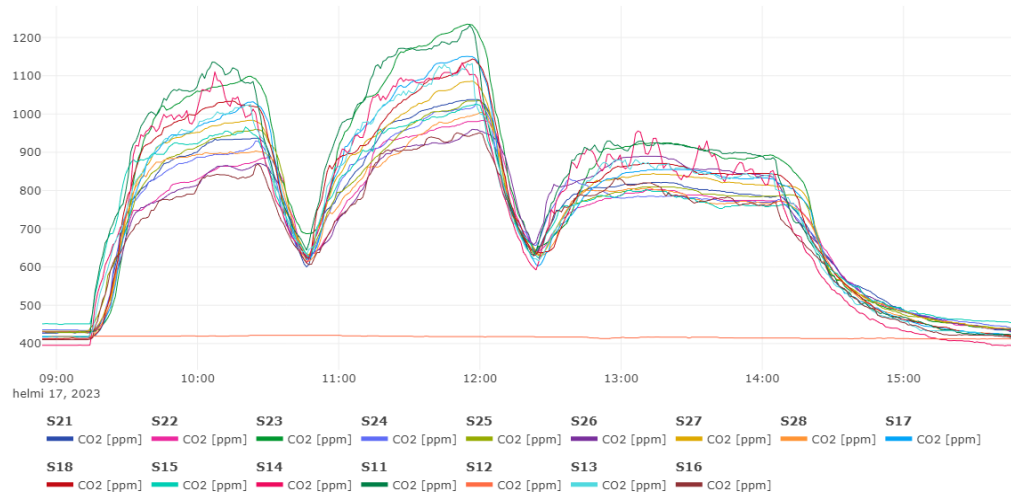
7.2 Käyttötapaus 2, vajaalla ilmavirralla

Käyttötapausten 2 mittausjakso suoritettiin 02/2023, klo 09:15-12:00 välisenä aikana. Taulukkoon 11. on koottu ulkoilman olosuhteet, sekä tilan käyttöä ja ilmamääräsäätimen asetuksia koskevat tiedot.

TAULUKKO 11. Käyttötapaus 2:n olosuhdetiedot

Säätila	Sadesää
Lämpötila (T _u)	1,6 ° C
Tuuli	Itätuuli 4 m/s
Kosteus (RH _u)	100 %
Kastepiste	n. 1,2 ° C
Jakson pituus	n. 2,5 h sisältäen tauon
IMS	21,5 % → 44 l/s → Tilan ilmanvaihto 130 l/s
Käyttöaste	21 hlöä

Kuvassa 11. kuvaaja havainnollistaa antureiden hiilidioksiditasoa



KUVA 11. Testijakso sijoittui aikavälille 09:15-12:00. Tilan käyttöä jatkettiin tämän jälkeen.

Toisen käyttötapauksen ensimmäisen version mittauksessa mukana oli myös pienhiukkasmittarit. Mittareilta koottiin data PM₁₀ ja PM_{2,5} - hiukkasia koskien. Hiukkasanturit sijaitsevat oleskeluvyöhykkeellä ja poistoilmakanavistossa. Anturi S42 sijaitsee neljännessä mittausjalustassa S41 poistoilmakanavassa. Taulukossa 12. koottu data.

TAULUKKO 12. Käyttötapaus 2, anturidata keskiarvo. Tilailmanvaihto 130 l/s.

Anturi	PM _{2,5} [µg/m ³]	PM ₁₀ [µg/m ³]
S42	1,935	1,936
S41	1,918	1,919

Seuraavaan taulukkoon 13. on koottu mittausjalustakohtaiset keskiarvot mittausjaksolta.

TAULUKKO 13. Käyttötapaus 2:n keskiarvoinen mittaridata. Ilmanvaihto 130 l/s

Oleskeluv. jalusta 1	T [° C]	RH [%]	CO ₂ [ppm]	TVOC [ppb]
S21, S24, S31	23,5	27,6	843	3664
Oleskeluv. jalusta 2				
S16, S22, S26	23,4	27,2	793	1887
Oleskeluv. jalusta 3				
S25, S28, S33	23,4	28,0	839	3848
Ovenpielijalusta				
S17, S23, S27	23,1	28,6	916	9428

Mittausjalustat sijaitsevat luokkatilan oleskeluvyöhykkeellä. Näiden lisäksi poistoilmakanavistoon sijoitettiin kolme anturia, ja tuloilmakanavistoon kaksi anturia. Seuraavaan taulukkoon 14. on koottu kanavistoantureiden keskiarvot. Voidaan olettaa, että poistoilmakanaviston mittaustulokset antaisivat tuloksen lähelle tilan todellista hiilidioksiditasoa, tuloilmakanaviston datan kertoessa tuloilman ominaisuuksista.

TAULUKKO 14. Käyttötapaus 2, Ilmanvaihtokanavistojen anturidata. Ilmanvaihtomäärä 130 l/s.

Poistoilmakanavisto	T [° C]	RH [%]	CO ₂ [ppm]	TVOC [ppb]
S11, S13, S18	23,7	27,7	930	-
Tuloilmakanavisto	T [° C]	RH [%]	CO ₂ [ppm]	TVOC [ppb]
S12, S32	21,7	29,0	419	-

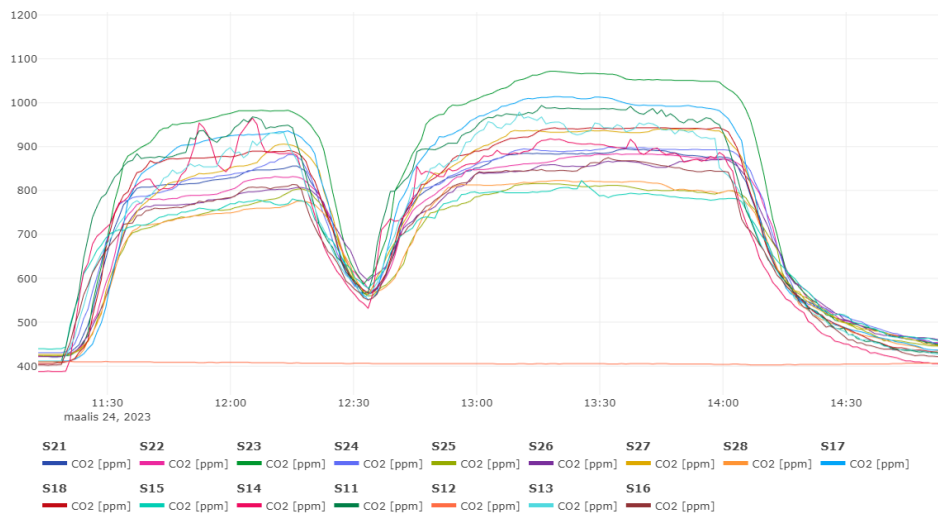
7.3 Käyttötapaus 2, osittaisella ilmavirralla

Käyttötapaus 2 toteutettiin osittaisella ilmavirralla 3/2023, klo 11:17-14:00 sisältäen tauon. Tilannetta koskeva olosuhdetaulukko 15. esittelee mm. osallistujamäärän ja säätöasetukset.

TAULUKKO 15. Käyttötapaus 2 olosuhdetaulukko

Säätila	Pouta
Lämpötila (T_u)	3,6 ° C
Tuuli	Lounaistuuli 5,5 m/s
Kosteus (RH_u)	92 %
Kastepiste	2,4 ° C
Jakson pituus	n. 3 h sisältäen tauon
IMS	33 % → n. 67 l/s → Tilan ilmanvaihto 200 l/s
Käyttöaste	22 hlöä

Käyttötapausten ajankohdan hiilidioksidikäyrä kuvassa 12.



KUVA 12. 15 minuutin tauko näkyy tasojen alenemana kuvaajan keskikohdassa

Jalustakohtainen keskiarvodata antureilta on koottu taulukkoon 16.

TAULUKKO 16. Käyttötapaus 2:n keskiarvoinen mittaridata. Ilmanvaihto 200 l/s.

Oleskeluv. jalusta 1	T [° C]	RH [%]	CO ₂ [ppm]	TVOC [ppb]
S21, S24, S31	22,2	30,5	745	1602
Oleskeluv. jalusta 2				
S16, S22, S26	22,3	30,2	719	1253
Oleskeluv. jalusta 3				
S25, S28, S33	22,3	29,7	688	1751
Ovenpielijalusta				
S17, S23, S27	22,2	31,0	802	3382

Ilmanvaihtokanaviston datatiedot koottu taulukkoon 17.

TAULUKKO 17. Käyttötapaus 2. Keskiarvodata kanavistoista, ilmanvaihto 200 l/s.

Poistoilmakanavisto	T [° C]	RH [%]	CO ₂ [ppm]	TVOC [ppb]
S11, S13, S18	22,6	30,1	784	-
Tuloilmakanavisto	T [° C]	RH [%]	CO ₂ [ppm]	TVOC [ppb]
S12, S32	20,5	32,3	408	-

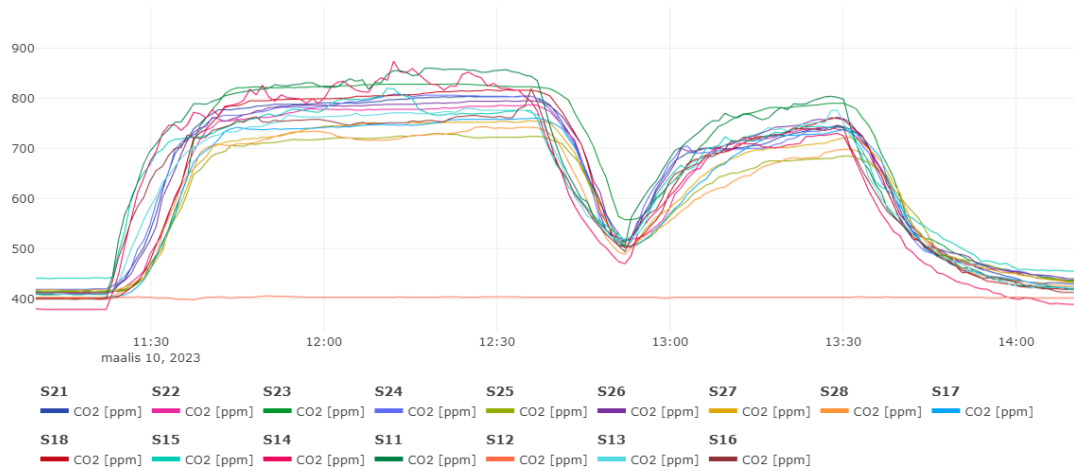
7.4 Käyttötapaus 2, täydellä ilmavirralla

Käyttötapaus 2:n kolmas versio, täydellä ilmavirralla toteutettiin 03/2023, klo 11:10-13:50 välisellä ajalla. Seuraavassa olosuhdetaulukko 18.

TAULUKKO 18. Käyttötapaus 2, täysi ilmavirta

Säätila	Pouta
Lämpötila (T _u)	-1,6 ° C
Tuuli	Lounaistuuli 6,1 m/s
Kosteus (RH _u)	71 %
Kastepiste	-6,9 ° C
Jakson pituus	n. 2 h sisältäen tauon
IMS	100 % → 95 l/s → Tilan ilmanvaihto 285 l/s
Käyttöaste	22 hlöä

Hiilidioksiditaseen käyrästä mittausjaksolta kuvassa 13.



KUVA 13. Käyrästä on muotokieleltään samankaltainen kuin aiemmat

Taulukkoon 19. on koottu mittausjakson mittausjalustakohtainen anturidata.

TAULUKKO 19. Käyttötapaus 2, datakeskiarvo. Tilan ilmanvaihto 285 l/s.

Oleskeluv. jalusta 1	T [° C]	RH [%]	CO ₂ [ppm]	TVOC [ppb]
S21, S24, S31	22,7	17,3	677	671
Oleskeluv. jalusta 2				
S16, S22, S26	22,9	16,6	666	368
Oleskeluv. jalusta 3				
S25, S28, S33	22,7	16,7	627	520
Ovenpielijalusta				
S17, S23, S27	22,5	16,2	663	1006

Taulukossa 20. tilan ilmanvaihtokanavistojen anturidata. Poistoilmakanavistossa on kolme anturia, tuloilmakanavistossa kaksi anturia.

TAULUKKO 20. Käyttötapaus 2, täyden ilmapirran data kanavistoista.

Poistoilmakanavisto	T [° C]	RH [%]	CO ₂ [ppm]	TVOC [ppb]
S11, S13, S18	22,8	16,1	680	-
Tuloilmakanavisto	T [° C]	RH [%]	CO ₂ [ppm]	TVOC [ppb]
S12, S32	21,4	17,0	403	-

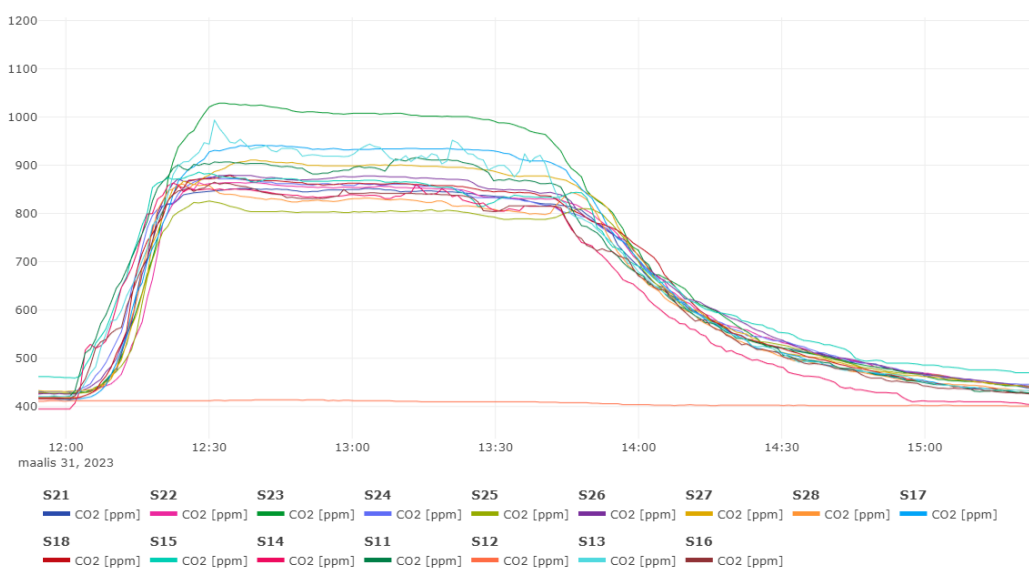
7.5 Käyttötapaus 3, muuttuvalla ilmavirralla

Käyttötapaus 3 on sisällöltään sama kuin käyttötapaus 2, mutta ilmavirta on vaihtuva, ja reagoi hiilidioksiditasoihin. Automaation toimintarajaksi asetettiin 750 ppm. Tilanteen olosuhteet esitellään taulukossa 21.

TAULUKKO 21. Käyttötapaus 3 mittaustilanteen olosuhteet ja säädöt.

Säätila	Pouta
Lämpötila (T_u)	-2,6 ° C
Tuuli	Länsituuli 2,2 m/s
Kosteus (RH_u)	51 %
Kastepiste	-12,0 ° C
Jakson pituus	n. 1,5 h ilman taukoja
IMS	Kuormaan reagoiva, CO ₂ taseraja 750 ppm
Käyttöaste	27 hlö

Hiilidioksiditaseen käyrästä kuvassa 14. Kuvio on nyt yhtenäinen, kun kohdejaksolla ei ollut taukoja, eikä täten tilasta poistumista.



KUVA 14. Korkein käyrä tulee ovenpielijalustasta

Taulukkoon 22. koottu jalustakohtainen data, antureiden keskiarvolaskelma.

TAULUKKO 22. Käyttötapaus 3 datakeskiarvot mittausjalustoittain

Oleskeluv. jalusta 1	T [° C]	RH [%]	CO ₂ [ppm]	TVOC [ppb]
S21, S24, S31	22,8	14,1	733	372
Oleskeluv. jalusta 2				
S16, S22, S26	22,8	13,3	733	287
Oleskeluv. jalusta 3				
S25, S28, S33	22,6	14,0	711	325
Ovenpielijalusta				
S17, S23, S27	22,6	13,7	781	873

Taulukossa 23. ilmanvaihtokanavista saatu data, muiden käyttötapausten mukaisesti.

TAULUKKO 23. Kolmannen käyttötapauksen data kanavistoista.

Poistoilmakanavisto	T [° C]	RH [%]	CO ₂ [ppm]	TVOC [ppb]
S11, S13, S18	22,8	13,1	757	-
Tuloilmakanavisto	T [° C]	RH [%]	CO ₂ [ppm]	TVOC [ppb]
S12, S32	21,3	13,5	408	-

Työn tutkimukseen suunnitellut käyttötapaukset on tuloksineen esitelty. Seuraavaksi tuloksia käsitellään tarkemmin kappaleessa 8.

8 TULOSTEN TARKASTELU

Kappaleessa verrataan saatuja tuloksia kerättyihin ohjearvoihin, tarkastellaan laskennan avulla ja pohditaan mahdollisten eroavaisuuksien syytä.

8.1 Käyttötapaus 1

Viikon mittauksessa hallitsevina huippuina näkyvät vaaleansinisenä TVOC-pitoisuutta merkitsevä pitoisuus tuloilmakanavassa. Huiput ajoittuvat nousemaan noin klo 22:00 alkaen, ja nousu päättyy äkillisesti joka päivä klo 06:00 aikoihin. Tämän voidaan olettaa johtuvan ilmanvaihdon ajastuksesta. Kyseisen TVOC-pitoisuuden näyttävä anturi on asetettuna tuloilmakanavaan. Lähempää tarkasteltuna, myös kyseisen anturin lämpötilakuvaaja noudattaa samankaltaista sekä -aikaista kuviota kuin TVOC-pitoisuus. Punainen käyrästä osoittaa myös TVOC-arvoja, piikit sijoittuvat tilan käytön aikaiseen dataan. Antureiden tarkkuus ei huomioi yksittäisiä VOC-yhdisteitä, vaan yhdisteiden kokonaispitoisuuden.

On yleistä, että automaation mittausantureita asetetaan oviaukon läheisyyteen. Kun vertaillaan arvoja oleskeluvyöhykkeen ja ovensuun mittausjalustoilta, varsinkin lämpötila ja suhteellinen ilmankosteus on kaikissa mittauspisteissä hyvin samankaltainen. Arvojen samankaltaisuus voi selittyä, kun mitattavasta ryhmätyötilasta on käynti käytävälle, joten arvojen voidaan olettaa melko samaa koko kerroksen käytävällä sekä sen kautta käytäviin tiloihin.

Suurin vaihtelu mittauspisteiden kesken havaitaan haihtuvien orgaanisten yhdisteiden datassa. Pisteistä mittausjalusta 2 on lähimpänä ulkoseinää ja ikkunoita, oleskeluvyöhykkeen mittausjalusta 1 sijaitsee lähimpänä tilan käytävän puoleista sisäseinää, sekä myös lähimpänä poistoilman päätelaitteita.

Ovensuussa taas on suurin liike ja ilmanvaihtuvuus. Tilan käytön myötä TVOC-pitoisuuksien sanotaan hälvenevän. Tilasta on käynti suoraan käytävään, ja käytävän varrella on useampia luokkatiloja. Käytävä on täten pääosin läpikulkua ja satunnaista odottelua varten. Käytävältä ei ole mittausdataa, joten on vaikea arvioida, vaikuttavatko käytävän TVOC-arvot oviaukon mittausjalustaan.

Viikon mittausdatan keskiarvoilla tehtävän vertailun perusteella, sisäänkäynnin läheisyyteen asetettu anturi ei juurikaan eroa olosuhdetiedoiltaan tilan oleskeluvyöhykkeestä.

Seuraavaan taulukkoon 24. on koottu viikon arvot vertailun helpottamiseksi.

TAULUKKO 24. Suurin hajonta havaitaan TVOC-pitoisuuksissa

Keskiarvo	Ovenpieli	Oleskeluvyöhyke	
T	22,5	22,6	° C
RH	21	21,2	%
CO ₂	471,6	467,3	ppm
TVOC	7657	2176	ppb

Lämpötilaolot osuvat lähdearvojen skaalaan oikein hyvin. Myös suhteellinen ilmankosteus on erittäin lähellä asumisterveysohjeen mainitsemaa talvikauden kosteusprosenttia sisätiloissa.

Viikon mittaisessa seurannassa, yleiskäytössä olleessa tilassa hiilidioksiditaso antaa ymmärtää ilmanvaihdon olevan riittävä, jopa erittäin riittävä. On myös otettava huomioon, että keskiarvoon lukeutuu myös yöajan matalammat pitoisuudet, joka laskee keskiarvoa. Kontrolloidumpien käyttötapausten perusteella saadaan todellisempaa tietoa ilmanvaihdon toimivuudesta opetustilanteessa.

8.2 Käyttötapaus 2

Taulukkoon 25. on koottu käyttötapaus 2:n korkeimman ja matalimman ilmavirran datatulokset, rinnakkain taulukkoon jalustakohtaisesti. 21,5 %:n asento vastaa noin 44 l/h/Ilmanmääräsäädin, 100 % vastaa n. 95 l/h/Ilmanmääräsäädin. Yksi ilmanmääräsäädin hallinnoi kolmen päätelaitteen ilmavirtoja. Tällöin tilan ilmanvaihtomäärät ovat kokonaisuudessaan 130 l/s ja 285 l/s.

TAULUKKO 25. Käyttötapaus 2, yhteenveto matalimman ja korkeimman ilmavirran anturidatojen keskiarvoista.

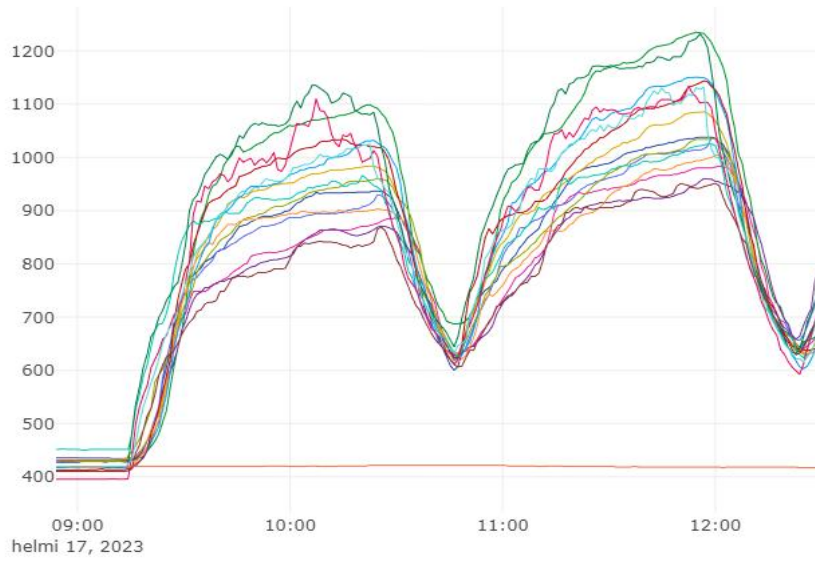
Oleskeluv. jalusta 1	T [° C]		RH [%]		CO ₂ [ppm]		TVOC [ppb]	
	21,5 %	100 %	21,5 %	100 %	21,5 %	100 %	21,5 %	100 %
S21, S24, S31	23,5	22,7	27,6	17,3	843	677	3664	671
Oleskeluv. jalusta 2	21,5 % 100 %		21,5 % 100 %		21,5 % 100 %		21,5 % 100 %	
S16, S22, S26	23,4	22,9	27,2	16,6	793	666	1887	368
Oleskeluv. jalusta 3	21,5 % 100 %		21,5 % 100 %		21,5 % 100 %		21,5 % 100 %	
S25, S28, S33	23,4	22,7	28,0	16,7	839	627	3848	520
Ovenpielija- lusta	21,5 % 100 %		21,5 % 100 %		21,5 % 100 %		21,5 % 100 %	
S17, S23, S27	23,1	22,5	28,6	16,2	916	663	9428	1006

Mittausjalustat sekä anturit olivat samoilla sijoillaan molempien ilmavirtojen testijaksojen aikana.

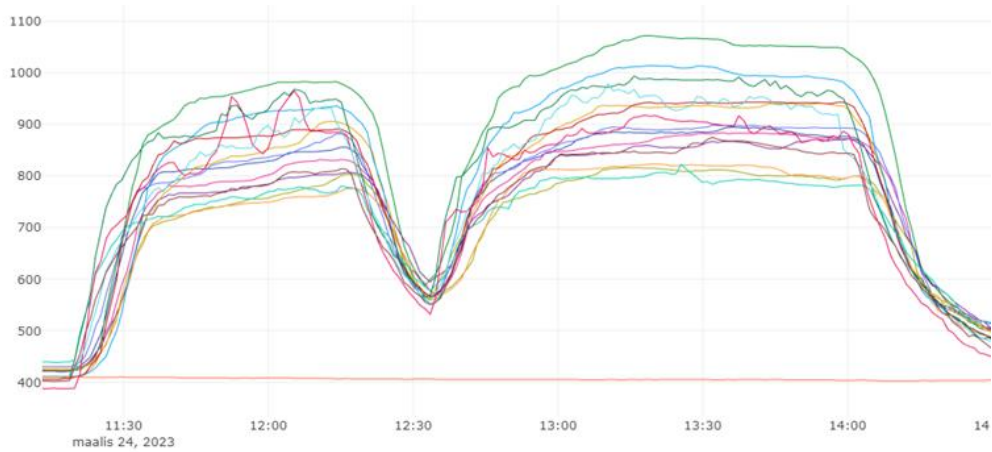
Käyttötapauksen hiilidioksidikuvaajia verrattaessa on havaittavissa, että käyrästön huiput ovat huomattavasti maltillisemmat kuin puolen ilmavirran käyrästä. Kuvissa 15.–17. otteet matalasta, osittaisesta ja korkeasta ilmanvaihtomäärästä.

Kaikkien käyttötapaus 2:n testijaksoissa pidettiin tauko noin puolessa välissä luentoa. Lähtötaso kaikissa käyrästöissä on hyvin lähellä toisiaan, hieman yli 400 ppm. Kuvaajan jyrkkyys testiajanjakson alkaessa vaihtelee, sillä testiryhmän henkilöt ovat saapuneet ja levittäytyneet tilaan lyhyehkön aikavälin sisällä, eivät siis samanaikaisesti.

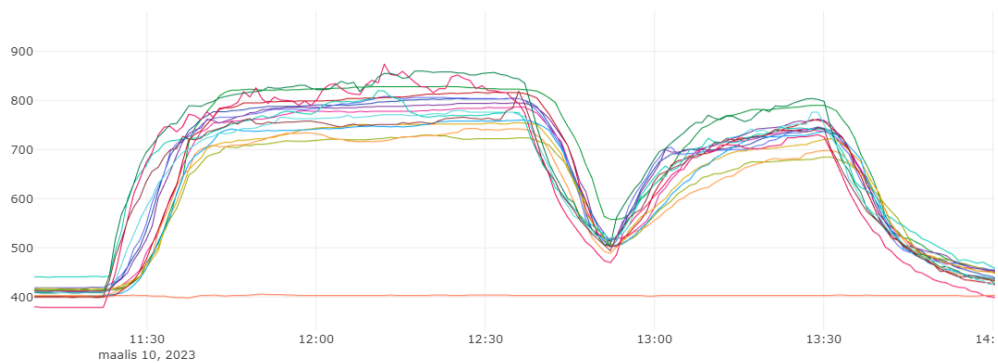
Tauko voi nostaa tai laskea testiryhmän aktiivisuutta, joka on havaittavissa käyrien huippuja tarkastelemalla ennen ja jälkeen tauon.



KUVA 15. Matala ilmavirta, tilan ilmanvaihto 130 l/s. Tilassa 21 hlöä.



KUVA 16. Osittainen ilmavirta, tilan ilmanvaihto 200 l/s. Tilassa 22 hlöä.



KUVA 17. Maksimi ilmavirta, tilan ilmanvaihto 285 l/s. Tilassa 22 hlöä.

Myös kuvioiden hajonta on selkeästi toisistaan erottuva. Ylimmässä kuvassa, vähemmän ilmanvaihtovirran testissä hajonta vaihtelee yli 300 ppm laajuisen alueen sisällä, osittaisella ilmavirralla hajonta pysyy 300 ppm sisällä. Suuremman ilmavirran käyrästä huiput vaihtelevat puolestaan 200 ppm alueen sisällä.

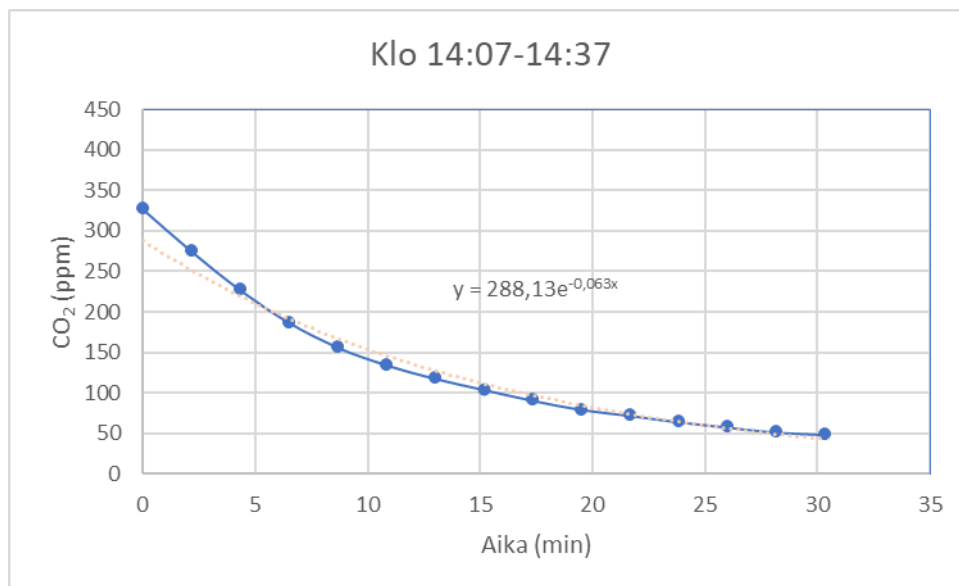
Tarkastellaan tuloksia ilmanvaihtokertoimen kautta, kunkin ilmavirtamäärän kohdalla. Taulukossa 26. ilmanvaihtokertoimet. Luokkatilan pinta-ala on 71,4 m², huonetilan korkeus keskimäärin 2,5 m. Kerroin lasketaan kaavalla 4.

TAULUKKO 26. Käyttötapaus 2:n ilmanvaihtokertoimet ilmamäärien perusteella

Asetus	Tilan ilmanvaihto l/s	Ilmanvaihtokerroin, 1/h	l/s, m ²
Vajaa ilmavirta	130	2,6	1,82...
Osittainen	200	4	2,80...
Maksimi	285	5,7	3,99...

Käyttötapausten eri versioissa toteutuu niin henkilö- kuin neliöperusteisen mitoituksen vähimmäisulkoilmavirrat.

Osittaisen ilmavirran mittausdataa tarkasteltiin data-analyysin avulla. Analyysiin kuului eksponentiaalisen kaavan määrittäminen, sekä logaritmisesta puoliintumisajasta laskenta. Kuvassa 18. tutkimustilan 200 l/s ilmanvaihtomäärän eksponentiaali-käyrä kaavoineen.



KUVA 18. Eksponenttifunktio 200 l/s ilmanvaihtotilanteesta

Pitoisuudesta vähennettiin taustataso (noin 420 ppm), jolloin jäljelle jää tilan käytöstä aiheutunut pitoisuuslisä. Kun käyrän kaava on taulukkotyökalun avulla selvitetty, voidaan laskea myös logaritminen puoliintumisaika. Puoliintumisaikaa tarkasteltaessa luonnollisen logaritmin kantaluuku on 0,5 ja logaritmi jaetaan kantaluuvun e eksponenttifunktiolla (-0,063). Hiilidioksidipitoisuuden puoliintumisajaksi saadaan 11 minuuttia. Tämä tarkoittaa, että hiilidioksidipitoisuus puoliintuu reilussa 10 minuutissa.

Tarkastellaan hiilidioksidipitoisuuksia laskennan avulla. Käyttötapaus 2:n kohdalla voidaan hyödyntää kaavaa 2, kun tilaan johdettu ulkoilmavirta on tiedossa. Esimerkkilasku lasketaan matalimman ilmavirran tiedoilla, jolloin käyttöaste oli 21 henkilöä. Oletetaan henkilökohtaisen hiilidioksidituoton olevan 15,4 l/h, joka vastaisi rauhallista istumista. Vastaavat tulokset kaikista ilmanvaihtoversioista kootaan taulukkoon 27.

$$\Delta C_{CO_2} = \frac{1000 \cdot \left(\frac{323,4 \frac{dm^3}{h}}{130 \frac{dm^3}{s}} \right)}{3,6} \quad (2)$$

$$= 691 \text{ ppm}$$

TAULUKKO 27. Kaavan 2 tarkastellut tulokset käyttötapauksesta 2. Oikeassa reunassa todellisia, mitattuja pitoisuuksia poistoilmakanaviston anturista S11.

Käyttöaste, hlö	CO ₂ -tuotto [l/h]	Ulkoilmavirta [l/s]	ΔC_{CO_2} [ppm]	Ulkoilman oletuspitoisuus (+400ppm)	Todellinen pitoisuus, anturi S11
21	323,4	130	691	1091 ppm	981 ppm
22	338,8	200	470	871 ppm	787 ppm
22	338,8	285	330	730 ppm	708 ppm

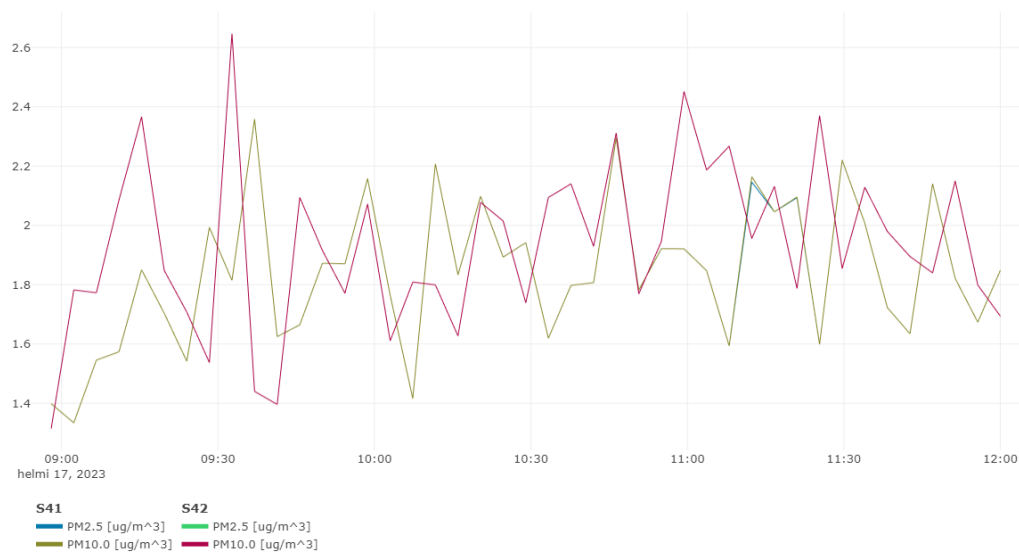
Kun verrataan oletettuja todellisia pitoisuuksia kuvien 15.–17. kuvaajiin, laskennalliset tulokset vastaavat keskimääräisesti kuvaajien pitoisuuksiin. Kuvaajissa

on kuitenkin suuri hajonta, noin 200–300 ppm jokaisessa testiversiossa. Kuvaajista nähdään, että mittausdatassa on myös korkeampia tuloksia kuin poistoilman kanaviston anturista S11 koottu data näyttää.

Laskennallisiin tuloksiin vaikuttaa henkilön hiilidioksidituotto. Taulukon 26. tuloksista voidaan päätellä, että yksilökohtainen tuotto olisi matalampaa kuin 15,4 l/h. Kuvien 15.–17. korkeammat lukemat voivat selittyä antureiden sijoittelulla sekä anturin lähiympäristön aktiivisuudesta, joka ei välttämättä kantaudu poistoilman mittauspisteelle asti, vaan pitoisuus laskee sekoittavassa ilmanjaossa.

8.2.1 Pienhiukkaset

Lisäksi matalimman ilmavirran yhteydessä oli mahdollisuus hiukkaspitoisuuksien mittaukseen. Kuvassa 19. Kahden hiukkasanturin kuvaaja hiukkasten osalta.



KUVA 19. Pienhiukkasten käyrät eroavat eniten sijainnin perusteella

Anturikohtainen hiukkasdata on hyvin samankaltainen, hiukkaskokoa enemmän väliä oli anturin sijainnilla. Anturi S42 sijaitsi oleskeluvyöhykkeellä, lähellä tekstiilipintaista sermiä. S41 poistoilman päätelaitteen läheisyydessä. Tekstiilipinnan läheisyys näyttää vaikuttavan tuloksiin korottavasti. Kuitenkin tavoitearvot tuntuvat alittuvan reippaasti molempien antureiden osalta, niin Sisäilmastoluokituksen kuin Asumisterveysasetuksen annettujen arvojen mukaan. Luokissa S1 ja S2 tavoitteet olivat alle $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Luokassa S3 sekä Asumisterveysasetuksessa alle

25 µg/m³. Muiden käyttötapausten tai ilmavirtojen yhteydessä hiukkaspitoisuuksia ei tarkasteltu.

8.3 Käyttötapaus 3

Käyttötapaus 3 toteutettiin vaihtuvalla ilmavirralla testiajanjaksolla, kun käyttötapaus 2 toteutettiin vakioilmavirroilla. Ilmanvaihto säädettiin niin, ettei hiilidioksiditasot nousisi yli 750 ppm. Taulukossa 28. tulokset vaihtuvan ilmavirran mittauksesta.

TAULUKKO 28. Käyttötapaus 3 datakeskiarvot mittausjalustoittain

Oleskeluv. jalusta 1	T [° C]	RH [%]	CO ₂ [ppm]	TVOC [ppb]
S21, S24, S31	22,8	14,1	733	372
Oleskeluv. jalusta 2				
S16, S22, S26	22,8	13,3	733	287
Oleskeluv. jalusta 3				
S25, S28, S33	22,6	14,0	711	325
Ovenpielijalusta				
S17, S23, S27	22,6	13,7	781	873

Käyttötapaus toteutettiin yhtenäisellä testiajanjaksolla, ilman taukoa, eikä henkilöitä poistunut tilasta ennen testiajanjakson loppupuolta.

Oleskeluvyöhykkeen mittausdatan perusteella vaihtuvan ilmavirran asetus on ollut toimiva. Ainoastaan oven läheisyydessä sijainnut mittausjalusta antaa asetettua arvoa korkeamman lukeman hiilidioksidille. Tämä voi johtua käytävän läheisyydestä, tai ilmanvaihdon päätelaitteiden sijainnista. Mittausjalusta sijaitsee poistoilman päätelaitetta lähempänä kuin tuloilman päätelaitetta. Myös alaslasketun katon vähäisempi ilmatilavuus voi vaikuttaa ilmanvaihdon huuhtelevuuteen.

Tilan käyttöaste oli 27 henkilöä, jolloin hiilidioksidin yhteistuotto on noin 416 l/h. Tuottovirta muutetaan muotoon cm³/s. Rauhallisessa istumisessa yksi ihminen tuottaa hiilidioksidia keskimäärin 15,4 l/h.

Kaavan 1.1 avulla voidaan tarkastella tilaan johdettavan ulkoilmavirran riittävyyttä. Oleskeluvyöhykkeen tavoitearvoksi asetetaan käyttötapausten mukainen 750 ppm, ulkoilman pitoisuus 400 ppm.

$$q_{tulo} = \frac{115,5 \frac{cm^3}{s}}{(750 - 400) \frac{cm^3}{m^3}} \quad (1.1)$$

$$= 0,33 \frac{m^3}{s}$$

Tilan tuloilmavirran tarve laskennallisesti on 330 l/s. Tällöin tilan ilmavaihtokertoimeksi määrittyy 6,6 1/h, ja neliöperusteinen ilmanvaihto 4,6 l/s, m².

Järjestelmän suurin mahdollinen ilmavirta tilan ilmanvaihdolle on 285 l/s, joten laskennallinen tuloilmantarve on hieman suurempi. On kuitenkin huomioitava käyttötapaus 3:n suuri käyttöaste (27 hlöä), hiilidioksidipitoisuuksien ollessa kerätyssä datassa hyvin maltilliset, pääosin alle asetetun 750 ppm. Tästä voidaan päätellä testiryhmän aktiivisuuden olevan alhaisempi, jolloin hiilidioksidituotto on matalampi.

8.4 Poistoilmakanavisto

Tarkastellaan anturikohtaista dataa keskiarvoja tarkemmin. Anturit sijaitsivat eri pisteissä poistoilmakanavistossa. Ilmanjaon ollessa sekoittava, voidaan olettaa poistoilman pitoisuuden olevan lähellä oleskeluvyöhykkeen pitoisuutta. Taulukossa 29. on käyttötapaus 2: anturikohtainen data, kunkin ilmanvaihtoversion testiajalta.

TAULUKKO 29. Ilmavaihtokanaviston anturikohtainen keskiarvodata käyttötapaus 2:n eri ilmanvaihtoversioissa. Anturi S12 on ainoa tuloilmakanaviston anturi. Anturit S11, S13 ja S18 poistoilmakanavasta.

		Anturit			
		CO ₂			
Käyttöaste	Ilmavirta	S11	S13	S18	S12
21 hlö	130 l/s	981 ppm	901 ppm	909 ppm	420 ppm
22 hlö	200 l/s	787 ppm	751 ppm	754 ppm	407 ppm
22 hlö	285 l/s	708 ppm	660 ppm	674 ppm	403 ppm

Taulukossa 30. Käyttötapaus 3:n ilmanvaihtokanaviston keskiarvoinen data jokaiselta anturilta. S12 on ainoa tuloilmakanaviston hiilidioksididataa keräävä anturi.

TAULUKKO 30. Käyttötapaus 3, muuttuva ilmavirta. Ilmanvaihtokanaviston keskiarvoinen anturidata testijaksolta. Anturi S12 on ainoa tuloilmakanavistossa, muut poistoilmakanavistosta.

Käyttöaste	S11	S13	S18	S12
27 hlö	730 ppm	737 ppm	711 ppm	409 ppm

Tarkastellaan molempien käyttötapausten tuloilmatarvetta laskukaavan 1 avulla, jossa yksilökohtainen hiilidioksidin tuotto on 15,4 l/h. Esimerkilaskussa käytetään käyttötapaus 3:n suurinta pitoisuutta, anturin S13 arvoa. Käyttötapaus 2:n osalta tulokset kootaan taulukkoon 30.

$$q_{tulo} = \frac{115,5 \frac{cm^3}{s}}{(737 - 409) \frac{cm^3}{m^3}} \quad (1)$$

$$= 0,352 \dots \frac{m^3}{s}$$

Tilan tuloilmantarve kyseisillä arvoilla olisi noin 352 l/s. Tällöin ilmanvaihtokerroin olisi 7,1 1/h, ja neliöperusteinen ilmanvaihto 4,9 l/s, m².

Taulukkoon 31. kootaan tulokset käyttötapaus 2:n versioiden osalta. Jokaisen ilmanvaihtovirran kohdalla anturi S11 antaa korkeimman pitoisuuslukeman, joka

kolmesta poistoilmakanavan mittauspisteestä sijaitsee keskimmäisenä. Käytetään korkeinta arvoa, sekä ilmavirtakohtaista tuloilmakanaviston anturin pitoisuutta. Täyttöaste käyttötapauksessa 21–22 hlöä.

TAULUKKO 31. Käyttötapaus 2:n tulokset kaavalla 1 tarkasteltuna. S12 kuvaa tuloilmakanaviston pitoisuutta.

S11 Poistoilma	S12 Tuloilma	Tuloilman tarve, laskennallinen l/s	Ilmanvaihtokerroin, laskennallinen 1/h	l/s, m ²
981 ppm	420 ppm	160	3,2	2,2
787 ppm	407 ppm	248	4,9	3,5
708 ppm	403 ppm	309	6,2	4,3

Laskennallisen ilmanvaihtotarpeen lisäksi kaavaa 1 voidaan käyttää myös arvioimaan tilan käyttöastetta, kun todellinen ilmanvaihtovirta, poisto- ja tuloilman hiilidioksidipitoisuudet ovat selvillä. Tarkastellaan tilannetta suurimman todellisen ilmavirran kautta, jolloin tilan ilmanvaihto on 285 l/s, poistoilmakanavan mittauspisteen pitoisuus 708 ppm ja tuloilman pitoisuus 403 ppm.

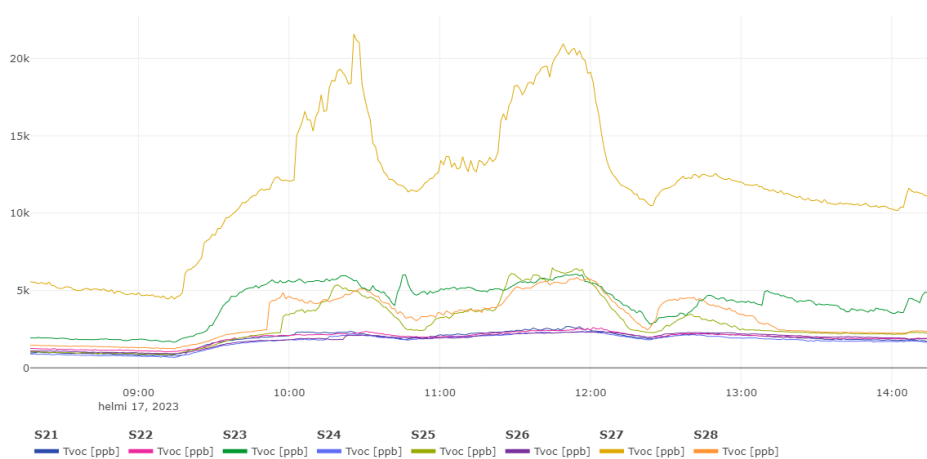
$$\begin{aligned}
 G_{CO_2} &= 0,285 \frac{m^3}{s} \cdot (708 - 403) \frac{cm^3}{m^3} & (1) \\
 &= 86,925 \frac{cm^3}{s} \\
 &= 323,73 \frac{l}{h}
 \end{aligned}$$

Yksilökohtainen hiilidioksidituotto on 22 henkilön testiryhmässä noin 14,7 l/h. Finvacin lähteessä rauhallisen istumisen aktiivisuudesta johtuva tuotto on 15,4 l/h. Kyseessä on opetustilanne, jossa suurin osa tilassa olevista hiilidioksidin tuottajista ovat suurimman osan testiajasta kuuntelevassa roolissa, jolloin vuorovaikutus ja henkilön aktiivisuus on vähäistä. Nämä seikat huomioon ottaen, kirjallista lähdettä alhaisempi tulos voidaan olettaa päteväksi.

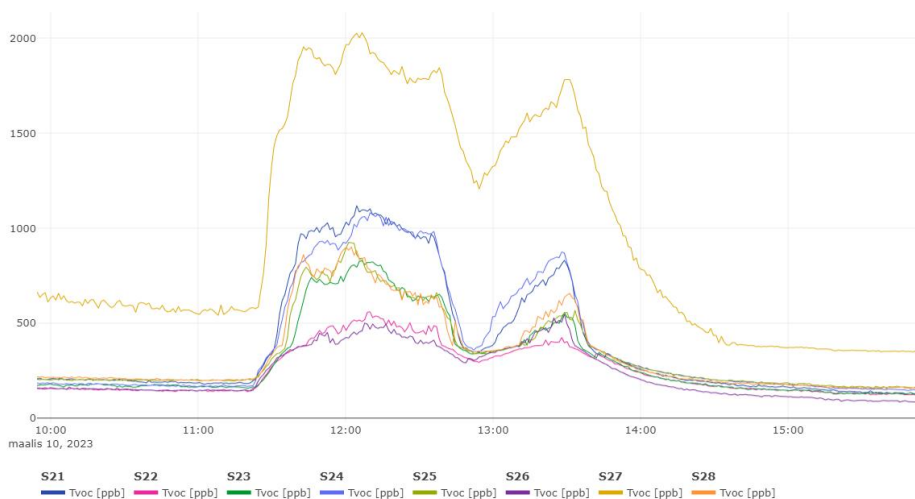
8.5 Kemialliset epäpuhtaudet

Useiden orgaanisten yhdisteiden, kuten aldehydien lähteenä ovat niin ihmisen toiminta kuin sisustus- ja rakennusmateriaalit, ja näissä käytetyt liimat ja sideaineet. Yhdisteitä on lukuisia, eikä tutkimuksen pääpaino ollut näiden tutkinnassa, jonka vuoksi antureiden tarkkuuksissa ei huomioitu kemiallisten epäpuhtauksien tarkempaa havainnointia. Yhdisteet kuitenkin vaikuttavat koettuun sisäilman laatuun.

TVOC-pitoisuudet esiintyivät mittauksissa melko korkeina. Erityisesti lähellä tilan sisäänkäyntiä pitoisuudet olivat korkeina. Kuvissa 20.–21. käyttötapaus 2:n TVOC-graafija matalimmalta ja korkeimmalta ilmapirralla. Molemmissa tapauksissa anturi S27 antaa korkeampaa käyrää muihin verrattuna.



KUVA 20. IMS-asento 21,5 %.



KUVA 21. IMS-asento 100 %.

9 POHDINTA

Hiilidioksiditasot luokkatilassa kuvaavat hyvin ilman vaihtuvuutta. Erot olivat selkeitä tarkasteltaessa eri käyttötapauksia ja ilmavirtoja. Työssä käsiteltiin laajasti myös muita sisäilman laatuun vaikuttavia tekijöitä, mutta merkittävin rooli tutkimuskysymyksen kannalta oli hiilidioksidipitoisuudella.

Infektioriskin madaltamiseksi laadittu ilmanvaihdon mitoitusohje antoi keskikokoiselle luokkatilalle ohjeavoksi ilmanvaihtuvuuskertoimen 4,9 1/h, ja hiilidioksidipitoisuudeksi 962 ppm. Arvot ovat määriteltävissä parhaiten käyttötapaus 2:ssa, ja hiilidioksidipitoisuuden puolesta käyttötapaus 3:ssa.

Infektioriskin voidaan olettaa olevan melko vähäinen käyttötapaus 3:ssa, kun ilmanvaihto oli kuormaan perustuva. Hiilidioksidipitoisuus pysyi hyvin maltillisena koko testijakson ajan, kuitenkin reilusti alle mainitun 962 ppm.

Käyttötapaus 2:n versioissa ilmanvaihtovirroilla oli merkittävin rooli infektioriskin suhteen. Korkeimman ilmavirran tapauksessa ilmanvaihtokerroin oli 5,7 1/h, osittaisella 4, ja matalimmassa 2,6. Tulosten valossa infektioriski on täten suurempi mahdollisuus matalammilla ilmanvaihtovirroilla.

Verrataan yllämainittuja tulostaulukoita 26. ja 31. ilmanvaihtovirran, ilmanvaihtokertoimen ja neliöperusteisen ilmanvaihtomäärän perusteella. Taulukossa 26. ilmanvaihtomäärä saadaan automaatiosta ilmanvaihtoasetusten perusteella, kun taulukossa 31. ilmanvaihdon tarve on saatu laskennallisesti kaavalla 1.

Käyttötapauksessa asetetut vakioilmavirrat ovat laskennalliseen vaihtoilmavirtaan verrattuna hieman vajaat. Neliöperusteiset ilmavirrat ovat suhteellisen samaa luokkaa keskenään. Laskennallisten tuloilmavirtojen perusteella saadut ilmanvaihtokertoimet eroavat 0,5–0,9 verran asetetuista vakioilmavirroista. Kuitenkin molemmat ilmanvaihtokertoimet kuvaavat hyvin tilan ilmanvaihtoa.

Laskennalliset ilmanvaihtotarpeet antavat korkeampia ilmamääriä, sillä yksilöiden hiilidioksidituotto perustuu laskuissa oletuksiin. 15,4 l/h hiilidioksidituotto rauhallisessa istumisessa voi tulla toteen joillakin ihmisillä, toisilla yli tai alle mainitun tuottovirran.

TAULUKKO 26. Käyttötapaus 2:n ilmanvaihtokertoimet ilmamäärien perusteella

Asetus	Tilan ilmanvaihto l/s	Ilmanvaihtokerroin, mitattu 1/h	l/s, m ²
Vajaa ilmavirta	130	2,6	1,82...
Osittainen	200	4	2,80...
Maksimi	285	5,7	3,99...

TAULUKKO 30. Käyttötapaus 2:n tulokset kaavalla 1 tarkasteltuna.

S11 Poistoilma	S12 Tuloilma	Tuloilman tarve, laskennallinen l/s	Ilmanvaihtokerroin, laskennallinen 1/h	l/s, m ²
981 ppm	420 ppm	160	3,2	2,24...
787 ppm	407 ppm	248	4,9	3,46...
708 ppm	403 ppm	309	6,2	4,32...

Ilmanvaihtokerroin vaikuttaa selkeästi tilan huuhtelevuuteen, ja kertoo ilmanvaihdon tehokkuudesta tilan tilavuuteen nähden. Myös sekoittava ilmanjako vaikuttaa koettuun ilman laatuun, sillä sekoittavassa ilmanjaossa ilma sekoittuu nopeasti yhden epäpuhtauslähteen läheisyydessä.

Käyttötapauksia tarkastellessa huomataan myös ilmanvaihtomäärien merkitys verrattuna ihmismäärään. Käyttötapaus 2:n eri ilmanvaihtoversioissa käyttöaste oli suhteellisen sama, 21–22 henkilöä. Hiilidioksidipitoisuudet laskevat selkeästi tilan ilmanvaihtoa lisättäessä.

Käyttötapaus 3:n käyttöaste oli selkeästi suurempi 27 henkilöllä, mutta kuorman mukaan säätyvällä ilmanvaihdolla pitoisuudet pysyivät lähes tavoitteeseen säädetyllä tasolla.

Kun huomioidaan mihin tahansa testitilanteeseen osallistuvan henkilöstön aktiivisuustaso ja tähän perustuva hiilidioksidin tuotto, on mahdollisuus saada hyvä käsitys tilan käyttöasteesta.

LÄHTEET

Aalto- yliopisto Julkisten rakennusten ilmanvaihdon käyttöaikojen vaikutus työolosuhteisiin ja sisäilman laatuun - Työsuojelurahaston hanke 180094. 18.6.2021. Luettu 28.12.2022. <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/108821>

Air0. 2023. Sisäilman mittaus. Luettu 30.11.2022. <https://air0.fi/fi/sisailman-mittaus/>

Asumisterveysasetus, Valvira. Päivitetty 25.4.2016. Asumisterveysasetuksen soveltamisohje, osa 1. PDF-dokumentti. Luettu 4.1.2023

Asumisterveysasetus, Valvira. Päivitetty 8.10.2021. Asumisterveysasetuksen soveltamisohje, osa 3. PDF-dokumentti. Luettu 4.1.2023

EPA. 18.7.2022. Particulate Matter (PM) Pollution. Luettu 19.12.2022 <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>

E3. 2023. Excellence in Pandemic Response and Enterprise Solutions. Luettu 4.11.2022. <https://www.pandemicresponse.fi/>

Finlex. 23.4.2015. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista (545/2015). Luettu 4.1.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150545>

Finvac. 28.1.2020. Opas ilmanvaihdon mitoitukseen muissa kuin asuinrakennuksissa. Luettu 21.1.2023. PDF-dokumentti. <https://finvac.org/iv-opaat/>

Hagner, B. 2019. SuLVI, LVI-historiikki. PDF-dokumentti. Luettu 5.2.2023 <https://sulvi.fi/lvihistoriakooste/>

Harvard T.H. Chan, School of Public Health. 9.9.2021. Office air quality may affect employees' cognition, productivity. Luettu 19.12.2022. <https://www.hsph.harvard.edu/news/press-releases/office-air-quality-may-affect-employees-cognition-productivity/>

Kaila, P. 2010. Talotohtori. Kuudestoista painos. Porvoo: WS BookwellOy.

Pietiko. 2023. Miran DLS IAQ.THb+CO2+DP-lähetin. Luettu 4.1.2023. <https://www.pietiko.fi/tuotteet/langattomat-sisailman-seurantajarjestelmat/miran-dls-loggerit/miran-dls-iaq-thbco2dp-lahetin/>

Pitkäranta, M. 2016. Ympäristöministeriö, Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Luettu 7.12.2022. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/> PDF-dokumentti.

Rakennustieto. N.d. M1-luokitus. Luettu 27.12.2022 <https://www.rakennustieto.fi/palvelut/ymparistopalvelut/m1-luokitus>

Rakennustieto. 22.5.2018. RT 07-11299 Sisäilmastoluokitus 2018 Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Luettu 20.11.2022. PDF-dokumentti. <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/RT%2007-11299>

Saari, S. & Kakko, L. (2021) Poikkitieteellinen tutkimus avainasemassa Covid19-taudin torjunnassa. TAMK-konferenssi – TAMK Conference 2021. Tampereen ammattikorkeakoulun julkaisuja, Erillisjulkaisuja, s. 66–71. PDF-dokumentti. Luettu 28.11.

Sanberg, E. 2016. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät, Ilmastointitekniikka osa 1. Toinen painos. Talotekniikka-Julkaisut Oy

Savuton Suomi. N.d. Aikajana, askel askeleelta savuttomaksi. Luettu 27.2.23. <https://savutonsuomi.fi/kohti-savutonta-suomea/aikajana/>

Scanvac. 9.1.2023. Nordic Ventilation Group, Articles and publications. Luettu 9.4.23. <http://www.scanvac.eu/nordic-ventilation-group-nvg.html>.

Sisäilmayhdistys Ry. 2008. Kemialliset epäpuhtaudet. Luettu 12.12.2022. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Kemialliset-epapuhtaudet>

Sisäilmayhdistys Ry. 2020. Perustietoa sisäilmasta. Luettu 1.12.2022. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Perustietoa-sisailmasta/Epapuhtaudet-ja-niidentorjunta>.

Sisäilmayhdistys Ry. 6.5.2020. Terveelliset tilat. Luettu 28.2.2023. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Ilmanvaihdon-vaikutus>

Sosiaali- ja terveysministeriö. 1.10.2020. HTP-ARVOT 2020: Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja 2020:24. Luettu 27.12.2022. PDF-dokumentti. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162457>

Sosiaali- ja terveysministeriö. 23.4.2015. Asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. Luettu 5.12.2022. <https://www.finlex.fi/fi/laki/smur/2015/20150545>

STUK. 12.01.2023. Suomen radonkartat. Luettu 27.2.2023. <https://www.stuk.fi/aiheet/radon/radon-suomessa/suomen-radonkartat>

Terveyskirjasto. 15.3.2022. Infektioiden tartunta, taudin synty ja leviäminen. Luettu 7.4.2023. <https://www.terveyskirjasto.fi/dlk00569>

THL, 13.5.2022. Sisäilma, mitkä tekijät vaikuttavat sisäilman laatuun? Luettu 6.2.2023. <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/sisailma/mitka-tekijat-vaikuttavat-sisailman-laatuun->

THL. 19.9.2019. Ilmansaasteet, pienhiukkasten vaikutusmekanismit. Luettu 8.2.2023. <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/ilmansaasteet/pienhiukkasten-vaikutusmekanismit>

Työterveyslaitos. N.d. Formaldehydin ja aldehydien analyysi ilmasta. Luettu 20.12.2022. <https://www.ttl.fi/palvelut/laboratoriopalvelut/naytteenotto-ohjeet/formaldehydin-ja-aldehydien-analyysi-ilmasta>

Ympäristöministeriö. N.d. Suomen rakentamismääräyskokoelma, kumotut määräykset ja ohjeet. Luettu 24.3.23. <https://ym.fi/rakentamismaaraykset>

LIITTEET

Liite 1. Kalibrointitodistus 1(2)

VAISALA

Vaisala is ISO 9001, ISO 14001 and
AQAP 2110 certified company.

CALIBRATION CERTIFICATE

This certificate may only be reproduced in full, except with
the prior written permission by the issuing laboratory

Certificate Number: H60-22525110

Juha Hakkarinen

Digitally signed by Juha Hakkarinen
Date: 2022.04.11 12:55:38 (UTC+02)
Location: Vaisala Oyj, Finland

Technician

Instrument CO₂, HUMIDITY AND TEMPERATURE TRANSMITTER GMW95R
Serial number U1510758
GM10 Serial number U08D1510
GM10 Calibration date 22 March 2022
HTM10 Serial number U1430008
HTM10 Calibration date 6 April 2022
Manufacturer Vaisala Oyj, Vanha Nurmijärventie 21, FI-01670 Vantaa, Finland
Manufacturing date 11 April 2022

Carbon dioxide

The carbon dioxide module GM10 was calibrated against accurate carbon dioxide gas concentrations traceable to VSL (Dutch Metrology Institute). Temperature compensation was made by using the compensation algorithm of the module. The ambient pressure and gas temperature values were obtained from a Vaisala PTU30T transmitter. At the time of shipment, the probe met its operating specifications.

The measurement results are traceable to the international system of units (SI) through national metrology institutes (NIST USA, MIKES Finland, or equivalent) or via ISO/IEC 17025 accredited calibration laboratories.

Carbon dioxide calibration results (GM10)

Reference	Observed	Difference	Permissible difference
ppm CO ₂	ppm CO ₂	ppm CO ₂	ppm CO ₂
1000	1007	7	± 36
1990	1992	2	± 52
4980	4979	-1	± 100

Gas cylinders used in calibration

Type	CO ₂ concentration (ppm)	Cylinder number	Reference number
Carbon dioxide mixture (± 0.5 %)	1000	7523112327539	100640335
Carbon dioxide mixture (± 0.5 %)	2000	7523112696020	100638487
Carbon dioxide mixture (± 0.5 %)	5000	7523112332041	100633345

Equipment used in calibration

Type	Instrument number	Calibration date	Certificate number
PTU30T	16875	2022-02-08	K008-F00664

Uncertainties (95 % confidence level, k=2)

±15 ppm @ 0... 1000 ppm, ±20 ppm @ 1000...2000 ppm, ±45 ppm @ 2000... 5000 ppm

Ambient conditions / Humidity 14 ± 5 %RH, Temperature 23 ± 1 °C, Pressure 1027 ± 1 hPa

Liite 1. Kalibrointitodistus 2(2)

Relative Humidity and Temperature

The HTM10 humidity and temperature measurement module was calibrated by comparing the readings of the instrument to factory working standards. The relative humidity readings of the two factory working standards have been calibrated at the Vaisala factory by using dewpoint transfer standard. The dewpoint transfer standard has been calibrated at Centre for Metrology and Accreditation (MIKES) by using primary standard traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST). The measurement results are traceable to the international system of units (SI) through national metrology institutes (NIST USA, MIKES Finland, or equivalent) or via ISO/IEC 17025 accredited calibration laboratories.

Humidity calibration results (HTM10)

Reference humidity* %RH	Observed humidity %RH	Humidity difference %RH	Acceptance limit %RH
0.6	0.6	-0.0	±1.7
40.8	40.4	-0.4	±1.7
75.5	75.5	0.0	±1.7

Temperature calibration results

Reference temperature* °C	Observed temperature °C	Temperature difference °C	Acceptance limit °C
22.8	22.8	0.0	±0.2

*Average of two references

Equipment used in calibration

Type	Instrument number	Calibration date	Certificate number
HMT337 / RH	UH 12934/U	2022-02-17	H59-22070013
HMT337 / RH	UH 12935/U	2022-02-17	H59-22070014
HMT337	UH 12934/T	2021-05-25	K008-E02316
HMT337	UH 12935/T	2021-05-30	K008-E02461

Uncertainties (95 % confidence level, k=2)

Humidity	±1.5 %RH
Temperature	±0.2 °C

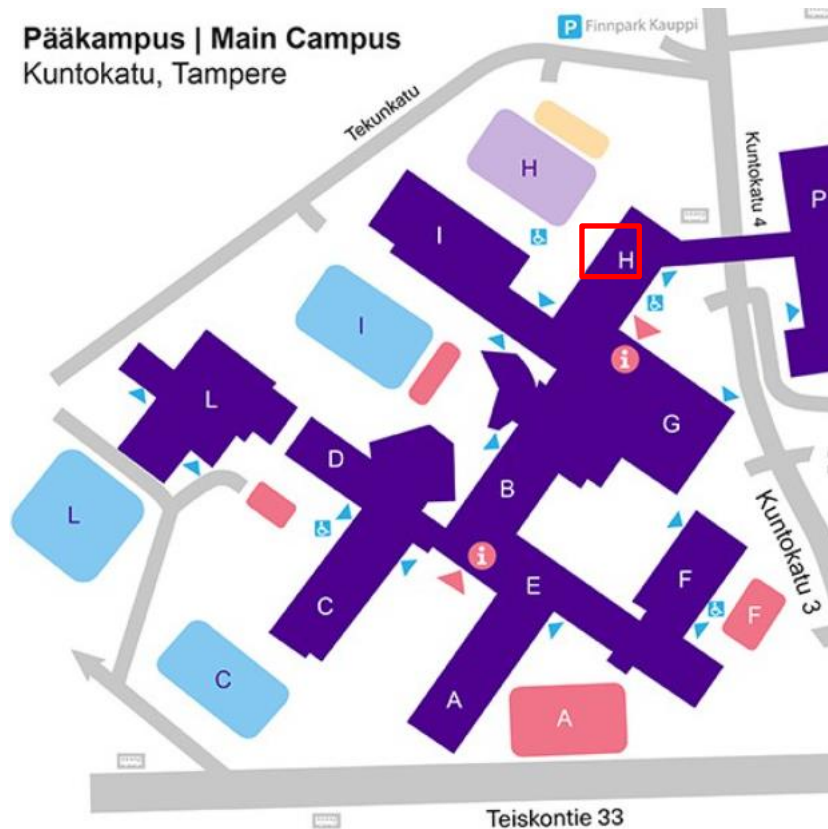
Ambient Conditions / Humidity 32 ± 5 %RH, Temperature 23 ± 1 °C, Pressure 982 ± 1 hPa.

Liite 2. Mittaussuunnitelma H1-24 1(3)

1. Yleistiedot

1.1 Kohde

Tampereen ammattikorkeakoulu, H-siipi, ryhmätyötila H1-24
Kuntokatu 3, 33520 Tampere



Tutkittava luokkatilan suurpiirteinen sijainti merkitty kuvaan punaisella neliöllä

1.2 Tilaaja

Excellence in Pandemic Response and Enterprise Solutions Co-Innovation- tutkimushanke (E3)

Sampo Saari (sampo.saari@tuni.fi)

Jussi-Pekka Juvela (jussi-pekka.juvela@tuni.fi)

1.3 Suunnitelman tekijä

Pia Huhtala (pia.filpus@tuni.fi)

Talotekniikan tutkinto-ohjelma, LVI-talotekniikka 19I253

Liite 2. Mittaussuunnitelma H1-24 2(3)

1.4 Tutkimuksen tavoite

Työn tavoitteena on mittausjakson avulla selvittää tilan käyttöastetta, ja tilan hiilidioksidipitoisuuden perusteella arvioida ilmanvaihdon riittävyys. Työ liittyy E3-hankkeen tutkimuksiin.

1.5 Lähtötietoaineisto

- Katselmuskäynti tilassa 7.12.2022 (PH&JJ)
- Kohteen alkuperäiset RAK- ja LVI-pohjakuvat

2. Tutkimuksen sisältö

Mittausjakson tavoitteena on selvittää aistinvaraisesti sekä hiilidioksidipitoisuuksia mitaten, onko tilan ilmanvaihto riittävä sen päivittäiseen normaalikäyttöön nähden, sisäilman laatu huomioiden.

2.1 Sisäilma

- Ennen kenttämittausten alkua tutustutaan kohteen pohjakuviin
- Huomioidaan käsityökalujen tarve
- Anturit sijoitellaan niin huonetilaan kuin tulo- ja poistoilmakanavaan
- Ulkoilman olosuhteet huomioidaan ja kirjataan
- Aistinvaraiset havainnot kirjataan tarvittaessa
- Tilamittauksessa seurataan: Lämpötila, CO₂, RH, TVOC, hlömäärä
- Luokkatilaan noin 20–30 hlöä, mittaukset suoritetaan muutaman käytötapausten perusteella:

Käyttötapaus 1: "normaali" päiväkäyttö

- o Jatkuva seuranta viikon ajan tilassa sen normaalilla käytöllä
- o Mitataan tilasta 3 eri korkeudelta 4 pisteestä sekä tulo- ja poistoilmakanavasta -> $3 \cdot 4 + 4 = 17$ anturia
- o Anturit viedään tilaan riittävän paljon ennen mittausten aloittamista

Liite 2. Mittaussuunnitelma H1-24 3(3)

Käyttötapaus 2: kontrolloidut tilanteet vakioilmavirralla

- o Vakioilmavirta mittausten aikana
- o Ilmanjako sekoittava
- o Ovi kiinni, kaihtimet osittain auki
- o Rauhallinen työskentely
- o Mitataan tilasta 3 eri korkeudelta 4 pisteestä sekä tulo- ja poistoilmakanavasta
- o Mittaustapahtumien välillä riittävän pitkä aika, että olosuhteet ovat palautuneet
- o täyskapasiteetti (IMS 100 %)
- o puolella kapasiteetilla (IMS 33 %)
- o osakapasiteetilla (IMS 21,5 %)

Käyttötapaus 3: kontrolloidut tilanteet muuttuvalla ilmavirralla

- o Sama kuin käyttötapaus 2, mutta kuormaan perustuva muuttuva ilmavirta
- o $3 \cdot 4 + 4 = 17$ CO₂+T+RH anturia

Tarvittaessa ilmavirtausten suuntaa voidaan havainnoida savumerkkimittauksin. Ilmamäärien riittävyttä arvioidaan mittausjakson perusteella.

Mittaustulokset esitellään opinnäytetyön kappaleessa 6. Tulokset.

Tilaa käyttävien henkilöiden sijainnit kirjataan pohjakuvaan/taulukkokyökaluun. (Vai määritetäänkö paikat?)

Lisätietoja mittaussuunnitelmasta tarvittaessa antaa

Pia Huhtala