

Miika Mustaniemi

**CO<sub>2</sub>-OHJATTU ILMANVAIHTO JA SEN ENERGIANSÄÄSTÖVAIKUTUKSET  
RAITIOVAUNULIIKENTEESSÄ**

**CO2-OHJATTU ILMANVAIHTO JA SEN ENERGIANSÄÄSTÖVAIKUTUKSET  
RAITIOVAUNULIIKENTEESSÄ**

Miika Mustaniemi  
Opinnäytetyö  
Kevät 2023  
Talotekniikka YAMK  
Oulun ammattikorkeakoulu

## TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Talotekniikka YAMK

---

Tekijä: Miika Mustaniemi

Opinnäytetyön nimi: CO<sub>2</sub>-ohjattu ilmanvaihto ja sen energiansäästövaikutukset raitiovaunuliikenteessä

Työn ohjaajat: Kari Heiskari ja Jarkko Hurme

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2023

Sivumäärä: 29+2

---

Opinnäytetyö on tehty Skoda Transtech Oy:n toimeksiannosta. Opinnäytetyössä tutkittiin ja vertailtiin CO<sub>2</sub>-ohjatun tarpeenmukaisen ilmanvaihdon (DCV) ja tavanomaisen alan standardeihin perustuvan vakioilmavirralla (CAV) toimivan ilmanvaihdon eroavaisuuksia sisäilman laadun sekä energiankulutuksen näkökulmasta.

Opinnäytetyössä käsiteltiin raitiovaunujen ilmastoinnin olemassa olevia järjestelmiä sekä teoriaa raitiovaunujen ilmanvaihdon mitoituksesta standardeihin perustuen, sekä ilmanvaihdon mitoittamisesta ihmisten tuottaman hiilidioksidin perusteella. Energian kulutuksen arvioinnissa käytettiin Skoda Transtech Oy:n toimittamaa mittausdataa henkilömääristä, hiilidioksidipitoisuuksista sekä raitisilmapellin avaumasta. Tämän datan perusteella pystyttiin laskukaavoja hyödyntämällä laskemaan CO<sub>2</sub>-ohjatun tarpeenmukaisen ilmanvaihdon ilmavirrat sekä energian kulutus kussakin kuormitustilanteessa.

Laskettuja tuloksia yhden liikennöintivuoron osalta voidaan pitää luotettavina tarkkaan mittausdataan perustuen. Laskelmien perusteella energian säästöä syntyy CO<sub>2</sub>-ohjatun tarpeenmukaisen ilmanvaihdon avulla merkittävästi verrattuna vakioilmavirtajärjestelmään. Suurin hyöty järjestelmästä saadaan, kun raitiovaunu on liikenteessä lämmityskaudella ja vajaalla henkilökuormalla. Vuositason laskelmilla saadut säästöt ovat teoreettisia ja käytännössä saatava energiansäästö on määriteltävä tarkemmilla mittauksilla, joissa huomioidaan vaunukohtaiset henkilömäärien vaihtelut sekä ulkolämpötilaolosuhteiden vaihtelut.

Työssä on käsitelty myös muita ilman epäpuhtauksia, kuten pienhiukkas päästöjä hiilidioksidin ohella, joilla on merkittävä vaikutus terveelliseen ja turvalliseen sisäilman laatuun. Työn tuloksena saatiin selkeä käsitys CO<sub>2</sub>-ohjatun tarpeenmukaisen ilmanvaihdon hyödyistä, kustannuksista sekä energiansäästöstä sekä järjestelmän toiminnan kannalta vaadituista olosuhteista. Salassapitosyistä tutkimuksen tulokset näkyvät vain yrityksen dokumentissa.

---

Asiasanat: CO<sub>2</sub>, ilmanvaihto, raideliikenne

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Masters degree Programme in Building services, option of HVAC

---

Author: Miika Mustaniemi

Title of thesis: CO<sub>2</sub>- on-demand controlled ventilation and its energy-saving effects

Supervisors: Kari Heiskari and Jarkko Hurme

Term and year when the thesis was submitted: spring 2023

Number of pages: 29+2

---

The thesis was commissioned by Skoda Transtech Oy. The aim of the thesis was to investigate and compare the differences between CO<sub>2</sub>-on-demand controlled ventilation (DCV) and ventilation operating with a constant air volume (CAV) system based on conventional industry standards from the perspective of indoor air quality and energy consumption.

The thesis dealt with the existing system of air conditioning in trams, as well as the theory of dimensioning the ventilation of trams based on standards, as well as the dimensioning of ventilation based on the carbon dioxide produced by humans. The measurement data provided by Skoda Transtech Oy was used in the evaluation of energy consumption, e.g. the number of people, carbon dioxide concentrations and the opening of the fresh air damper. Based on this data, it was possible to calculate the air flows and energy consumption of the CO<sub>2</sub>-on-demand controlled ventilation as needed in each load situation by using calculation formulas.

Calculated results for one traffic shift can be considered reliable based on accurate measurement data. Based on the calculations, energy savings are generated with the help of CO<sub>2</sub>-controlled demand ventilation significantly compared to a standard air flow system. The greatest benefit from the system is obtained when the tram is in traffic during the heating season and with a low passenger load. The savings obtained with annual calculations are theoretical, and the energy savings obtained in practice must be determined with more precise measurements, which take into account the variations in the number of people per carriage and the variations in the outside temperature conditions.

The work has also dealt with other air pollutants, such as small particle emissions in addition to carbon dioxide, which have a significant impact on healthy and safe indoor air quality. As a result of the work, a clear understanding of the benefits, costs and energy savings of CO<sub>2</sub>-controlled demand ventilation was obtained, as well as the conditions required for the operation of the system. For reasons of confidentiality, the results of the study can only be seen in the company's document.

---

Keywords: CO<sub>2</sub>, rolling stock, ventilation

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	RAITIOVAUNU .....	7
2.1	Järjestelmäkuvaus .....	7
2.2	Ilmastointijärjestelmän toiminta: lämmitys .....	8
2.3	Ilmastointijärjestelmän toiminta: jäähdytys .....	8
2.4	Ilmastointijärjestelmän toiminta: jarruvastusjärjestelmä.....	8
2.5	Ilmastointijärjestelmän toiminta: ilmanjako .....	9
3	ILMANLAADUN MÄÄRITYS .....	11
3.1	Standardin mukaiset raja-arvot .....	11
3.2	Raja-arvot hiilidioksidipitoisuuksissa.....	17
4	CO <sub>2</sub> -OHJATTU ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄ.....	19
4.1	Raitisilmamäärän mitoitus .....	19
4.2	Hiilidioksidipitoisuuden mittaaminen .....	21
4.3	Muut epäpuhtaudet.....	22
4.4	Vakioilmavirtajärjestelmä.....	23
5	ENERGIANKULUTUSVERTAILU.....	25
6	YHTEENVETO .....	26
	LÄHTEET .....	28
	LIITTEET .....	30

# 1 JOHDANTO

Tässä työssä selvitettiin CO<sub>2</sub>-ohjatun tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän tuomat teoreettiset energiansäästöt raitiovaunuissa. Selvityksessä pyritään myös esittämään tilanteet, joissa järjestelmästä on suurin hyöty. Tarkastelu keskittyy vain Suomessa käytössä oleviin raitiovaunuihin. CO<sub>2</sub>-ohjattu tarpeenmukainen ilmanvaihto ei ole yleistynyt raideliikenteessä samoin kuten rakennuksissa, joten työssä tarkastellaan myös, ovatko rakennusten sisäilman raja-arvot sovellettavissa raitiovaunuihin.

Lähdemateriaalina työssä on käytössä pääasiassa raideliikenteessä käytössä olevia ilmanvaihtoa koskevia standardeja ja määräyksiä sekä Skodalta saatua mittausdataa, spesifikaatioita ja tutkimustuloksia. Tämän työn tutkimustulosten tarkoitus on auttaa raitiovaunujen loppukäyttäjää vähentämään raitiovaunujen ilmanvaihtojärjestelmien energiankulutuksesta syntyviä kustannuksia sekä parantamaan sisäilman laatua.

Opinnäytetyön alussa tarkastellaan raitiovaunujen perustietoja sekä järjestelmäkuvausta. Kolmannessa luvussa käsitellään CO<sub>2</sub>-ohjatun ilmanvaihtojärjestelmän toimintaa, komponentteja sekä mitoitusta. Lopuksi tarkastellaan teoreettisella tasolla CO<sub>2</sub>-ohjatun ilmanvaihtojärjestelmän tuomia säästöjä sekä sisäilmanlaadun muutoksia. Salassapitosyistä tutkimuksen tulokset näkyvät vain yrityksen dokumentissa.

## 2 RAITIOVAUNU

Tässä luvussa käsitellään raitiovaunujen teknisiä ominaisuuksia. Vaunujen valmistaja on Skoda Transtech Oy ja vaunut ovat kolmiosaisia ja kahteensuuntaan ajettavia. Pääasiallisena lämmitysmuotona vaunuissa on sähköinen lattialämmitys ja ilmalämmitys.

Vaunujen päämitat ovat seuraavat:

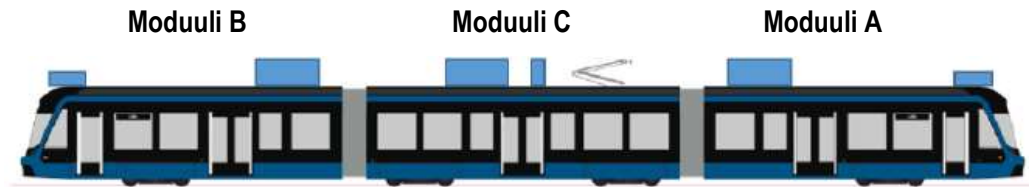
- Pituus: 37,3 m
- Matkustamon kokonaispinta-ala: 338,1 m<sup>2</sup>
- Taarapaino 56,8 t.
- Suurin matkustajakapasiteetti: 261 hlö = 4 hlö/m<sup>2</sup>
- Istumapaikkoja: 104.

Raitiovaunujen ilmanvaihtojärjestelmä on CO<sub>2</sub>-ohjattu järjestelmä, missä raitiovaunun ulkoilmavirran määrää säädetään sisäilman CO<sub>2</sub>-pitoisuuden mukaan. Vakioilmamäärällä toimivassa ilmanvaihdossa raitisilmamäärä pysyy muuttumattomana ja määräytyy standardeissa annettujen raja-arvojen perusteella.

### 2.1 Järjestelmäkuvaus

Kuvassa 1 on esitetty vaunujen matkustamo-osan ilmastointi- ja lämmityslaitteisto, joka koostuu kolmesta erillisestä, raitiovaunun katolle asennettavasta yksiköstä. Kukin yksikkö on vaunukohtainen. Ohjaamoilla on oma erillinen ilmastointilaitteensa. Ilmastointilaitteistot pyrkivät pitämään matkustamon lämpötilan asetusarvossaan jäähdyttäen tai lämmittäen matkustamoautomaattisesti. Ilmanvaihtolaitteistot käyttävät suodatettua raitisilmaa sekä kiertoilmaa vaunun sisältä. Raitis- ja kiertoilma sekoittuvat toisiinsa ilmansekoituskammiossa, josta ilma johdetaan ilman käsittelyn läpi vaunun kanavistoon (1, s. 86.). Raitisilman määrä säätyy jokaisen moduulin keskimääräisen CO<sub>2</sub>-määrän ja ulkoilman lämpötilan mukaan raitisilmapellin avulla, jonka avaumalle on ennalta asetettu ylä- ja alarajat. Mikäli CO<sub>2</sub>-taso nousee asetusarvon yläpuolelle, raitisilmapellin avaumaa säädetään ja raitisilmamäärää kasvatetaan. Raitisilmapellin säätöalueella on hiilidioksidipitoisuudelle ylä- ja alarajat, joiden mukaan raitisilmapelti on auki alarajalla tai vastaavasti hiilidioksidipitoisuuden ollessa korkea, on raitisilmapelti auki asetusarvon ylärajalla.

Sääto toimii portaattomasti raitisilmapellin säätöalueella.. Mikäli CO<sub>2</sub>-taso nousee yli asetetun hiilidioksidipitoisuuden ylärajan, on raitisilmapelti kokonaan auki. CO<sub>2</sub> -tasoa seurataan antureilla, jotka on sijoitettu ilmastointikoneiden kiertoilmakanaviin. Raitisilmamäärän mitoitusilmavirta on 8 m<sup>3</sup>/h/hlö, mutta raitisilman määrää vähennetään CO<sub>2</sub>- tason mukaan. (3, s. 21).



KUVA 1. Ilmastointilaitteiden sijainti raitiovaunussa (2, s. 9.)

## 2.2 Ilmastointijärjestelmän toiminta: lämmitys

Pääasiallisena lämmitystehon lähteenä vaunuissa käytetään jarrutuksista saatavaa energiaa, jota ohjataan jarruvastuksista sisälle vaunuun tai ulkoilmaan. Raitisilmalaitteissa on lisäksi sähköiset lämmitysvastukset, joiden energia otetaan ajolangasta. Lämmitysvastukset otetaan käyttöön, mikäli jarruvastuksilta saatava lämmitysenergia ei riitä tai jarruvastus on vikatilassa (1, s. 87). Raitiovaunun lämmitys mitoitetaan siten, että matkustamossa on vähintään +15 °C:n lämpötila ulkoilman lämpötilan ollessa –25 °C. (3, s. 21).

## 2.3 Ilmastointijärjestelmän toiminta: jäähdytys

Mikäli vaunun sisälämpötila ylittää asetetun tavoitelämpötilan, laitteisto käynnistää automaattisesti jäähdytystoiminnon. Laitteiston raitisilmanottoa säädetään portaattomasti muuttamalla raitisilmapellin asentoa. Säädön tavoitteena on parantaa ja optimoida energiankulutus, sekä mahdollistaa laitteen käyttö parhaalla käyntiolosuhdealueella (1, s. 87). Jäähdytyspiirin kytkentäkaavio on esitetty liitteessä 1. Liite 1 on piilotettu salassapitovelvollisuuden takia.

## 2.4 Ilmastointijärjestelmän toiminta: jarruvastusjärjestelmä

Järjestelmässä on kahdentyyppisiä jarruvastuksia:

- nestelauhdutteiset jarruvastukset

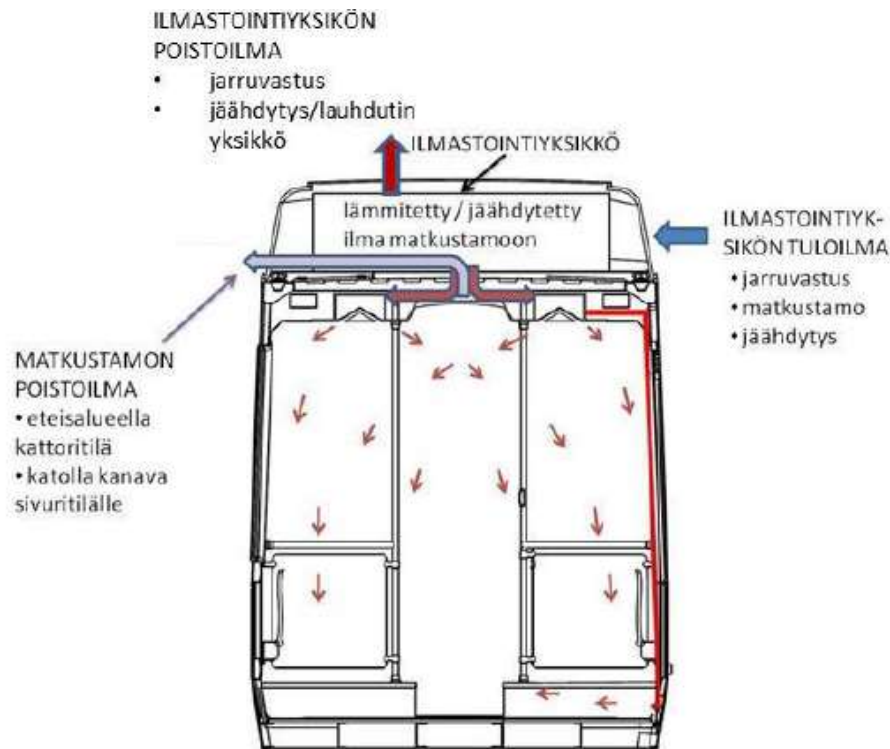


- ilmalauhdutteiset jarruvastukset

Ylimääräistä ilmalauhdutteista jarruvastusyksikköä käytetään parhaan redundanssi, eli varmuustason saavuttamiseksi. Ilmalauhdutteinen jarruvastusyksikkö sijaitsee ainoastaan C-moduulin katolla. Vaunun jarrujärjestelmä koostuu mekaanisista jarruista ja sähköjarruista. Sähköjarrua käytettäessä ajomoottoreista syntyvä energia ohjataan ilmastointikoneissa sijaitseviin sähköisiin jarruvastuksiin. Jokaisen matkustamon erillinen ohjauskeskus ohjaa itsenäisesti laitteiston jarruvastusjärjestelmää (1, s. 87).

## 2.5 Ilmastointijärjestelmän toiminta: ilmanjako

Matkustajatilan LVI-laitteiden tuloilma koostuu matkustajatilan kiertoilmasta ja ulkoilmasta. Tuloilmaa lämmitetään tai jäähdytetään tarvittaessa ja puhalletaan matkustajatilan jakelukanaviin. Katon molemmilla puolilla on jakelukanava tuloilmaa varten. Jakelukanavat esitetty kuvassa 3.



KUVA 2. Ilmanjaon periaatekuva (1, s. 88.)

Kanavat sijaitsevat pituussuunnassa ja ulottuvat päästä toiseen. Tuloilma ohjataan sivuikkunoihin. Lisäksi tuloilma ohjataan myös lattiatasolle lähelle vaunuvälejä. Kiertoilma johdetaan kattotasolta

HVAC-yksikköön. HVAC-yksikkö säätää jatkuvasti kiertoilman ja raitisilman sekoitussuhdetta pitääkseen olosuhteet miellyttävinä ja vaatimusten mukaisina. Tuloilma sisältää aina jonkin verran raitista ilmaa, joten raitiovaunu on ylipaineistettu ulkoilmaan verrattuna. Raitisilma johdetaan suodattimen läpi. Pienen ylipaineen vuoksi raitiovaunulla on poistoilmareitit katon läpi. Poistoilma ohjataan raitiovaunujen sivuille sääsäleikön kautta (2, s. 14 - 15). Ilmastointikanaviston periaatekuva on esitetty liitteessä 2. Liite 2 on piilotettu salassapitovelvollisuuden takia.

### 3 ILMANLAADUN MÄÄRITYS

Suomessa käytössä olevat standardit ja asetukset ohjaavat rakennusten ja raideliikenteen ajoneuvojen sisäilmaolosuhteiden määrittämistä. Standardit ja asetukset, kuten ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta, ohjaavat suunnittelua siten, että rakennukset ja ajoneuvot ovat käyttäjien kannalta turvallisia ja terveellisiä ympäristöjä. Tämä kappale keskittyy ilmanlaadun osalta vain raitisilmamäärän ja hiilidioksidipitoisuuden raja-arvoihin sekä lämpötilaan. Sisäilmaolosuhteisiin ja viihtyvyyteen vaikuttaa myös paljon muita tekijöitä kuten; kosteus, äänitasot, haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC), valaistus, lämpösäteily ja veto. Näitä muuttujia ei kuitenkaan huomioida tämän työn sisäilman laatuun liittyvissä analyyseissä.

#### 3.1 Standardin mukaiset raja-arvot

Lähi- ja kaupunkiliikenteen liikkuvan kaluston ilmastoinnin parametreja ohjaa eurooppalainen standardi EN 14750-1. Standardi on vahvistettu suomalaisiksi kansalliseksi standardiksi (4, s. 1). Lisäksi on käytössä Eurooppalainen standardi 14750-2, joka käsittelee lähi- ja kaupunkiliikenteen liikkuvan kaluston tyyppitestausta. Standardi on vahvistettu suomalaisiksi kansalliseksi standardiksi (5, s. 1). Tässä luvussa keskitytään pääosin standardin EN14750-1 parametreihin.

Uudisrakentamisen sekä rakennusten laajennusten sisäilmaolosuhteiden vähimmäisvaatimukset on määritetty ympäristöministeriön asetuksessa 1009/2017 uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. Asetus korvasi Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D2- rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto vuonna 2017 (7). Lisäksi Sisäilmayhdistys ry on kehittänyt asetuksiin ja standardeihin perustuvan sisäilmastoluokituksen, missä on esitetty ilmanlaadun tavoitearvoja. Sisäilmastoluokitus ei korvaa asetuksia ja standardeja, mutta toimii laajasti täydentävänä työkaluna ilmanvaihdon suunnittelussa. (8).

Lähi- ja kaupunkiliikenteen standardi 14750-1 sisältää matkustajien ja työntekijöiden ilmastoinnin mukavuusparametrit, mittausmenetelmät sekä ohjeistuksia ilmastoinnin toiminnallisuuksiin. Standardi asettaa toiminnallisuksille vähimmäisvaatimukset. Tapauskohtaisilla sopimuksilla ja spesifikaatioilla toiminnallisuus- ja parametritarkkuutta voidaan parantaa (4, s. 5).

Standardin mukaan määritellään ajoneuvon luokitus kategoriaan A tai kategoriaan B. Tilaajan toimittaman spesifikaation tulee määrittää ajoneuvon matkustajamäärät normaalikäytössä sekä mahdolliset muut olennaiset asiat liittyen ilmastointijärjestelmän kapasiteetin mitoitukseen. Mikäli näitä tietoja ei ole toimitettu, sovelletaan matkustajamitoitusta siten, että kaikki istumapaikat ovat täynnä ja seisomapaikoilla on neljä matkustajaa per neliometri. Yleisesti lähijunat- ovat kategorian A ajoneuvoja ja kategorian B ajoneuvot raitiovaunuja. Mikäli kategorian A ajoneuvossa keskimääräinen matkustusaika ylittää yhden tunnin, voi olla tarpeen soveltaa rautatiekaluston ilmastoinnin ja mukavuusparametrien standardia SFS-EN 13129:2016. Taulukossa 1 on esitetty ajoneuvoluokituksen määrittäviä parametrejä.

TAULUKKO 1. Ajoneuvoluokitus (4, s. 10).

	Kategoria A	Kategoria B
Seisovat matkustajat	< 4 matkustajaa/m <sup>2</sup>	< 4 matkustajaa/m <sup>2</sup>
Keskimääräinen matkustusaika	> 20 min	≤ 20 min
Keskimääräinen matkustusaika pysäkkien välillä	> 3 min	≤ 3 min

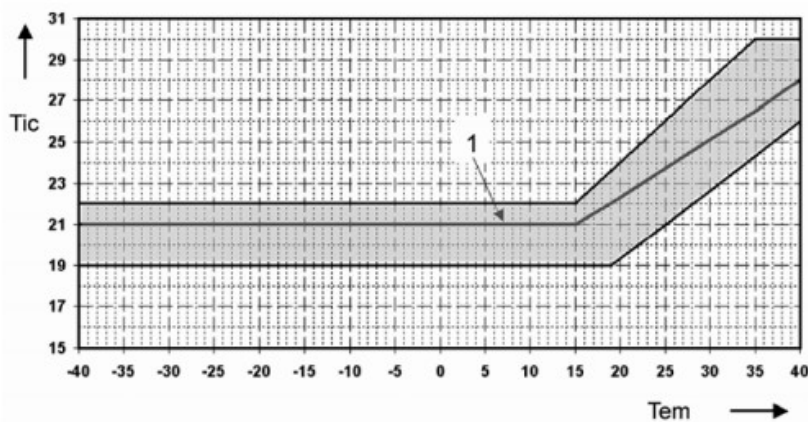
Standardissa on jaettu kesälle ja talvelle erikseen kolme ilmastoaluetta, joihin sisältyy alueelle tyypillinen ulkolämpötila, suhteellinen kosteus sekä auringon säteilyn voimakkuus. Vyöhykkeet on esitetty taulukossa 2. Suomi on luokiteltu kuuluvaksi ilmastoluokkaan III sekä kesällä että talvella (4, s. 23). Ilmastointi- ja lämmityslaitteisto on mitoitettava toimimaan ilmastovyöhykkeiden mukaisissa ääritilanteissa. Pieni lämpöihtyvyyden poikkeama ääritilanteissa on sallittua kuitenkin siten, että B kategorian raitiovaunun sisällä on vähintään 10 °C lämmintä ääritilanteessa. Sopimuksissa määritellään sisälämpötilojen säätökäyrät sekä mitoituksilämpötilat. Säätökäyristä voidaan poiketa standardin määrittelemissä puitteissa.

TAULUKKO 2. Ilmastovyöhykkeet (4, s. 22).

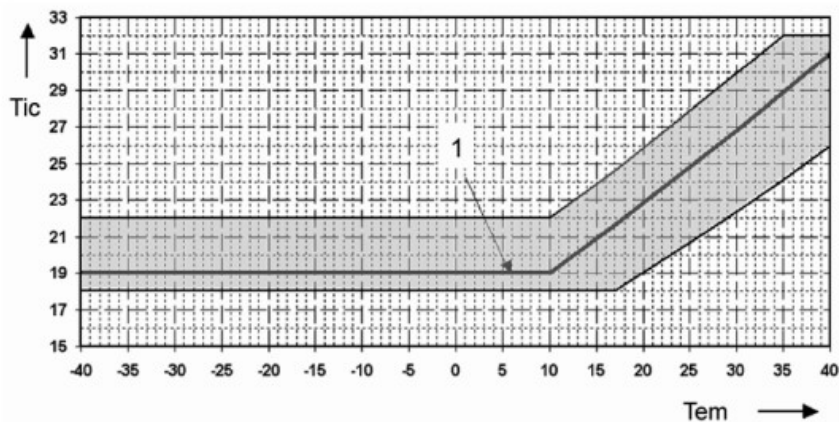
Vyöhyke (talvi)	Minimi ulkolämpötilat (°C)
I	-10
II	-20
III	-40

Vyöhyke (kesä)	Minimi ulkolämpötilat (°C)	Suhteellinen kosteus (%)	Auringon lämpökuorma (W/m <sup>2</sup> )
I	40	40	800
II	35	50	700
III	28	45	600

Standardi 14750-1 määrittää raitiovaunun sisälämpötilan säädettäväksi kuvassa 5 olevien säätökäyrien mukaisesti, ajoneuvon kategorian mukaan (4. s, 17). Mikäli tilaajalla ei ole tapauskohtaisia vaatimuksia säätöalueeseen. Ilmastointi- ja lämmityslaitteiden tulee toimia kuvassa 5 esitetyllä vaihteluvälillä siten, että ilmastovyöhykekohtaiset vaatimukset täyttyvät. Säätökäyrällä Tic kuvaa tavoiteltua sisälämpötilan keskiarvoa, Tem ulkolämpötilan keskiarvoa ja numero 1 suosituskäyrää riippuen ajoneuvon kategoriasta. Lämpötilojen säätökäyrissä esitetyt numeroarvot ovat celsiusasteina.



KUVA 5. Sisälämpötilan säätökäyrä, kategori A (4, s. 17).



KUVA 6. Sisälämpötilan säätökäyrä, kategori B (4, s. 17).

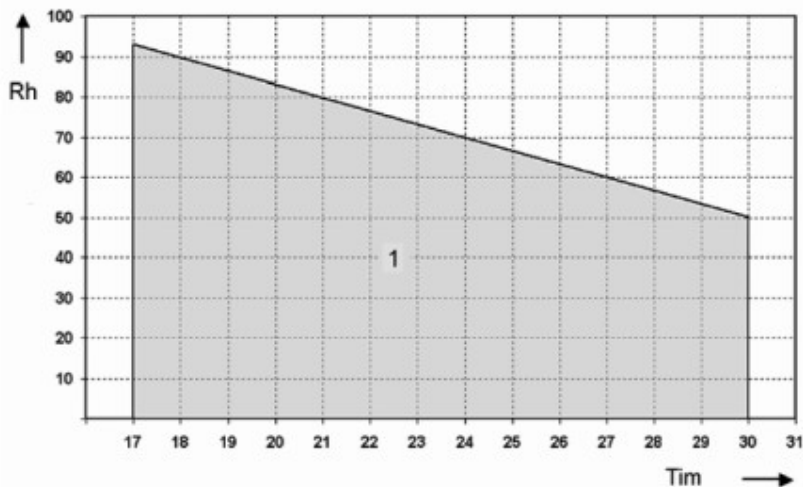
Alla on esitetty kuvan 6 suureiden selitteet:

- Tem Ulkolämpötilan keskiarvo (°C)
- Tic Tavoiteltu sisälämpötilan keskiarvo (°C)
- 1 Suosituskäyrä kategorian A ajoneuvoille

Jäähdytystilanteessa ulkolämpötilaolosuhteiden ollessa ilmastovyöhykkeiden raja-arvojen mukaiset, raitiovaunun ollessa paikallaan normaalilla matkustajakuormituksella ja huomioiden auringon tuottama lämpökuorma, sisälämpötilan keskiarvon tulee olla sama tai pienempi kuin kuvassa 7 esitettyssä taulukossa. Suhteellisen kosteuden tulee pysyä kuvassa 8 tai 9 esitetyn harmaan alueen sisällä riippumatta sisätilojen lämpötilasta ja ajoneuvon kategoriasta.

TAULUKKO 3. Sisälämpötilojen raja-arvot jäähdytyksen mitoitustilanteessa (4, s. 11).

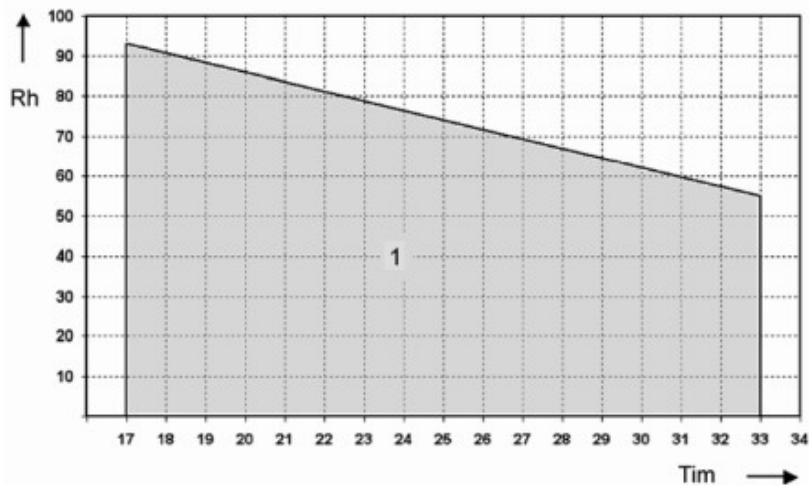
Vyöhyke (kesä)	Kategoria A (°C)	Kategoria B (°C)
I	30	32
II	30	33
III	26	29



KUVA 7. Hyväksyttävän suhteellisen kosteuden käyrä, kategoria A. Numeroarvot käyrän pystyakselilla suhteellisen kosteuden prosentti ja vaaka-akselilla lämpötila celsius-asteina. (4, s. 20).

Alla on esitetty kuvan 7 suureiden selitteet:

- Rh Suhteellinen kosteus (%)
- Tim Sisälämpötilan keskiarvo (°C)
- 1 Sallittu suhteellisen kosteuden alue



KUVA 8. Hyväksyttävän suhteellisen kosteuden käyrä, kategoria B (4, s. 20).

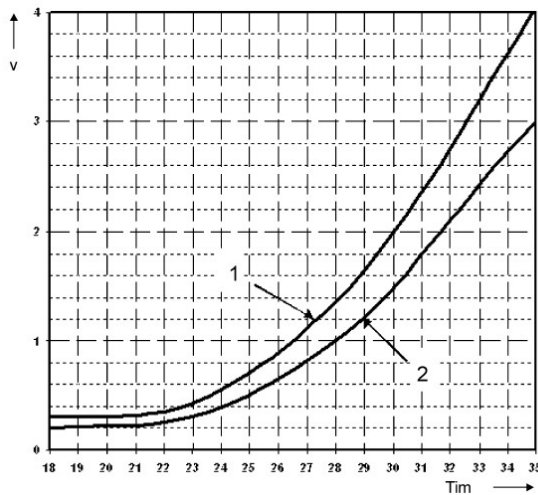
Alla on esitetty kuvan 8 suureiden selitteet:

- Rh Suhteellinen kosteus (%)
- Tim Sisälämpötilan keskiarvo (°C)
- 1 Sallittu suhteellisen kosteuden alue

Standardissa 14750-1 määritellään vaunuun syötettävän raitisilman määrä vaunun henkilömäärän sekä ajoneuvon kategorian perusteella. Mikäli tietyt kansalliset olosuhteet vaativat standardista poikkeavia ilmamääriä, on nämä määriteltävä ajoneuvon teknisissä spesifikaatioissa ja sopimusasiakirjoissa.

Kategorian A ajoneuvoissa raitisilmamäärä henkilöä kohden on 15 m<sup>3</sup>/h/matkustaja. Raitisilmamäärää voidaan rajoittaa 10 m<sup>3</sup>/h/matkustaja, mikäli lämmityksen ja jäähdytyksen suorituskyky vaatimukset täyttyvät. Raitisilmamäärää voidaan tarvittaessa nostaa korkeammaksi, mikäli ilman nopeuden maksimi raja-arvot eivät ylitä. Kategorian B ajoneuvoissa raitisilmamäärä henkilöä kohden on 12 m<sup>3</sup>/h/matkustaja. Raitisilmamäärää voidaan rajoittaa 8 m<sup>3</sup>/h/matkustaja, mikäli lämmityksen ja jäähdytyksen suorituskyky vaatimukset täyttyvät. Raitisilmamäärää voidaan

tarvittaessa nostaa korkeammaksi, mikäli ilman nopeuden maksimi raja-arvot eivät ylity. Ilman nopeuden raja-arvot on esitetty kuvassa 10. Hyväksyttävät ilmannopeudet eri sisäpuhalluslämpötiloissa on esitetty kuvassa 11. Taulukko käännetty suomeksi englannin kielsiestä standardista (4, s. 24). Ilmastointijärjestelmässä voidaan hyödyntää kiertoilmaa energian säästämiseksi sekä ilmanvaihdon varmistamiseksi, mikäli ilmastointijärjestelmässä on mahdollista sulkea raitisilmanotto väliaikaisesti mahdollisen haitan vuoksi. Kuvan 9 pystyakselilla numeroarvot ovat ilman nopeus metreinä sekunnissa ja vaaka-akselilla olevat numeroarvot lämpötilan arvot celsius-asteina.



KUVA 9. Ilman nopeuden raja-arvot (4, s. 18).

Alla on esitetty kuvan 9 suureiden selitteet:

- Tim Sisälämpötilan keskiarvo (°C)
- v Ilman nopeus, (m/s)
- 1 Ilman maksiminopeus ilmalämmitykselle kategorian B ajoneuvoissa
- 2 Ilman maksiminopeus kategorian A ajoneuvoissa

TAULUKKO 4. Hyväksyttävät ilmannopeudet eri lämpötiloissa (4, s. 19).



Tim (°C)	Kategoria A (m/s)	Kategoria B (m/s)
+18	0,2	0,3
+22	0,3	0,4
+25	0,5	0,7
+28	1,0	1,4
+30	1,5	2,0
≥+35	3,0	4,0

### 3.2 Raja-arvot hiilidioksidipitoisuuksissa

Suomessa hengitysilman HTP-arvot on määrittänyt sosiaali- ja terveysministeriö. HTP-arvot eli haitalliseksi tunnetut pitoisuudet ovat hengitysilmaan sisältyviä terveydelle ja turvallisuudelle haitallisia epäpuhtauksia. Altistuminen tapahtuu yleensä hengittämällä ainetta elimistöön. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisun mukaan hiilidioksidin HTP-arvo on 5000 ppm kahdeksan tunnin altistumisajalla (9, s. 38). Rakentamisessa hiilidioksidipitoisuuden suunnitteluarvoina käytetään sisäilmastoluokitus 2018 mukaisia raja-arvoja. Liikennevälineissä näiden suunnitteluarvojen soveltaminen ei kuitenkaan ole kohtuullista eivätkä alan standardit näitä edellytä. Ilmastoinnin mitoituksen pääparametrit ovat jäähdytys ja lämmitys sekä kosteuden hallinta, mahdollinen hiilidioksiditason hallinta on määriteltävissä sopimusteknisesti, mikäli hiilidioksiditason hallintaan halutaan puuttua. Rajoittavana tekijänä toimivat kuitenkin annetut HTP-arvot, jotka on määritetty terveysperusteisesti eivätkä ole riippuvaisia käyttökohteista.

Sisäilmastoluokitus 2018:ssa määritetyt hiilidioksidipitoisuustavoitteet koskevat ihmisperäistä hiilidioksidia rakentamisessa. Luokitukset ovat kolmessa eri laatuluokassa, S1: Yksilöllinen sisäilmasto, S2: Hyvä sisäilmasto ja S3: Tyydyttävä sisäilmasto. Jokaisessa luokassa on sisäilman hiilidioksidipitoisuudelle omat tavoitearvot. Hiilidioksidipitoisuuden tavoitearvo S1- luokassa on alle 750 ppm, S2 luokassa alle 950 ppm ja S3 luokassa alle 1200 ppm. Olosuhteiden pysyvyyttä tarkastellaan yhden tunnin liukuvan keskiarvon mukaan kaavalla 1. Pienhiukkasten tavoitearvo on keskimääräinen pitoisuus sisäilmassa 24 tunnin mittauksen aikana (8, s. 7). Liukuvan keskiarvon laskentamenetelmä on keskiarvo tietyltä aikaväliltä. Esimerkiksi CO<sub>2</sub>-pitoisuuden 24 tunnin liukuva keskiarvo on CO<sub>2</sub>-pitoisuuden keskiarvo 24 tunnin ajalta. Kun keskiarvoa seurataan liukuvasti, lisätään laskentaan tunnin välein uusi arvo ja poistetaan laskennasta summalaskennan ensimmäinen arvo.

$$S_2 = \frac{1}{2} (a_1 + a_2, a_2 + a_3, \dots, a_{n-1} + a_n)$$

$$S_3 = \frac{1}{3} (a_1 + a_2 + a_3, a_2 + a_3 + a_4, \dots, a_{n-2} + a_{n-1} + a_n).$$

$$s_i = \frac{1}{n} \sum_{j=i}^{i+n-1} a_j.$$

*Kaava 1 Liukuvan keskiarvon laskenta (11.)*

Ympäristöministeriön asetuksessa 1009/2017, momentin 5 mukaan sisäilmassa ei saa esiintyä terveydelle haitallisessa määrin hiukkasmaisia epäpuhtauksia, fysikaalisia, kemiallisia tai mikrobiologisia tekijöitä eikä viihtyisyyttä jatkuvasti heikentäviä hajuja.

Sisäilman hiilidioksidin hetkellisen pitoisuuden suunnitteluarvo huonetilan suunniteltuna käyttöaikana voi olla enintään 1 450 mg/m<sup>3</sup> (800 ppm) suurempi kuin ulkoilman pitoisuus. Tämä vastaa sisäilmastoluokituksen tasoa S3. (7.)

Ulkoilman CO<sub>2</sub>- pitoisuus on keskimäärin 400 ppm. Ulkoilman hiilidioksidi pitoisuus kuitenkin kasvaa 2 ppm vuodessa, joten tämä on syytä huomioida pitkän aikavälin mitoituksissa. Oletusarvona mitoituksessa voidaan käyttää 400 ppm, mikäli tarkempaa arvoa ei tunneta (10, s. 8).

## 4 CO<sub>2</sub>-OHJATTU ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄ

CO<sub>2</sub>-ohjatun ilmanvaihtojärjestelmän peruseriaatteena on säätää ulkoilmamäärää tarpeen mukaan. Tarpeen mukaisen säädön avulla voidaan saavuttaa energiasäästöjä sekä parantaa sisäilman laatua ja tilan viihtyvyyttä ja taata näinollen terveellinen ja turvallinen ympäristö ilmanvaihdon näkökulmasta. Tässä luvussa perehdytään raitisilmamäärän mitoitukseen CO<sub>2</sub>-pitoisuuksien perusteella.

### 4.1 Raitisilmamäärän mitoitus

Ihmisen hiilidioksidin tuotto voidaan määrittää henkilön pituuden ja painon perusteella kaavalla 5. Kaavan lukuarvot ilman yksikköä ovat kokemuseräisiä arvoja. Kaavassa RQ on hengitysosamäärä, joka kuvaa ihmisen hiilidioksidin tuoton ja hapenkulutuksen suhdetta. Hengitysosamäärän arvo vaihtelee 0,7-1,0 välillä. Mitoituksessa käytetään standardiarvoa 0,83. M kerroin kuvaa ihmisen fyysistä aktiivisuutta (met). Kerroin vaihtelee välillä 0,8-7,0. Raitiovaunuliikenteessä kertoimina voidaan käyttää 1,0 rauhallinen istuminen tai 1,2 toimistotyö ja seisominen.  $A_{keho}$  on ihmisen kehon keskimääräinen pinta-ala (m<sup>2</sup>), joka tarvitaan ihmisen tuottaman hiilidioksidin laskennassa, voidaan laskea kaavalla 3. Kaavassa W kuvaa ihmisen painoa ja H ihmisen pituutta. Mitoituslaskennassa käytetään suomalaisten keskimääräisiä painoja ja pituuksia. Aikuisen miehen keskimääräinen paino ja pituus on 178 cm ja 85,5 kg, aikuisen naisen keskimääräinen paino ja pituus on 164 cm ja 70,4 kg (10, s. 9).

$$V'_{CO_2} = RQ \times \frac{0,00276 \times A_{keh} \times M}{0,23 \times RQ + 0,77}$$

*Kaava 2 Ihmisen tuottama hiilidioksidi (10, s. 8).*

$$A_{keho} = \frac{W^{0,425} * H^{0,725}}{139,1}$$

*Kaava 3 Ihmisen kehon pinta-alan DuBois- kaava (10, s. 8).*

Jos oletetaan naisten ja miesten määrä yhtä suureksi, voidaan laskea pituudelle ja painolle keskiarvoksi 171 cm ja 78 kg. Sijoittamalla pituus ja paino DuBois- kaavaan saadaan kehon pinta- alaksi 1,90 m<sup>2</sup>. Kun sijoitetaan kaikki edellä mainitut arvot kaavaan 2, voidaan laskea ihmisen tuottama hiilidioksidi istuen tai seisten. Tässä laskentatapauksessa käytetään rauhallisen istumisen met- arvoa.

$$V'_{CO_2} = 0,83 \times \frac{0,00276 \times 1,90m^2 \times 1MET}{0,23 \times 0,83 + 0,77} = 0,004529 dm^3/s = 4,529 cm^3/s$$

CO<sub>2</sub>- pitoisuuden tasapainotilanne syntyy, kun tilasta poistuvat ja tilaan tulevat epäpuhtausvirrat ovat yhtä suuret ( $q_{ulko} = q_{sisä}$ ). Tasapainoyhtälön kaava on esitetty kaavassa 4 (10, s. 9).

$$q_{ulko} * C_{ulko} + q_{korvaus} * C_{korvaus} + G = q_{poisto} * C_{poisto}$$

*Kaava 4 Tasapainoyhtälö (10, s. 9)*

Kaavassa  $q_{ulko}$  on tuloilmavirtaus ja  $C_{ulko}$  on tuloilman hiilidioksidipitoisuus.  $G_{CO_2}$  on ihmisten tuottama hiilidioksidin määrä ja  $C_{poisto}$  poistoilman hiilidioksidipitoisuus. Kun oletetaan, että  $q_{ulko} = q_{sisä}$  ovat yhtäsuuret ja korvausilmavirta on nolla, voidaan johtaa kaavasta 4 tasapainotilanteen kaava:

$$q_{ulko} = \frac{G_{CO_2}}{C_{poisto} - C_{ulko}}$$

*Kaava 5 Tasapainotilanteen kaava (10, s. 9).*

$q_{ulko}$	Tuloilmavirtaus (l/s)
$C_{ulko}$	Tuloilman hiilidioksidipitoisuus (ppm)
$C_{poisto}$	Poistoilman hiilidioksidipitoisuus (ppm)
$G_{CO_2}$	Ihmisten tuottama hiilidioksidi (cm <sup>3</sup> /s)

Riippuen sisäilman hiilidioksidipitoisuuden tavoitetasosta, voidaan tuloilmavirta laskea seuraavasti. Tässä laskuesimerkissä sisäilman CO<sub>2</sub> -pitoisuuden tavoitetaso on 1200 ppm

$$q_{ulko} = \frac{G_{CO_2}}{C_{poisto} - C_{ulko}} = \frac{4,529 \text{ cm}^3/\text{s}}{(1200 \text{ ppm} - 400 \text{ ppm})} = 5,6 \text{ dm}^3/\text{s}/\text{hlö}$$

Mikäli tavoitetasoksi asetettaisiin 750 ppm, olisi tuloilmamäärän suuruus 12,9 dm<sup>3</sup>/s/hlö, tai vastaavasti tavoitetason ollessa 900 ppm, tuloilmavirran suuruus olisi 9 dm<sup>3</sup>/s/hlö.

Tilan ilmavirran tarve ei näin ollen riipu tilan tilavuudesta vaan asetetusta sisäilman hiilidioksidipitoisuuden tavoitetasosta sekä tilassa oleskelevien ihmisten tuottamasta hiilidioksidin määrästä. Tuloilmavirran tarve siis kasvaa sitä mukaan, mitä matalampaa sisäilman hiilidioksidipitoisuutta tavoitellaan.

## 4.2 Hiilidioksidipitoisuuden mittaaminen

Infrapunateknologia on yleisimmin käytetty mittausmenetelmä hiilidioksidipitoisuuksien mittaamiseen. Infrapuna-antureiden etuna on kemiallisiin antureihin verrattuna pitkä käyttöikä, koska mitattava kaasu ei ole suorassa vuorovaikutuksessa anturin kanssa. Infrapuna-anturit kestävät hyvin pölyä, likaa, korkeita pitoisuuksia ja muita vaativia olosuhteita ja ne ovat hyvin stabiileja ja selektiivisiä mitattavalle kaasulle. Kahdesta tai useammasta erilaisesta atomista koostuvat kaasut absorboivat infrapunasäteilyä niille ominaisella tavalla ja tällaiset kaasut voidaan havaita käyttäen infrapunatekniikkaa. Hiilidioksidin lisäksi infrapuna-anturin avulla voidaan mitata esimerkiksi vesihöyryn, metaanin ja hiilimonoksidin pitoisuuksia (12, s. 1).

Infrapuna-hiilidioksidianturin toiminnan kannalta tärkeimpiä osia ovat riittävä valonlähde, mittauskammio, interferenssisuodatin ja infrapunadetektori. Hiilidioksidin pitoisuutta mitattaessa infrapunasäteily ohjataan valonlähteestä mitattavan kaasun läpi detektorille. Detektorin eteen sijoitettu suodatin estää muiden kuin mitattavalle kaasulle ominaisten aallonpituuksien kulkemisen detektorille. Detektori havaitseen säteilyn voimakkuuden, joka muunnetaan kaasun pitoisuudeksi (12, s. 2).

Anturin asennuspaikka vaikuttaa merkittävästi mittaustulosten tarkkuuteen. Antureiden sijoituksessa tulisi välttää paikkoja missä ihmiset saattavat hengittää suoraan anturiin. Myös tulo-

ja poistokanavien yhteyteen sijoitetut anturit saattavat vääristää mittaustulosta. Mikäli hiilidioksidianturia käytetään tarpeen mukaisen ilmanvaihdon ohjaukseen, tulisi anturit asentaa tilan seinälle tarkemman mittaustuloksen ja ohjauksen saavuttamiseksi. Raitiovaunussa anturi voidaan sijoittaa kanavaan riittävän mittaustarkkuuden saavuttamiseksi, koska ilmanvaihdon ohjaus ja säätö anturin lukeman perusteella koskee koko vaunua.

### 4.3 Muut epäpuhtaudet

Euroopan ympäristöviraston arvioiden mukaan vuonna 2020 Euroopan alueella yli 200 000 ihmistä kuoli huonon ilmalaadun vuoksi erityisesti kaupunkialueilla. Ihmiset altistuivat  $PM_{2.5}^*$  pienhiukkasille, joiden pitoisuus ylitti WHO:n pitoisuus suosituksen  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Typpidioksidi saasteet johtivat 49000 kuolemaan ja otsonille altistuminen 24 000 kuolemaan. Suurin osa ilman pienhiukkaspitoisuuksista on peräisin rakennusten energiankäytöstä. Päästöt liittyvät pääosin kiinteiden polttoaineiden polttamiseen rakennusten lämmittämiseksi. Euroopan ympäristöviraston mukaan vuonna 2020 asunto- ja institutionaalinen sektori aiheutti 44 prosenttia  $PM_{10}^*$ -päästöistä ja 58 prosenttia  $PM_{2.5}$ -päästöistä. Muita merkittäviä näiden epäpuhtauksien aiheuttajia ovan muunmuassa tieliikenne ja teollisuus. (13.)

$PM_{2.5}^*$ =halkaisijaltaan alle 2,5 mikrometrin hiukkanen

$PM_{10}^*$ =halkaisijaltaan alle 10 mikrometrin hiukkanen

Raitiovaunut kaupunkiliikenteenä ovat suhteellisen vähäpäästöisiä ja omalta osaltaan auttavat pienentämään urbaanien alueiden hiukkaspitoisuuksia. Kaupunkiympäristöstä johtuen raitiovaunujen matkustajat kuitenkin altistuvat jatkuvasti pienhiukkasille, joten raitiovaunujen hyvä ilmanvaihto ja ilman suodatus korostuvat, jotta matkustajille voidaan taata turvallinen ja terveellinen ympäristö.

Hiilidioksidin lisäksi muita kaasumaisia epäpuhtauksia ilmassa ovat haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC=volatile organic compound). Näiden yhdisteiden kokonaispitoisuuksista käytetään nimitystä TVOC (total volatile organic compound) (14). VOC-päästöjen perusteella ohjattu ilmanvaihto ei ole toistaiseksi kannattavaa, koska yleisesti käytössä olevat ja hankintahinnaltaan järkevät anturit eivät erottele ilmasta haitallisia ja ei-haitallisia yhdisteitä. Esimerkiksi rakennusmateriaalit päästävät

ajan mittaan kemiallisten ja fyysisten tekijöiden aiheuttamina mahdollisesti jatkuviakin päästöjä. Nykyiset rakennusmateriaalit eivät kuitenkaan sisällä myrkyllisiä yhdisteitä, kuten formaldehydiä.

Cambridgen yliopiston sekä Lontoon Imperial Collegen tutkijat Rick De Kreij ja tohtori Huw Woodward ovat kehittäneet matemaattisen mallin, jonka avulla voidaan ennustaa tautien leviämiskäyttäjä junavaunussa. Mallin avulla voitiin havainnoida, että infektioriski on sama koko vaunun pituudelta erityisesti junissa, missä raitisilman osuus ilmanvaihdosta on pieni. Merkittävin keino suojautua esim. Covid-19 tartunnalta on käyttää kasvomaskeja.

Indoor Air- julkaisun raportoimat tulokset osoittavat, että junavaunujen ilmanvaihtoa tulisi parantaa matkustajaturvallisuuden takaamiseksi. Julkaisun toisen kirjoittajan, tohtori Huw Woodward mukaan: "sosiaalinen etäisyys voi vähentää ilmassa leviävien infektioiden riskiä, mutta vaunun on oltava alle puoliksi täynnä. Raitisilman lisääminen vaunuihin vähentää ilmassa leviävien infektioiden riskiä". (15.)

Kaupunkiliikenteen junien ilmanvaihtojärjestelmät ovat kuitenkin optimoitu standardeihin perustuen energiatehokkuuden ja matkustajamukavuuden mukaan sisäilman laadun sijasta. Kuten jo työn alussa esitellyssä järjestelmäkuvauksessa kerrottiin, ilmanvaihdossa käytetään kiertoilmaa sen sijaan, että ilma vaihdettaisiin täysin raitisilman avulla. Raitisilman jäähdyttäminen tai lämmittäminen luo kustannuksia, joka ei vastaavasti ole energiatehokasta.

#### **4.4 Vakioilmavirtajärjestelmä**

Vakioilmavirtajärjestelmä eli CAV-järjestelmä (Constant air volume system) on järjestelmä, joka toimii asetettujen minimi-ilmavirtojen mukaisesti huolehtien sisäilman puhtaudesta ja useimmiten myös lämpö-olosuhteista. Ilmavirrat mitoitetaan standardin ja laitteistolta vaaditun tehonsiirtotarpeen mukaan, kuten CO<sub>2</sub>-ohjatussa järjestelmässä. Vakioilmavirtajärjestelmä poikkeaa CO<sub>2</sub>-ohjatusta järjestelmästä ainoastaan siten, että raitisilman ja kiertoilman suhdetta ei säädetä olosuhteiden mukaan, vaan ilmamäärä on vakio.

Vakioilmavirtajärjestelmässä lämmitys- ja jäähdytys tilanteessa ulkoilman määrää ei siis missään vaiheessa muuteta, ainoastaan lämmitys tai jäähdytystehoa muutetaan tarpeen mukaan. Mitä suurempi tehonsiirtotarve vaunussa on, sitä suuremmaksi ilmamäärä muodostuu. CO<sub>2</sub>-ohjatussa järjestelmässä vahvuutena verraten vakioilmavirtajärjestelmään on ulkoilmamäärän säädettävyyys.

Mikäli vaunussa lämpötilaolosuhdevaatimukset täyttyvät ja hiilidioksidikuorma ei ole ylärajalla, voidaan CO<sub>2</sub>-ohjatussa järjestelmässä laskea raiteilman osuutta ilmanvaihdossa ja näin ollen vähentää sen vaatimaa lämmitys- ja jäähdytysenergiaa.



## 5 ENERGIANKULUTUSVERTAILU

Lukua ei julkaista salassapitovelvollisuuden takia.

## 6 YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin CO<sub>2</sub>-ohjatun ja vakioilmavirtajärjestelmän energiankulutus eroja. Tutkimustyön perusteella voidaan todeta, että CO<sub>2</sub>-ohjautuva tarpeenmukainen ilmanvaihto tuo merkittäviä säästöjä verrattuna vakioilmavirtaiseen ilmanvaihtojärjestelmään. Säästöjä syntyy lähes läpi vuoden, sillä ulkoilman lämpötilan ollessa alle 16 °C ollaan lämmityskaudella. Suurimmat säästöt syntyvät kovilla pakkasilla lämmityksen tarpeen ollessa suurimmillaan. Teoreettisilla laskelmilla saaduilla tuloksilla CO<sub>2</sub>-ohjautuva tarpeenmukainen ilmanvaihto tarjoaa vuodessa merkittävän säästön. Takaisinmaksuaika CO<sub>2</sub>-varustelulle on noin vuosi, joten ilmanlaadun hallinnan ja kustannusten pienentymisen myötä järjestelmää voidaan pitää kannattavana hankintana.

Raitiovaunuliikenteen standardit eivät ota kantaa hiilidioksidipitoisuuden raja-arvoihin vaan ilmanvaihdon mitoitus perustuu pääasiassa lämpötila – ja kosteusolosuhteisiin. Raitiovaunuihin hiilidioksidipitoisuuden raja-arvot on määrittänyt laitetoimittaja. Näillä raja-arvoilla päästään kohtuulliseen tasoon sisäilmanlaadussa hiilidioksidipitoisuuden ylittäessä raja-arvon ylärajan ainoastaan hetkittäin kuormituksen ollessa suurimmillaan.

Raitiovaunuissa matkustajien aktiivisuustasona voidaan pitää toimistotyöskentelyä vastaavana, missä MET- arvo on 1,2. Mikäli raitiovaunun ilmanvaihto mitoitettaisiin ainoastaan hiilidioksidipitoisuuden perusteella ja raja-arvona käytettäisiin esimerkiksi sisäilmastoluokituksen matalinta S3- arvoa, joka on 1 200 ppm, täytyisi ilmanvaihdon määrää nostaa lähes nelinkertaiseksi maksimi henkilökuormituksen ollessa 311 henkilöä. Mikäli sisäilman hiilidioksidipitoisuuden ylärajaksi asetettaisiin 1 500 ppm, tulisi raitisilmamäärän edelleen olla lähes kolminkertainen maksimi henkilökuormituksen ollessa 311 henkilöä.

Tutkimuksessa käytetyn raitiovaunun mittausdatan perusteella liikennöintivuoron aikana vaunussa oli keskimäärin 28 matkustajaa, joten S3- luokan vaatiman ilmamäärän käyttämistä voidaan pitää kohtuuttoman suurena. Suuren ilmamäärän myötä vaadittava raitisilman lämmitystehontarve kasvaa, samoin kuin puhallin ja sen vaatima teho, joten ratkaisua ei voida pitää energiatehokkaana. Raitiovaunussa käytettävissä oleva tila tekniikalle aiheuttaa myös omat rajoitteensa.

Ovien aukaisu tasaisin väliajoin raitiovaunuissa aiheuttaa lämmityskaudella lisälämmityksen tarvetta sekä vastaavasti jäädytyskaudella lisäjäädytyksen tarvetta. Hiilidioksiditasot laskevat myös hetkellisesti ovien aukaisun myötä ja tulevaisuudessa tätä voitaisiin selvittää tarkemmilla tutkimuksilla, mitkä ovien aukaisujen vaikutukset ovat esimerkiksi yhden liikennöintivuoron aikana lämmitys –tai jäädytystehontarpeeseen ja hiilidioksidin määrään vaunun sisällä.

## LÄHTEET

1. Transtech Oy. Liite A, Raitiovaunun tekninen kuvaus. 2016. Sisäinen lähde.
2. Transtech Oy. HVAC and brake resistors concept document. 2021. Sisäinen lähde.
3. Piilotettu.
4. SFS-EN 14750-1:2006 Railway applications. Air conditioning for urban and suburban rolling stock. Part 1: Comfort parameters. Kiskoliikenne. Lähi- ja kaupunkiliikenteen liikkuvan kaluston ilmastointi osa 1: Mukavuusparametrit. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Hakupäivä 20.2.2023. <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/8217.html.stx>.  
Vaatii lisenssin.
5. SFS-EN 14750-2:2006 Railway applications. Air conditioning for urban and suburban rolling stock. Part 2: Type tests. Kiskoliikenne. Lähi- ja kaupunkiliikenteen liikkuvan kaluston ilmastointi osa 2: Tyyppitestausta. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Hakupäivä 20.2.2023. <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/8218.html.stx>.  
Vaatii lisenssin.
6. Piilotettu.
7. Finlex. 2023. Lainsäädäntö. Asetus 1009/2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. Hakupäivä 24.2.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171009>
8. Sisäilmastoluokitus 2018. Sisäympäristön tavoitteet, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. RT 07-11299. Helsinki: Rakennustieto. Hakupäivä 8.3.2023. <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/RT%2007-11299>
9. HTP-arvot 2020. Haitalliseksi tunnetut pitoisuudet. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja. 2020:24. Hakupäivä 9.3.2023

[https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162457/STM\\_2020\\_24\\_J.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162457/STM_2020_24_J.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

10. Ympäristöministeriö. 2018. Laskentaopas. Tilan ulkoilmavirran mitoitus hiilidioksidikuormituksen perusteella. Hakupäivä 13.3.2023.

<https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BE961AA41-6DF6-4708-B8D2-0553271D8354%7D/144135>

11. Wolfram mathworld. 2023. Moving average. Hakupäivä 14.4.2023

<https://mathworld.wolfram.com/MovingAverage.html>

12. Vaisala. 2013. Sovelluskuvaus. Hiilidioksidin mittaaminen. Hakupäivä 5.4.2023

<https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/CEN-TIA-Parameter-How-to-measure-CO2-Application-note-B211228FI-A.pdf>

13. Euroopan ympäristövirasto. 2022. Ilman saastumisesta johtuvien ennenaikaisten kuolemien määrä laskee edelleen EU:ssa, myrkytön ympäristö edellyttää lisätoimia. Hakupäivä. 6.4.2023

<https://www.eea.europa.eu/fi/highlights/ilman-saastumisesta-johtuvien-ennenaikaisten-kuolemien>

14. Sisäilmayhdistys Ry. 2023. Epäpuhtaudet ja niiden torjunta. Hakupäivä 6.4.2023

<https://www.sisailmayhdistys.fi/Perustietoa-sisailmasta/Epapuhtaudet-ja-niiden-torjunta>

15. Imperial College London. 2022. No 'safest spot' to minimise risk of COVID-19 transmissions on trains. Hakupäivä 14.4.2023

<https://www.imperial.ac.uk/news/237571/no-safest-spot-minimise-risk-covid-19/>

16. Ilmatieteen laitos. 2023. Tutki menneitä tilastoja Havaintojen lataus- palvelussa. Hakupäivä 8.5.2023

<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>

## **LIITTEET**

LIITE 1. Vain yrityksen käytössä

LIITE 2. Vain yrityksen käytössä