

# **MUUTTUVAILMAVIRTAJÄRJESTELMÄN TASAPAINOTUS KOULURAKENNUKSESSA**

Juuso Nousiainen  
Opinnäytetyö AMK  
Kevät 2025  
Talotekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Talotekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä: Juuso Nousiainen  
Opinnäytetyön otsikko: Muuttuvailmavirtajärjestelmän tasapainotus  
koulurakennuksessa  
Työn ohjaaja: Kari Heiskari  
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2025  
Sivumäärä: 46 + 1 liite

Tarpeenmukaiset ilmanvaihtojärjestelmät kuten muuttuvailmavirtajärjestelmät, ovat yleistyneet koulurakennuksissa niiden energiatehokkuuden vuoksi. Monimutkaiset ilmanvaihtojärjestelmät ovat kuitenkin aiheuttaneet haasteita eri käytännön kohteissa. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tasapainottaa muuttuvailmavirtajärjestelmä koulurakennuksessa, jossa oli ongelmia rakennuksen vaipan yli sekä sisätilojen välisissä painesuhteissa. Työ kohdistui rakennuksen yhden ilmanvaihtokoneen palvelualueelle, joka palveli yhdeksää luokkahuonetta.

Työssä tarkastettiin ja huollettiin paine-eromittauksella toimivat huonekohtaiset säätölaitteet, mitattiin ilmavirrat, hienosäädettiin säätölaitteiden asetusarvot vastaamaan vaadittuja ilmamääriä ja tehtiin tarvittavat säädöt rakennusautomaation kautta. Lopuksi mittauksen tulokset varmistettiin painesuhdemittauksilla monitoimimittarilla käsin sekä Freesissä ilmastopalveluohjelmiston avulla pidemmällä aikavälillä.

Ilmavirtojen mittaukset suoritettiin kalibroidulla kuimalanka-anemometrillä ilmanvaihtokanavista, jonka avulla säätölaitteiden mittaustarkkuudet todennettiin. Huonekohtaisista säätölaitteista havaittiin työn aikana virheellisiä asetusarvoja, viallisia säätölaitteita sekä kytkentävirheitä, jotka korjattiin.

Ilmamäärien mittaustuloksissa havaittiin ilmanvaihtokoneen palvelualueen osalta, että huonekohtaisilla minimi-ilmamäärillä säätölaitteiden mittaustarkkuus oli heikompi, poistokanavien säätölaitteissa oli keskimäärin heikompi mittaustarkkuus verrattuna tuloilmaan huolimatta suojaetäisyyksistä ja uusittujen säätölaitteiden mittaustarkkuus oli selvästi parempi vanhoihin laitteisiin verrattuna. Tasapainotuksen jälkeen rakennuksen painesuhteet tasaantuivat tavoitetasolle.

Työ osoittaa, että muuttuvailmavirtajärjestelmien toimivuus edellyttää huolellista käyttöönottoa sekä säännöllistä huoltoa ja tarkastuksia. Säätölaitteiden toimivuus tulee todentaa minimi- ja maksimi-ilmamäärillä, jotta järjestelmän toiminta voidaan varmistaa kaikissa tilanteissa. Työn tuloksia voidaan hyödyntää käytännön kohteissa, joissa on huone- tai vyöhykekohtainen muuttuvailmavirtajärjestelmä.

# ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Program in Building Services

Author: Juuso Nousiainen

Title of thesis: Balancing a Variable Air Volume System in a School Building

Supervisor: Kari Heiskari

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2025

Number of pages: 46 + 1 appendix

Demand-controlled ventilation systems, such as variable air volume systems, have become increasingly common in school buildings due to their energy efficiency. However, complex ventilation systems have presented challenges in several real-life applications. The aim of this thesis was to balance a VAV system in a school building where issues had been identified with pressure differences across the building envelope and between indoor spaces. The work focused on the service area of a single air handling unit, which served nine classrooms.

The project involved the inspection and maintenance of room-specific VAV dampers operating based on differential pressure. Airflows were measured and damper setpoints were fine-tuned to meet the required flow rates. Necessary adjustments were also made through the building automation system. The measurements were verified by pressure differential readings with a multifunction ventilation meter and long-term monitoring using the Freesi indoor climate platform.

Airflows were measured from the ductwork using a calibrated hot-wire anemometer, which also enabled the verification of damper measurement accuracy. Several incorrect setpoints, faulty dampers, and wiring errors were detected and corrected. The results showed that the measurement accuracy of the dampers was lower at minimum flow rates and generally poorer in extract ducts compared to supply ducts, regardless of installation distances. New dampers were clearly more accurate than the original ones.

After balancing, the pressure differences in the building stabilized to the target range. The results highlight that the functionality of VAV systems requires careful commissioning, regular maintenance, and accurate inspections at both minimum and maximum airflow levels. The findings of this thesis can be applied in practice to similar projects involving room- or zone-specific VAV systems in school environments.

# SISÄLLYS

|   |    |
|---|----|
| TIIVISTELMÄ .....   | 2  |
| ABSTRACT .....  | 3  |
| SISÄLLYS .....  | 4  |
| 1 JOHDANTO .....  | 5  |
| 2 KOULURAKENNUSTEN ILMANVAIHTO .....                      | 6  |
| 2.1 CAV-järjestelmä .....                                 | 7  |
| 2.2 VAV-järjestelmä.....                                  | 9  |
| 2.3 Ilmanvaihdon rakennusautomaatiikka .....              | 18 |
| 3 ILMAVIRTOJEN MITTAUS.....                               | 20 |
| 3.1 Ilmavirtojen mittaus paine-eromenetelmällä.....       | 20 |
| 3.2 Ilmavirtojen mittaus virtausnopeuden perusteella..... | 20 |
| 3.3 Mittausvirheet ja sallitut poikkeamat.....            | 24 |
| 3.4 Mittaustulosten dokumentointi.....                    | 25 |
| 4 ESIMERKKIKOHDE .....                                    | 26 |
| 4.1 Tausta ja tavoitteet.....                             | 26 |
| 4.2 Ilmavirtasäätimien tarkastus.....                     | 28 |
| 4.3 Säätolaitteiden mittaustarkkuuden todentaminen.....   | 30 |
| 4.4 Tulokset.....   | 39 |
| 5 POHDINTA .....  | 43 |
| LÄHTEET .....   | 45 |
| LIITTEET .....  | 47 |

# 1 JOHDANTO

Ilmanvaihdon toimivuudella koulurakennuksissa on merkittävä vaikutus oppimisympäristön viihtyvyyteen, terveellisyteen sekä rakennuksen energiankulutukseen. Vaatimukset rakennusten energiankulutuksen vähentämisestä ovat yleistäneet tarpeenmukaiset ilmanvaihtojärjestelmät, kuten muuttuvilmavirtajärjestelmät nykyaikaisissa koulurakennuksissa. Monimutkaiset järjestelmät ovat kuitenkin aiheuttaneet haasteita monissa eri käytännön kohteissa.

Nordic ventilation groupin tekemän selvityksen mukaan virheitä tapahtuu kaikissa rakentamisen ja rakennuksen käytön eri vaiheissa. Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon selvitystä vetänyt Panu Mustakallio nostaa esiin yleisimpinä ongelmakohtina puutteellisen käyttöönottoprosessin, riittämättömät suojaetäisyydet ja puutteellisen dokumentoinnin. Käyttöönottoprosessissa erityisesti korostuu tarve mitata ja tarkastaa säätölaitteiden minimi- ja maksimi-ilmamäärät, jotta järjestelmän toiminta voidaan varmistaa kaikissa tilanteissa. Mustakallio nostaa myös esille koulutustarpeen, joka koskee niin urakoitsijoita, suunnittelijoita sekä ylläpitohenkilöstöäkin. (1.) Tämä opinnäytetyö tuo omalta osaltaan esille puutteita niin rakentamisen kuin kiinteistöhuollonkin osaamisessa, kun kyseessä ovat monimutkaiset ilmanvaihtojärjestelmät.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tasapainottaa muuttuvilmavirtajärjestelmä koulurakennuksessa, jossa on ongelmia rakennuksen vaipan yli sekä sisätilojen välisissä painesuhteissa. Työ kohdistuu yhden ilmanvaihtokoneen palvelualueen tasapainotukseen, joka palvelee yhdeksää luokkahuonetta. Työssä keskitytään muuttuvilmavirtajärjestelmien säätölaitteiden huoltoon ja tarkastuksiin, ilmavirtojen mittaukseen sekä rakennusautomaatiojärjestelmän kautta tehtäviin säätöihin. Työssä hyödynnetään myös Freesi-sisäilmapalveluohjelmistoa, jonka avulla rakennuksen sisäilmaolosuhteita seurataan pidemmällä aikavälillä. Tämä työ toimii käytännön esimerkkinä onnistuneesta tasapainotuksesta ja tuo esiin niitä keskeisimpiä asioita joiden, avulla muuttuvilmavirtajärjestelmän toimivuus voidaan varmistaa.

## 2 KOULURAKENNUSTEN ILMANVAIHTO

Koulurakennuksissa ilmanvaihdon tehtävänä on turvata hyvä sisäilman laatu kaikissa tilanteissa sekä vähentää huonetiloissa syntyviä lämpö-, kosteus- ja hiilidioksidikuormituksia. Ilmanvaihdon toimivuudella on merkittävä vaikutus oppimisympäristön viihtyvyyteen, terveellisyyteen ja energiankulutukseen.

Koulurakennuksissa koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmien käyttö yleistyi 1970-luvulla. Suomen rakennusmääräyskokoelman osan ”D2 ilmanvaihto” julkistamisen jälkeen vuonna 1976 koulurakennusten ilmamäärien vaatimukset kasvoivat, kun ilmanvaihtotekniikka ja konetyypit alkoivat kehittyä. Tämän myötä myös lämmöntalteenottojärjestelmät tulivat käyttöön ilmanvaihtokoneissa. (2.)

Koulurakennuksien ilmanvaihdon mitoituksessa on otettava huomioon opetussuunnitelmien vaatimukset opetustiloille ja niiden käytölle. Ilmanvaihdon ulkoilmavirran mitoitusperusteena päiväkodeissa ja oppilaitoksissa yleisesti käytetään 6 l/s henkilöä kohden. (3.) Taulukossa 1 näkyy oppilaitosten ja päiväkotien minimi ulkoilmavirtamäärät eri tiloille.

Koska tilojen käyttö vaihtelee vuorokauden- ja viikonajan mukaan, on ilmanvaihdon oltava tarpeenmukaisesti ohjattavissa. Yleisimmät ilmanvaihtojärjestelmät koulurakennuksissa ovat vakioilmavirtaiset (CAV) ja muuttuvailmavirtaiset (VAV) järjestelmät.

## TAULUKKO 1. FINVAC ry Ilmavirtojen mitoitustaulukko 3.3.1 Oppilaitokset ja päiväkodit (3, s. 10)

Taulukko 3.3.1 Oppilaitokset ja päiväkodit

| Tila / käyttötarkoitus  | Ulkoilma-<br>virta<br>dm <sup>3</sup> /s,hlö          | Ulkoilma-<br>virta<br>dm <sup>3</sup> /s,m <sup>2</sup> | Poistoilma-<br>virta<br>dm <sup>3</sup> /s,m <sup>2</sup> | Muita<br>ohjeita  |
|---|---|---|---|---|
| Koulurakennus   | 6   |   |   | Oppilaiden, opettajien ja muun henkilöstön kokonaismäärän perusteella   |
| Opetustilat<br>(luokahuoneet,<br>pienryhmätilat jne.)   | 6   | 3   |   | Taide- ja taitoaineet vähintään 8 dm <sup>3</sup> /s,hlö  |
| Opettajainhuoneet   |   | 2   |   |   |
| Käytävät ja aulat   |   | 3   |   |   |
| Käytävät ja aulat, jotka on tarkoitettu vain läpikulkuun  |   | 1   |   |   |
| Ulkovaatteiden säilytystilat  |   |   | 3   |   |
| Sali, liikuntakäyttö  |   | 2   |   | Suurimpaan ilmanvaihtoon johtava kriteeri määrää mitoituksen, ilmanvaihdon on oitava ohjattavissa salin käytön mukaan |
| Sali, juhlasalikäyttö   | 6   |   |   |   |
| Liikuntasali / katsomo  | 6 dm <sup>3</sup> /s,katsomopaikka                    |   |   | Mitointi ja ilmanvaihdon ohjaus katsojamäärän mukaan  |
| Sali, urheilutapahtumat   | 15-30   | 2-4   |   | LVI 06-10600 <sup>1)</sup> ; ohjeavot lajikohtaisesti, ks. myös taulukko 3.9.1  |
| Luentosali  | 6 dm <sup>3</sup> /s,paikka                           |   |   | Ilmanvaihdon ohjaus käytön ja tarpeen mukaisesti  |
| Kirjastot, toimistotilat  |   | 2   |   |   |
| Ruokailutilat   | 6   | 3   |   | Ruokailutilat voivat olla ruokailuajkojen ulkopuolella opetuskäytössä   |
| Päiväkotien toimintatilat<br>(ryhmätilat, lepohuoneet,<br>salit, pienryhmätilat,<br>eteistilat) | 6   | 3   |   |   |
| Päiväkotien<br>henkilökuntatilat  |   | 2   |   |   |
| Päiväkodin märkäeteinen   |   |   | 5   |   |
| Keittiö   | ks. taulukko 3.13.1<br>Keittiöt ja niiden<br>aputilat |   |   |   |
| Hygieniatilat   |   |   |   | ks. taulukko 3.14.1 Tiloja, joita on monessa rakennustyyppissä kuten hygieniatilat                                    |

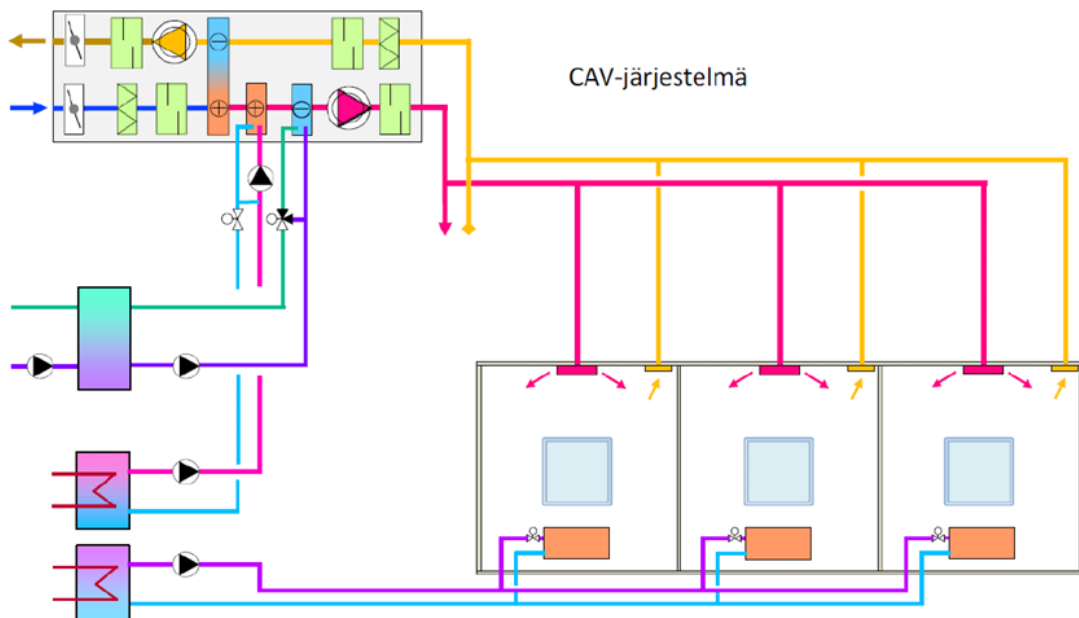
1) LVI 06-10600 Sisäliikuntatilojen LVIA-suunnittelu. LVI-ohjekortti. Rakennustieto.

### 2.1 CAV-järjestelmä

CAV-järjestelmästä (CAV = Constant Air Volume System) käytetään myös nimitystä vakioilmavirtajärjestelmä. Vakioilmavirtajärjestelmässä ilmavirta pysyy tilassa vakiona riippumatta siellä olevien ihmisten määrästä tai lämpökuormasta.

Vakioilmavirtajärjestelmässä kanavisto on rakennettu kiinteäsäätöisillä säätöpelleillä ja päätelaitteilla, joilla ei voida käytön aikana tehostaa ilmavirtoja eri tilojen välillä. Tällainen järjestelmä mitoitetaan kuormituksen huipputilanteen mukaan, jolloin lämmitys- ja sähköenergiaa kuluu tilojen vajaakuormitus-tilanteissa turhaan. Vakioilmavirtajärjestelmä soveltuu parhaiten palvelemaan tiloja, joiden lämpö- ja henkilökuormat eivät vaihtele suuresti käytön aikana.

Vakioilmavirtajärjestelmässä nykyaikaisesta ilmanvaihtokoneesta löytyy puhaltimien kanavapainehaus, tulo- ja poistoilman puolelta suodatus, lämmöntalteenottojärjestelmä sekä lämmityspatteri. Ilmanvaihtokoneeseen tai kanavistoon voidaan myös tarpeen mukaan lisätä jäähdytystoimintoja, jolloin puhutaan ilmanvaihdon sijaan ilmastoinnista. Huonetilojen varsinainen lämmitys tapahtuu yleensä lämmityspattereilla, jäähdytys joko tuloilman avulla tai erillisillä jäähdytyslaitteilla huoneissa. Vakioilmavirtajärjestelmän ilmavirtojen mitoitus tehdään kesäajan jäähdytystarpeen mukaan, jolloin tuloilman lämpötila päätelaitteelta on alimmillaan +16–18 celsiusastetta. Kuvassa 1 näkyy kaavioesimerkki CAV-järjestelmästä. (4, s. 131-132.)



KUVA 1. CAV-järjestelmä esimerkkikaavio (4, s. 132)

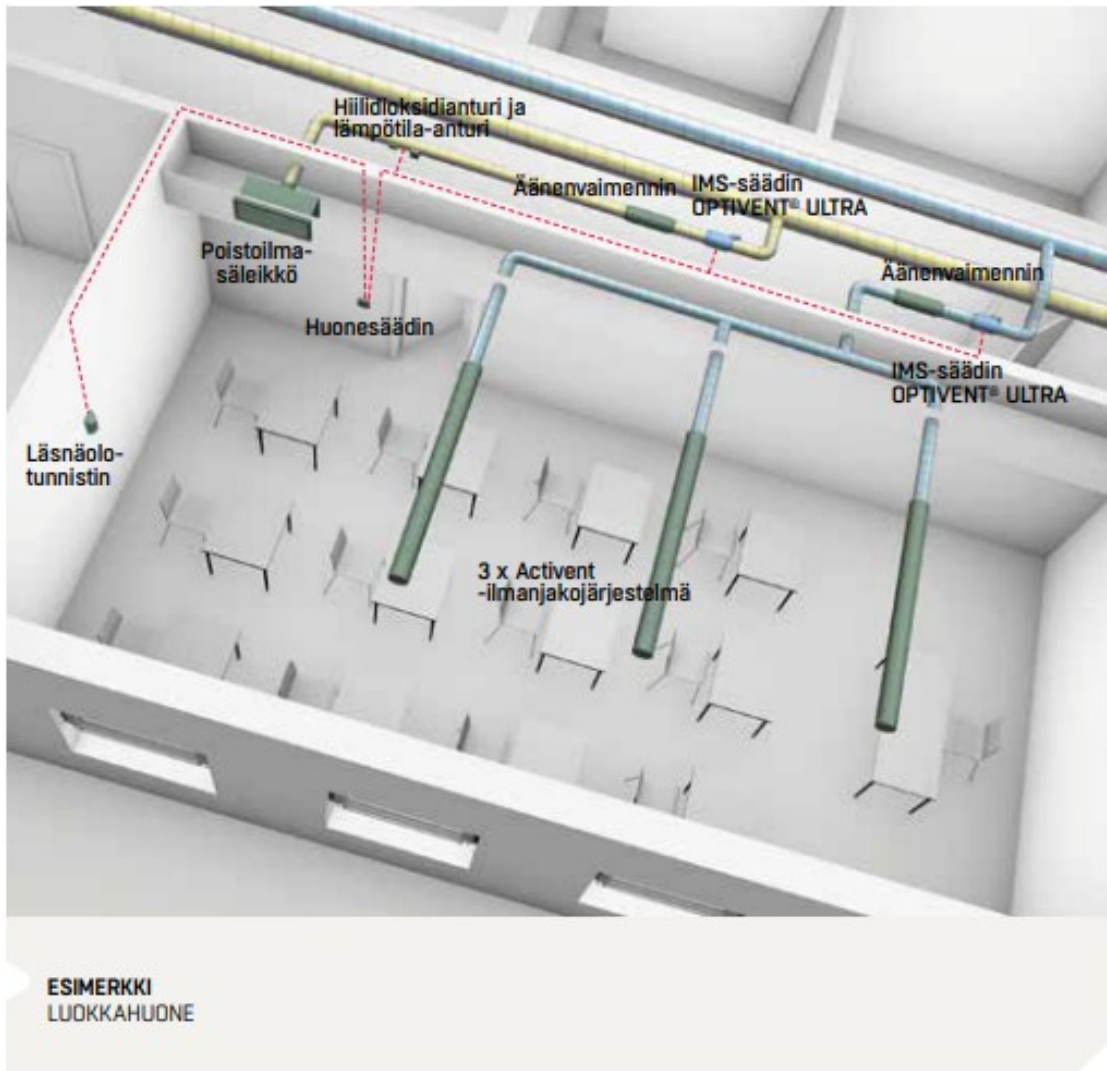
Koulurakennuksissa käyttöaika on tyypillisesti arkipäivisin 8:00-16:00 välisenä aikana, jolloin luokkatiloissa kuormitus on hyvin samankaltaista huoneesta riippumatta. Käyttöajan ulkopuolella vakioilmavirtajärjestelmää yleensä ajetaan puoliteholla, jolloin kaikissa tiloissa ilmavirtojen määrä puolittuu tasaisesti. Kesäkuukausina, arkipäivisin yöaikaan tai viikonloppuisin voidaan tarvittaessa järjestelmää pitää sammutettuna energian säästämiseksi. Ilmanvaihdon tarpeenmukainen säätö vakioilmavirtajärjestelmässä tapahtuu vakioilmavirtajärjestelmässä kanavapaineohjausta muuttamalla eri käyntiaikojen mukaan. Vakioilmavirtajärjestelmä sopii hyvin koulurakennuksiin ja on edullisin järjestelmävaihtoehto sen yksinkertaisuuden ja edullisten rakennuskustannusten vuoksi. Tässä järjestelmässä ilmavirtojen määrät ovat säädettävissä hyvin tarkasti ja säädöt pysyvät ennallaan, mikäli ilmanvaihtokone toimii normaalisti ja kanavapaine pysyy samana. Huoltotoimenpiteet vakioilmavirtajärjestelmässä ovat lähinnä IV-koneeseen liittyviä huoltotoimenpiteitä. (4, s. 131-132.)

Ilmanvaihtokanaviston puhtaudesta tulisi huolehtia niin, ettei kanavistossa oleva lika aiheuta paloturvallisuusriskejä, vaikuta järjestelmän toimintaan tai heikennä sisäilman laatua. Kanaviston puhtaustarkastus tulisi tehdä kouluissa ja päiväkodeissa 5 vuoden välein. Yleensä ilmanvaihdon puhdistustöiden yhteydessä suoritetaan ilmanvaihtojärjestelmän mittaus ja säätö, jossa tarkastetaan päätelaitteiden ilmamäärät ja järjestelmä tasapainotetaan. (5, s. 6)

## **2.2 VAV-järjestelmä**

VAV- järjestelmästä (Variable Air Volume System) Suomessa puhutaan myös nimellä muuttuvailmavirta- tai IMS-järjestelmä (ilmavirtasäätöinen). Muuttuvailmavirtajärjestelmä sopii parhaiten kohteisiin, joissa on tilojen lämpökuormituksissa tai ilmavirtojen tarpeissa suuri vaihtelu eri käyttötilanteissa. Muuttuvailmavirtajärjestelmässä ilmavirtoja eri tilojen välillä voidaan tarpeenmukaisesti tehostaa tai pienentää palvelualueen käytön mukaan. Tämä tapahtuu automaattisesti muuttuvailmajärjestelmän säätölaitteilla. Tilojen

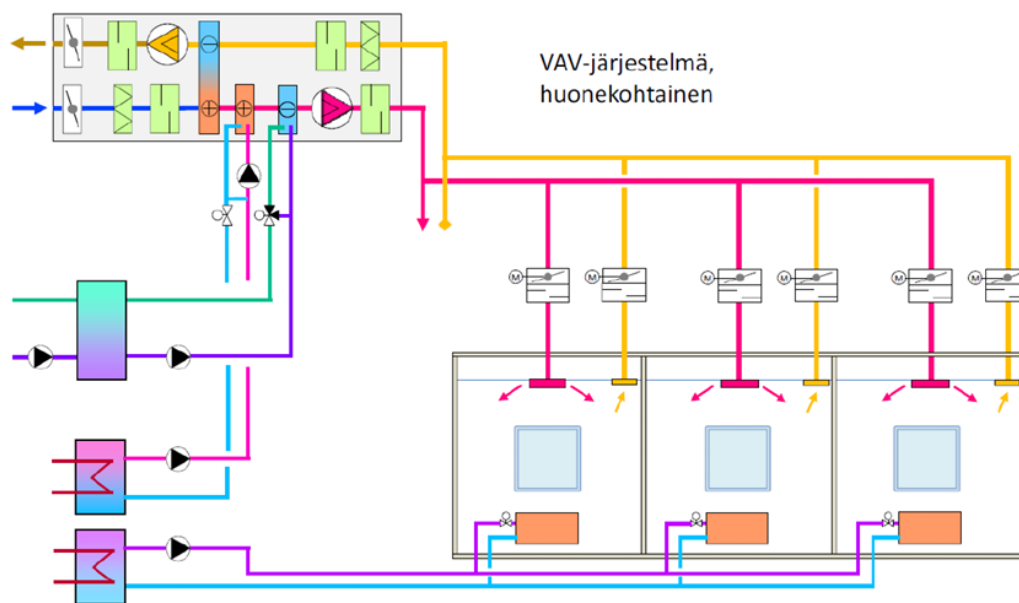
kuormitusta ja sisäilmasto-olosuhteita seurataan huoneantureilla rakennusautomaatiikan kautta. Yleisimmät tavat ohjata tilojen ilmavirtoja huoneantureilla ovat hiilidioksidi-, lämpötila- tai läsnäoloanturit. (4, s. 133–136.) Kuvassa 2 havainnollistetaan huoneantureiden ja laitteiden sijainti luokkahuone esimerkissä VAV-järjestelmässä.



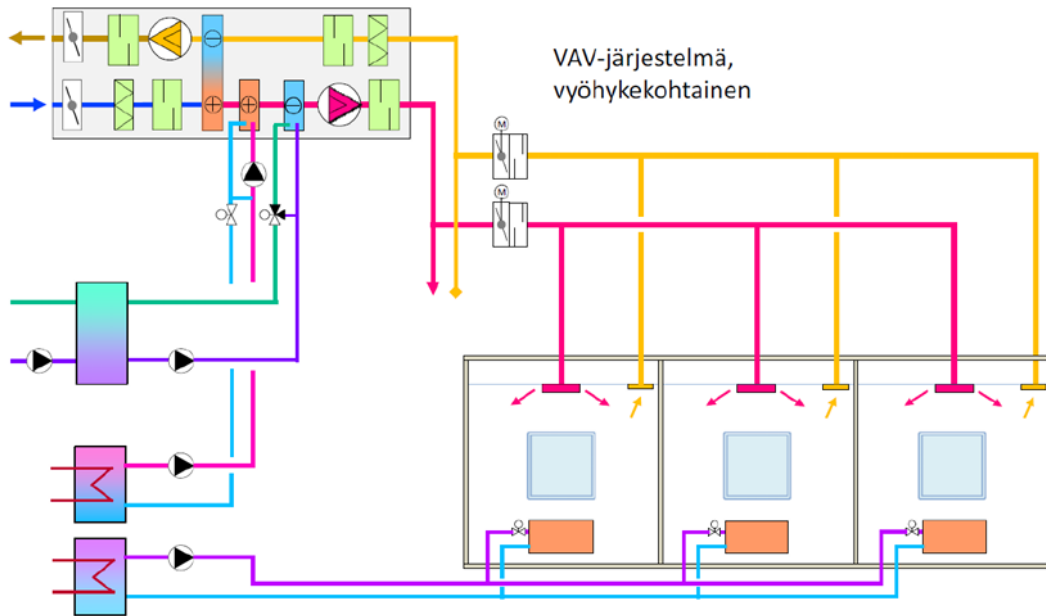
KUVA 2. FläktGroup esimerkki luokkahuone VAV-järjestelmässä (6, s. 14)

VAV-järjestelmän ilmanvaihtokoneesta löytyy kaikki samat komponentit kuin vakioilmavirtajärjestelmästä. Suurimmat erot CAV- ja VAV-järjestelmien välillä ovat kanaviston ilmavirtojen säätölaitteissa ja rakennusautomaatiikassa. VAV-järjestelmä on energiatehokkaampi tilojen jatkuvan tarpeenmukaisen ohjauksen takia verrattuna CAV-järjestelmään, mutta on kalliimpi vaihtoehto

rakennuskustannuksiltaan kanaviston osien ja rakennusautomaatiikan osalta. Tilakohtaisten ilmavirtojen tarkkuus on VAV-järjestelmässä heikompi, sillä ilmavirtojen säätö kanavistossa on säätölaitteiden varassa ja ne muuttuvat jatkuvasti käytön aikana. Huoltokustannuksiltaan VAV-järjestelmä on kalliimpi, koska se vaatii säätölaitteiden säännöllistä tarkastus- ja puhdistustoimenpiteitä tiheämpään kuin CAV-järjestelmän kanavistonosat. Huonekohtainen ilmavirran säätö on yleisin tapa tehdä muuttuvilmavirtajärjestelmä, mutta se voidaan rakentaa myös vyöhykekohtaisena. Kuvissa 3 ja 4 näkyy huonekohtaisen ja vyöhykekohtaisen VAV-järjestelmä kaavioesimerkki. (4, s. 133–136.)



KUVA 3. Huonekohtainen VAV-järjestelmä esimerkkikaavio (4, s. 133)



KUVA 4. Vyöhykekohtainen VAV-järjestelmä esimerkkikaavio (4, s. 137)

### VAV-järjestelmän säätölaitteet

VAV-järjestelmässä jokainen tila on varustettu omalla säätölaitteella, joka säätelee tilaan toimitettavaa ilmamäärää. Säätlaitteen laippa muuttaa kanavassa kulkevaa ilmavirtaa ja säätelee sitä välillä  $V_{min}$ – $V_{max}$ , jossa  $V_{max}$  on tilan maksimi-ilmavirta ja  $V_{min}$  minimi-ilmavirta. Esimerkiksi hiilidioksidipitoisuuden mukaan säätyvässä VAV-järjestelmässä, kun tila on käytössä ja hiilidioksidipitoisuus nousee, säätölaite avautuu kohti  $V_{max}$ -arvoa. Vastaavasti, kun tila ei ole käytössä, laite sulkeutuu kohti  $V_{min}$ -arvoa.

Kun useampi VAV-laite samanaikaisesti avautuu lähelle  $V_{max}$ -arvoa, ilmanvaihtokoneen puhaltimen kammiossa oleva paine alkaa laskemaan, jolloin IV-kone reagoi tilanteeseen nostamalla puhallintehoa, jotta vaadittu paine kanavistossa säilyy. Puhallinta ohjataan tyypillisesti taajuusmuuttajalla kammionpaineanturin mittaustiedon perusteella, jolloin IV-kone pyrkii ylläpitämään samaa kanavapainetta kammiossa jatkuvasti. Vastaavasti, kun useat säätölaitteet sulkeutuvat käyttöajan ulkopuolella, kanaviston paine nousee ja IV-kone laskee puhallintehoa. (7, s. 45; 8, s. 16-17.) Laittevalmistajien yleisimmät

säätölaitetyypit ovat paine-eromittauksella toimivat säätölaitteet, ultraäänimittauksella toimivat säätölaitteet sekä mekaaniset vakiovirtaussäätimet.

### **Paine-eromittauksella toimivat säätölaitteet**

Paine-eromittauksella toimivasta ilmavirtasäätimestä toimii esimerkkinä FläktGroupin EMSD (kuva 5). Laite on pyöreä paineesta riippumaton ilmavirransäädin, jota voi käyttää tulo- sekä poistoilmalle ja se voidaan asentaa vaaka- tai pystyasentoon. Ilmavirtasäätimessä olennaiset osat ovat mittalaippa, säätöpelti, eristetty vaippa (EMSD malli), mittayhteet, sähköinen kompaktisäädin.

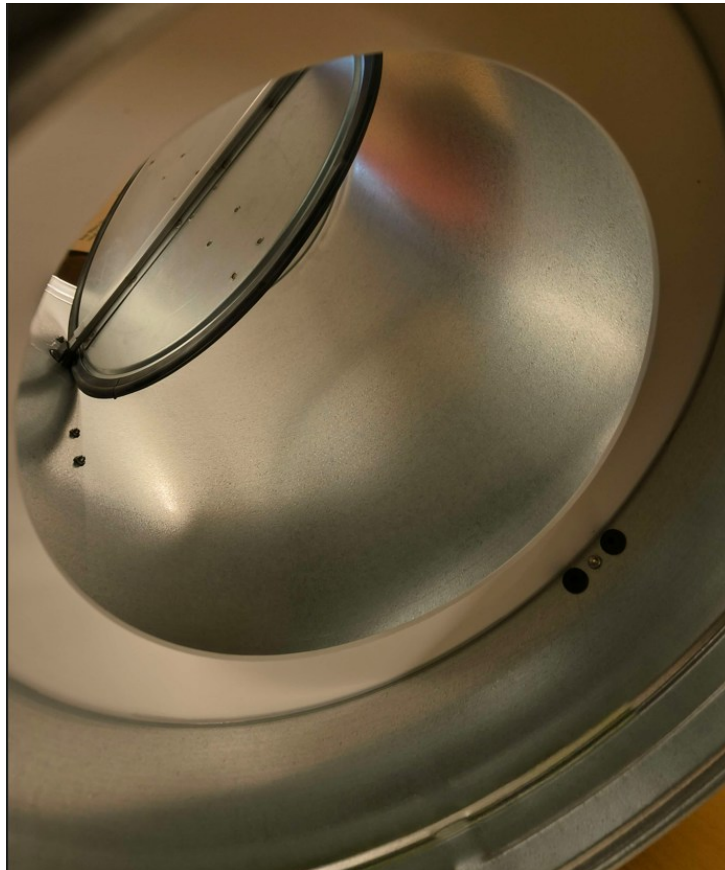
(9)



*KUVA 5. FläktGroup EMSD ilmavirtasäädin (9, s. 1)*

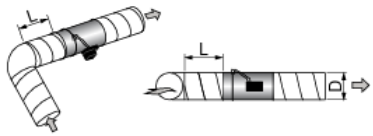
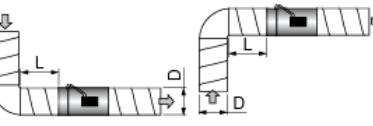
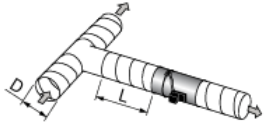
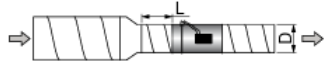
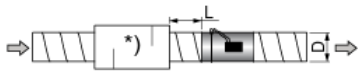
Mittausyhteet ovat säätimen sisällä sijoitettuna mittalaipan molemmille puolille, josta se mittaa mittalaipan välistä paine-eroa. Paine-eron avulla kompaktisäädin laskee laitteesta kulkevan ilmavirran ja säätää säätöpeltiä halutun ilmavirran saavuttamiseksi. EMSD säätölaitteesta löytyy myös manuaaliset mittausyhteet, josta voidaan ilmamäärämittarilla tarkastaa säätöpiirin toimintaa häiritsemättä

säätölaitteen ilmavirta paine-eron ja laitteen tiedoissa olevan k-arvon avulla. Säätölaitteen k-arvo on keskiarvo koko laitteen käyttöalueelle säätöpellin avauksen ollessa 30-100%:n alueella. (9.) Kuvassa 6 näkyy mittausyhteet, mittalaippa ja säätöpelti EMSD-laitteen sisältä.



*KUVA 6. FläktGroup EMSD-ilmavirtasäädin sisäpuolelta*

Paine-erolla toimivien laitteiden mittaustarkkuuteen vaikuttaa laitteen sijoitus kanavistossa. Säätölaite tulisi sijoittaa mahdollisimman häiriöttömään kohtaan kanavassa, jossa suojaetäisyydet häiriötekijöihin esimerkiksi käyriin tai haaroihin ovat mahdollisimman pitkiä. Suojaetäisyyden pituuteen vaikuttaa säätölaitteen asento suhteessa käyriin. Kuvassa 7 näkyy EMSD -säätölaitteen suojaetäisyydet erilaisille häiriötekijöille. (10, s. 1)

|  | L                                      |  |
|--|--|--|
| EMSS, EMSD Ø100-630: $m_2 =$<br>EHSS, EHSD Ø125-400: $m_2 =$<br>EHSS, EHSD Ø100, 500, 630: $m_2 =$             | $\pm 12\%$<br>$\pm 12\%$<br>$\pm 16\%$ | $\pm 15\%$<br>$\pm 15\%$<br>$\pm 19\%$ |
|                               | $\geq 2D$                              | $\geq 0D$                              |
|                               | $\geq 4D$                              | $\geq 0D$                              |
|                               | $\geq 2D$                              | $\geq 0D$                              |
|                               | $\geq 1D$                              | $\geq 0D$                              |
| <br>*) BDER-30/40/44/45/60/61 | $\geq 0D$                              | —                                      |

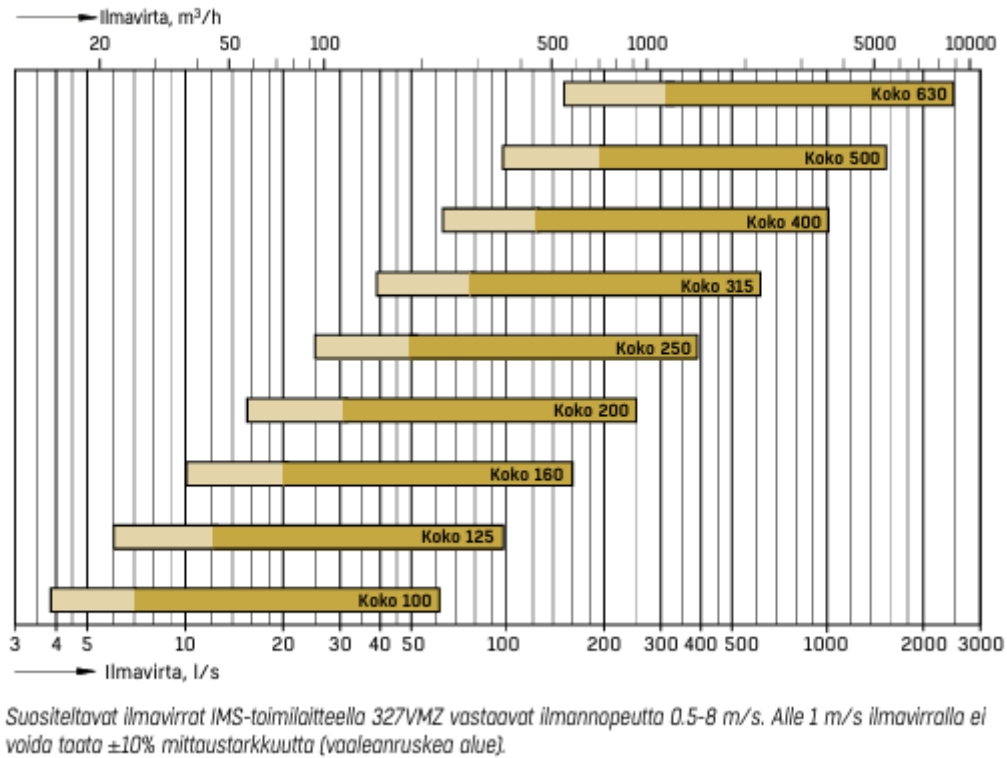
With other types of flow disturbance sufficient safety distances should be used.

Muissa mahdollisissa häiriölähteissä käytettävä riittävä suojaetäisyyttä.

Vid andra typer av luftflödensstörningar tillräckligt skyddsavstånd måste användas.

KUVA 7. FläktGroup EMSD-ilmavirtasäätimen suojaetäisyydet ja mittaustarkkuudet (10, s. 1)

Säätölaitteiden jokaiselle kanavakoolle on määritelty ilmamääräalue, jossa laite toimii luotettavasti. Ilmamäärää vastaava ilmannonpeus laitteissa on 0,5-8 m/s. 0,5-1 m/s:n nopeusalueella mittaustarkkuus säätölaitteessa on heikompi kuin suuremmalla nopeudella. Kuvassa 8 näkyy ilmavirtatoiminta-alueet kanavakokojen mukaan. (9, s. 2)

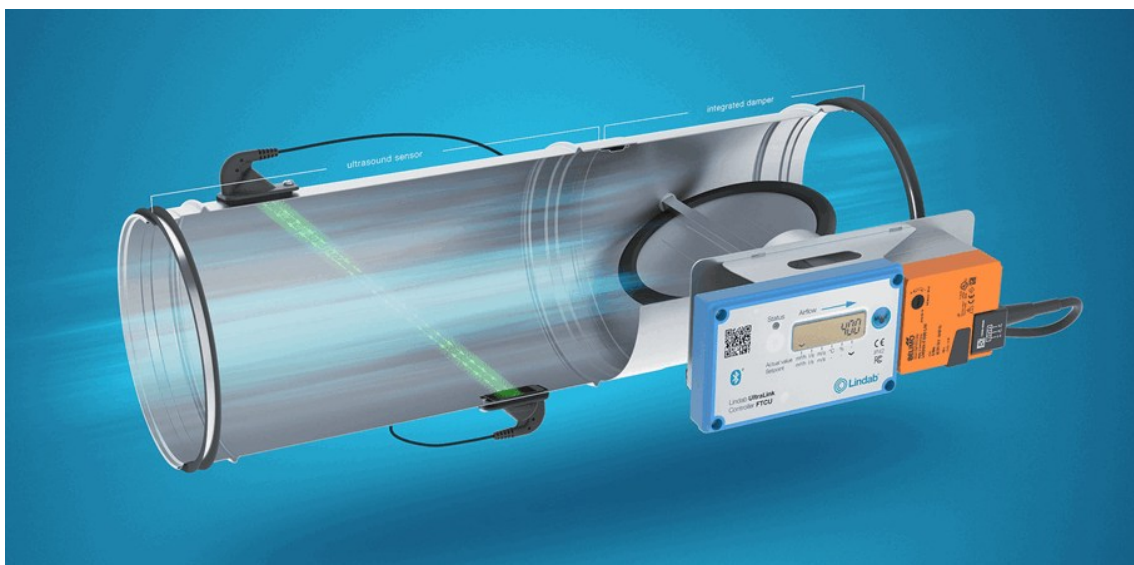


KUVA 8. Säätolaitteiden ilmavirtatoiminta-alue kanavakokojen mukaan (9, s. 2)

Paine-eromittauksella toimivat säätölaitteet tulisi kuitenkin puhdistaa vähintään 3 vuoden välein, mikä on useammin kuin ilmanvaihtokanaviston puhdistusväli. VAV-järjestelmien säätölaitteet tulisi aina tarkistaa ja puhdistaa kanavanpuhdistustöiden yhteydessä. Ilmanvaihtokanavissa kulkeutuva pöly voi tukkia säätölaitteen mittayhteitä ja vaikuttaa laitteen mittaustarkkuuteen. Mittayhteet tai mittaristikko tulisi pyyhkiä mikrokuituliinalla säätölaitteen sisäpuolelta. Paine-eroletkut ja mittayhteet voidaan puhdistaa paineilman avulla säätölaitteen ulkopuolelta. (8, s. 27)

## Ultraäänimittauksella toimivat ilmavirtasäätimet

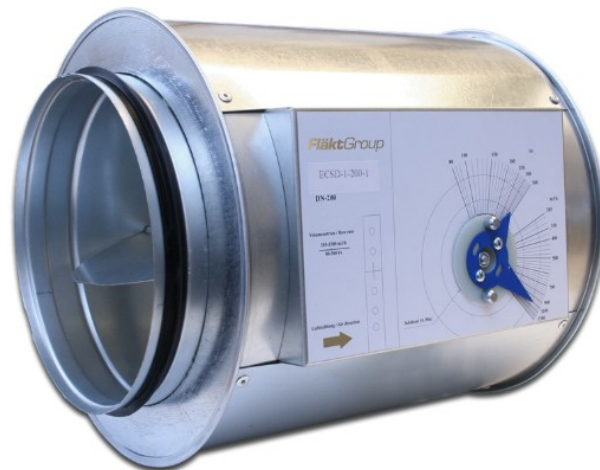
Tuoreimpana kehityksenä VAV-järjestelmien ilmavirtasäätimissä ovat ultraäänimittauksella toimivat säätölaitteet. Ultraäänimittauksella toimivia säätölaitteita on tarjolla monelta eri valmistajalta. Kuvassa 9 näkyy leikkauskuva ultraäänimittauksella toimivasta Lindabin FTCU-ilmavirtasäätimestä. Ilmavirranmittaus näissä perustuu kahden anturin väliseen yhteyteen, joka mittaa ilmavirran nopeutta ultraääniaallon perusteella. Ultraäänimittauksen etuina verrattuna paine-erolla toimiviin säätölaitteisiin ovat tarkempi mittaustarkkaus pienillä ilmavirroilla, sekä säätölaitteen likaantumisen vaikutus mittaustarkkuuteen on pienempi. Virtausantureiden muotoilulla myös on vaikutus pölyyntymisen vähenemiseen. (11.)



KUVA 9. Lindab FTCU -ilmamääräsäädin ultraäänimittauksella (12)

## Mekaaniset vakiovirtaussäätimet

Mekaanisia vakiovirtaussäätimiä voidaan käyttää VAV-järjestelmissä tiloissa, jossa halutaan pitää ilmavirtaa vakiona. Se ei vaadi ulkoista virtalähdettä vaan toimii mekaanisesti jousikuormituksella. Vakiovirtaussäädin pitää ilmavirran vakiona kanavapaineesta riippumatta. Jokaisella kanavakoolle on määritelty oma ilmavirta- tai kanavapaine-alue, jossa vakiovirtaussäädin toimii tarkasti. Säätölaitteen ilmavirran asetusarvo asetetaan kääntämällä laitteen sivulla oleva osoitin haluttuun ilmavirta asteikon mukaan, minkä jälkeen asetusarvo lukitaan. Vakiovirtaussäätimessä suojaetäisyydet häiriötekijöihin vaikuttavat asteikkoarvon tarkkuuteen. Kuvassa 10 esitetty FläktGroup ECSD-vakiovirtaussäädin. (13.)



KUVA 10. FläktGroup mekaaninen ECSD-vakiovirtaussäädin (13, s. 2)

### 2.3 Ilmanvaihdon rakennusautomaatiikka

Rakennusautomaatiojärjestelmä on talotekniikan käyttöjärjestelmä, jonka tehtävänä on kerätä tietoa rakennuksen toiminnasta olosuhde-, kulutus- ja käyttötilatietojen avulla. Rakennusautomaatiojärjestelmällä ohjataan ja

säädetään rakennuksen talotekniikkaa siten, että sille asetetut sisäilmaolosuhteet saavutetaan mahdollisimman pienellä energiankulutuksella. Rakennusautomaatiojärjestelmässä on kolmetasoinen hierarkkinen rakenne, jonka päätasot ovat hallintotaso, automaatiotaso ja kenttätaso. Kuvassa 11 näkyy rakennusautomaatiojärjestelmän periaatekaavio ja rakenne. (4, s. 293-294.)



KUVA 11. Rakennusautomaatiojärjestelmän periaatekaavio (4, s. 294)

### 3 ILMAVIRTOJEN MITTAUS

Tässä luvussa käsitellään ilmavirtojen mittaukseen liittyvää teoriaa. Ilmanvirtojen mittauksella tarkoitetaan ilmanvaihtojärjestelmän ilmamäärien mittausta mittalaitteilla.

#### 3.1 Ilmavirtojen mittaus paine-eromenetelmällä

Yleisin tapa mitata ilmavirtoja on paine-eromenetelmällä päätelaitteista ja kanaviston mittauslaitteista. Paine-eromittaus suoritetaan paine-eromittarilla päätelaitteen tai mittauslaitteen mittausyhteistä valmistajan ohjeiden mukaan. Valmistajan ilmoittamasta päätelaitteen mittauspainekäyrästä tai taulukosta saadaan k-arvo eri asennoille. Mitatun paine-eron ja k-arvon avulla lasketaan ilmavirta l/s kaavalla 1. (7, s. 115–116.) Esimerkiksi 315mm FläktGroup-EMSD säätölaitteen k-arvoksi valmistaja ilmoittaa 40. Paine-eromittarilla mittalaipan paine-eroksi mittayhteistä mitataan 60 Pa. Ilmavirta saadaan laskemalla kaavan mukaisesti  $40 * \sqrt{60 \text{ Pa}} = 309,8 \text{ l/s}$ .

$$q_v = k * \sqrt{\Delta P}$$

KAAVA 1

$$q_v = \text{laskettu venttiilin ilmavirta (l/s)}$$

$$k = \text{venttiilin korjauskerroin (valmistajien säätökäyrät)}$$

$$\Delta P = \text{mitattu paine - ero venttiilin yli (Pa)}$$

#### 3.2 Ilmavirtojen mittaus virtausnopeuden perusteella

Mikäli kanavasta ei löydy mittauslaitetta, voidaan ilmavirta mitata myös virtausnopeuteen perustuvilla menetelmillä. Yleisimmät tavat mitata virtausnopeus perusteisesti ovat käyttää Pitot-putkea ja paine-eromittaria tai kuumalanka-anemometriä. Kuumalanka-anemometrin toiminta perustuu ilmavirtauksen kuumalankaa jäähdyttävään vaikutukseen. Teleskooppi anturin

päässä on noin 1 mm pitkä ohut volframilanka. Sähkövirran kuumentaman langan jäähtyminen riippuu sen ohi virtaavan ilmavirtauksen nopeudesta. Jäähtyvän langan vastus pienenee ja elektroninen vastusmittari muuttaa sen virtausnopeudeksi näytölle. TSI9600-monitoimimittarista valitaan ilmanvaihtokanavan koko ja muoto, jolloin se laskee suoraan tilavuusvirran l/s virtausnopeuden perusteella. (14, s. 129) Kuvassa 12 näkyy kuumalanka-anemometri ja TSI9600-monitoimimittari.



KUVA 12. TSI9600-monitoimimittari ja kuumalanka-anemometri

Pitot-putkella mitataan dynaamista painetta kanavassa, josta voidaan laskea ilmavirran virtausnopeus. Pitot-putken kärjestä löytyy paineenmittausaukko, joka kohdistetaan suoraan kohti ilmavirtausta, ja kärjen sivuilta staattisen paineen mittausaukot. Näiden paine-erosta saadaan mitattua dynaaminen paine. Virtausnopeus lasketaan dynaamisen paineen avulla kaavalla 2. (7, s.117–118.) Esimerkiksi Pitot-putkella mitataan dynaamiseksi paineeksi 150 Pa ja ilmantiheys on huoneenlämmössä 1,2 kg/m<sup>3</sup>. Virtausnopeudeksi saadaan kaavan mukaisesti  $\sqrt{(2 \cdot 150 \text{ Pa} / 1,2 \text{ kg/m}^3)} = 15,81 \text{ m/s}$ .

$$v = \sqrt{2P_d/\rho}$$

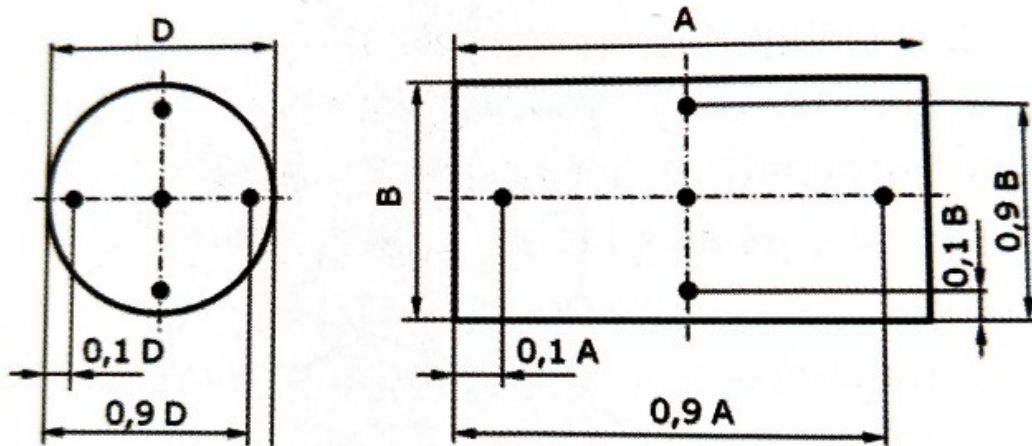
KAAVA 2

$P_d = \text{dynaaminen paine [Pa]}$

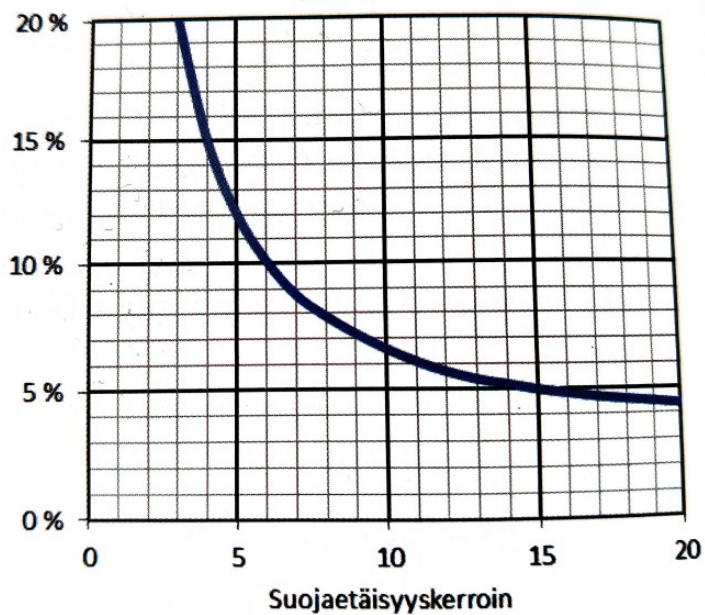
$\rho = \text{ilman tiheys [kg/m}^3\text{]}$

$v = \text{ilman nopeus [m/s]}$

Ilmanvirtaus kanavassa ei ole tasainen sen poikkipinnalla, joten siitä on otettava useita mittauksia luotettavan keskinopeuden saamiseksi. Yleisin tapa on käyttää 5-pistemenetelmää (kuva 13). Suojaetäisyyskerroimella tarkoitetaan etäisyyttä mittauspisteestä kanavistossa oleviin virtauksen häiriötekijöihin, kuten käyrät, haarat ja päätelaitteet. Suojaetäisyyskerroin lasketaan kanavan halkaisijan mukaan, esimerkiksi 2 metrin etäisyys mittauspisteestä häiriötekijään 400mm kanavalla suojaetäisyyskerroin on:  $2000\text{mm}/400\text{mm} = 5$ . (7, s. 118) Virhe 5-pistemenetelmässä suojaetäisyyden funktiona on esitettyä kuvassa 14.



KUVA 13. Mittauspisteiden sijainti kanavassa 5-pistemenetelmässä (7, s. 118)



KUVA 14. Virhe 5-pistemenetelmässä suojaetäisyyden funktiona (7, s. 118)

### 3.3 Mittausvirheet ja sallitut poikkeamat

Mittausvirheitä arvioidessa tulisi huomioida seuraavia tekijöitä:

- Mittauslaitteen aiheuttama virhe (kalibrointivirhe)
- Mittausmenetelmän virhe (esim. Pitot-putkea ei ole kohdistettu kohtisuoraan virtausta)
- Mittauspisteen vaikutus (esim. puutteelliset suojaetäisyydet)
- Mittauksen keskiarvon epävarmuus (mikäli mitattava suure vaihtelee suuresti mittauksen aikana)
- Lukemien muuntamisesta aiheutuva virhe (mittaustulosten pyöristys)
- Lukemavirhe (havaitsemisvirhe) (15, s. 42)

Ilmanvirtojen mittauksissa hyväksyttävät poikkeamat ovat:

- Ilmavirta järjestelmä- ja huoneistokohtaisesti  $\pm 10 \%$
- ilmavirta huonekohtaisesti  $\pm 20 \%$ , kuitenkin siten, että poikkeama voi aina olla vähintään  $1 \text{ dm}^3/\text{s}$  (15, s. 44)

### 3.4 Mittaustulosten dokumentointi

Ilmavirtojen mittaustulosten dokumentoinnissa on tärkeää, että kaikki oleellinen mittauksiin liittyvä tieto liitetään mittauspöytäkirjoihin ja dokumentteihin (6, s. 122).

Pöytäkirjaan tulisi sisällyttää:

- Puhaltimien nopeudet, esimerkiksi prosentteina, kanavapaineiden asetusarvot pascaleina ja säätölaitteiden asetusarvot
- Mittauksen tekijöiden nimet
- Päivämäärät ja mittauksen aikana vallitsevat olosuhteet kuten ulkolämpötila ja tuulen nopeus
- Käytetty ilmamäärämittari ja mittausmenetelmä, mittarin kalibroinnin päivämäärä
- Päätelaitteiden k-arvot ja asento

Ilmavirtojen osalta tulisi selvittää:

- Koko järjestelmän mitattu ilmavirta
- Kanavahaarojen/säätölaitteiden ilmavirrat
- Päätelaitteiden ilmavirrat

## 4 ESIMERKKIKOHDE

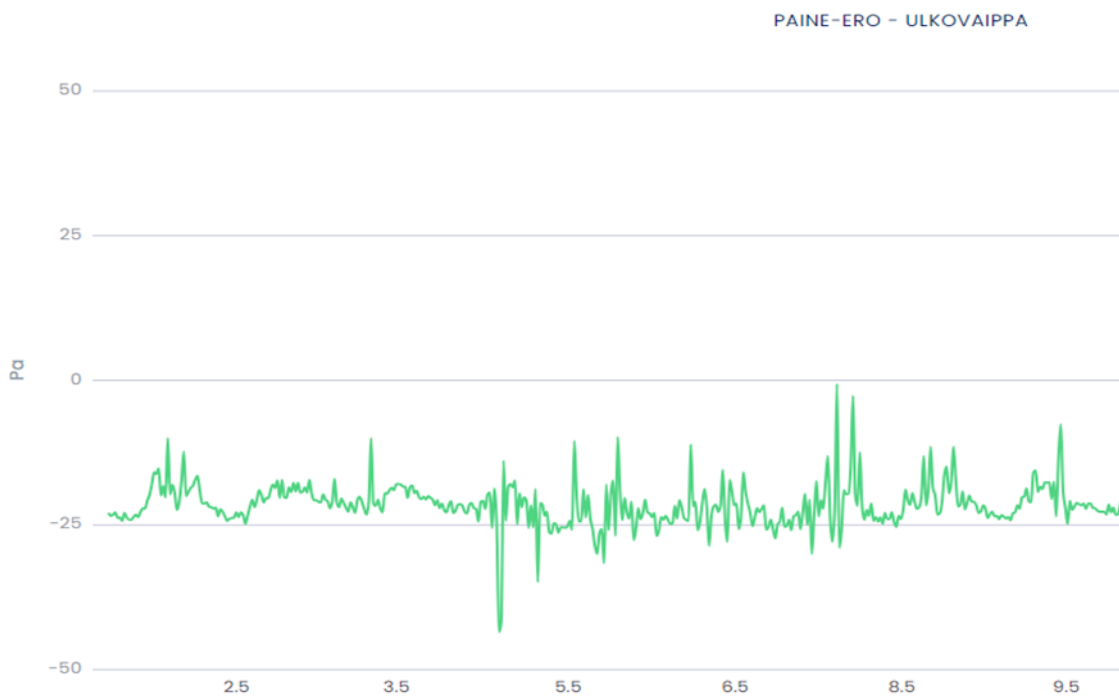
Tässä luvussa esitellään esimerkkikohteen VAV-järjestelmän tasapainotusprosessi, johon työ tehtiin. Esimerkkikohteena toimi vuonna 2011 rakennettu monikerroksinen koulurakennus. Kohteessa oli ongelmia paine-suhteissa sisätilojen välillä sekä rakennuksen vaipan yli. Rakennuksessa luokkatiloihin vaikuttavissa ilmanvaihtokoneissa oli käytössä muuttuva-ilmavirtajärjestelmä.

### 4.1 Tausta ja tavoitteet

Tässä opinnäytetyössä käytetään tasapainotusesimerkkinä rakennuksen yhden ilmanvaihtokoneen palvelualueetta. Ilmanvaihtokoneen palvelualueena oli yhdeksän luokkahuonetta rakennuksen toisessa kerroksessa. Työn tavoitteena oli löytää syy suuriin paine-ero vaihteluihin sisätiloissa ja rakennuksen vaipan yli, tarkastaa ja huoltaa käytössä olevat ilmavirtasäätimet sekä lopuksi tasapainottaa koko ilmanvaihtojärjestelmä. Tasapainotustyössä keskityttiin pelkästään ilmavirtaussäätimien tasapainotukseen, koska huonetilojen päätelaitteet olivat jo tasapainossa keskenään. Rakennuksessa oli käytössä Freesi-sisäilmapalveluohjelmisto, jolla kiinteistöhuolto pystyi seuraamaan rakennuksen olosuhdetyytyvää lämpötiloja ja rakennuksen painesuhteita. Paine-suhteita tarkasteltiin etäluettavilla paine-erologgereilla, joilla saatiin tietoa reaaliajassa painesuhteista rakennuksen vaipan yli jatkuvana mittauksena. Näitä paine-erologgereita oli asennettu tasapainotus esimerkki ilmanvaihtokoneen palvelualueelle kaksi kappaletta. Kuvissa 15 ja 16 on esitetty paine-erot rakennuksen vaipan yli ennen tasapainotustyötä viikon ajalta. Kuvissa pystyivillä näkyy paine-ero pascaleina ja vaakarivillä päivämäärä. Paine-ero rakennuksen vaipan viikon aikana oli keskimäärin -20 Pa alipaineinen.



KUVA 15. *Paine-ero rakennuksen vaipan yli luokkahuoneesta 4 ennen tasapainotusta*



KUVA 16. *Paine-ero rakennuksen vaipan yli käytävältä ennen tasapainotusta*

## Ilmanvaihtojärjestelmä kohteessa

Luokkatilojen ilmanvaihtokoneena oli Fläktwoodsien kanavapaine ohjattu tulo-poistoilmanvaihtokone pyörivällä lämmöntalteenotolla. Ilmanvaihtojärjestelmä oli huonekohtainen VAV-järjestelmä, joissa säätölaitteita ohjattiin hiilidioksidiarvojen perusteella. Ilmavirtasäätimet olivat FläktGroupin paine-eromittauksella toimivat EMSD-säätölaitteet. Hiilidioksidianturit sijaitsivat poistokanavissa joiden perusteella säätölaitteet toimivat. Kohteessa oli käytössä Schneider Electric-rakennusautomaatiojärjestelmä, jonka kautta ilmanvaihtokoneen toimintaa valvottiin ja säädettiin. Kuvassa 17 näkyy tasapainotuskohteen FläktWoods-ilmanvaihtokone.



KUVA 17. Tasapainotuskohteen ilmanvaihtokone

### 4.2 Ilmavirtasäätimien tarkastus

Työt aloitettiin ilmanvaihtokuvista paikallistamalla Optivent EMSD-ilmavirtaussäätimien sijainnit. Kaikki ilmavirtaussäätimet sijaitsivat luokkahuoneiden ulkopuolella käytävällä omissa haarakanavissaan.

Tarkastusprosessissa säätölaitteista tarkastettiin ilmavirtaussäätimien asetusarvot, tarkastettiin säätimien toiminta ja puhdistettiin mittausyhteet. Käyttöpaneelin eri asetuksia ja arvoja muutettiin käyttämällä pientä ruuvimeisseliä kääntämään laitteessa pyöriä potentiometrejä. FläktGroup EMSD-virtaussäätimen käyttöpaneelin käyttöohje näkyy liitteessä 1. Huonekohtaiset vaaditut ilmamäärät tulo- ja poistoilmalle esitetty taulukossa 2. Luokkahuoneissa tulo- ja poistoilman vaaditut ilmamäärät olivat yhtäsuuret.

TAULUKKO 2. Ilmanvaihtokoneen tilakohtaiset maksimi- ja minimi-ilmamäärät tulo- ja poistoilmalle.

| Ilmanvaihtokoneen palvelualue |                              |                             |
|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
|                               | Maksimi ilmamäärä l/s (Vmax) | Minimi ilmamäärä l/s (Vmin) |
| Luokkahuone 1                 | +290                         | +145                        |
| Luokkahuone 2                 | +290                         | +145                        |
| Luokkahuone 3                 | +290                         | +145                        |
| Luokkahuone 4                 | +290                         | +145                        |
| Luokkahuone 5                 | +290                         | +145                        |
| Luokkahuone 6                 | +300                         | +150                        |
| Luokkahuone 7                 | +300                         | +150                        |
| Luokkahuone 8                 | +450                         | +450                        |
| Luokkahuone 9                 | +450                         | +450                        |

Tilakohtaisen ilmavirtaussäätimen Vmax- ja Vmin-arvot tarkastettiin, että ne vastasivat ilmanvaihtosuunnitelmissa vaadittuja arvoja. Esimerkiksi luokkahuone 1-tilassa Vmax-arvona käytettiin 290 l/s, johon ilmamäärään säädin pyrkii käyttöaikana hiilidioksidikuormituksen ollessa korkealla ja vastaavasti käyttöajan ulkopuolella Vmin-arvoa 145 l/s, kun hiilidioksidikuormitus on matalampi. EMSD-ilmavirtaussäätimille suoritettiin moottoripellin testaus käyttämällä käyttöpaneelista TEST-asetusta. Testausasetuksella tarkastettiin, että moottoripelti kykeni menemään täysin auki- ja kiinni-asentoon ja sillä pystyttiin pakkoajamaan virtaussäädin halutessaan Vmax- ja Vmin-ilmavirralla laitteesta suoraan. Testauksen aikana oltiin myös kannettavan tietokoneen kautta etäyhteydessä ilmanvaihtokoneen automatiikkaan Schneider e-valvomo -sovelluksen kautta. Tällä tavalla varmistuttiin virtaussäätimien oikein kytkennästä. E-valvomon kautta pystyi reaaliajassa seuraamaan

ilmavirtasäätimen ilmamäärää laitekohtaisesti. Irroitamalla paine-eroletkut käyttöpaneelista virtaussäätimen mittayhteet ja paine-eroletkut puhdistettiin paineilman avulla. Tällä menettelyllä varmistuttiin mittayhteiden esteettömyydestä ja mahdollistetaan virtaussäätimen paine-eromittaus mahdollisimman tarkasti.

Tarkastuksen yhteydessä luokkahuoneiden 8 ja 9 virtaussäätimet eivät läpäisseet tarkastusta. Niissä säätimien moottoripellit olivat osittain jumiutuneet ja ne eivät reagoineet käyttöpaneelin käskyihin. Uusien virtaussäätimien asennuksen yhteydessä Schneiderin automatiikka-asentajan kanssa huomattiin e-valvomon kautta virtaussäätimien olevan kytkettynä ristiin väärinpäin. Automatiikassa luokkahuoneiden 8 ja 9 tulo puolen virtaussäädin näkyi automatiikassa poistopuolen säätimenä ja toisinpäin. Uusien virtaussäätimien asennuksen ja uudelleen kytkentöjen jälkeen virtaussäätimet saatiin toimimaan normaalisti.

Luokkahuoneen 3 tuloilmavirtaussäätimestä MODE-asetuksesta huomattiin ohjausviestialueen olevan väärin. Rakennusautomaatio oli ohjelmoitu siten, että virtaussäätimet toimivat 0-10 voltin ohjausviestillä. Luokkahuoneen 3 tuloilmavirtaussäätimen virheellinen asetusarvo 2-10 voltin ohjausviesti aiheutti Vmin-ilmamääräasetusta ajettaessa pellin kokonaan sulkeutumisen, jolloin minimi-ilmavirta-asetuksella tuloilmaa ei tullut lainkaan. Asetusarvon muutoksen jälkeen takaisin 0-10V:n asetusarvoon virtaussäädin toimi normaalisti.

### **4.3 Säätolaitteiden mittaustarkkuuden todentaminen**

Säätolaitteiden ilmavirtojen tarkastus suoritettiin kalibroidulla TSI9600-monitoimimittarilla ja kuumalanka-anemometrillä. Kuumalanka-anemometrillä mitattiin 5-pistemittausmenetelmällä kanavan kohdasta, jossa ilmavirtaus oli mahdollisimman häiriötön ja etäisyydet käyräyhteisiin mahdollisimman pitkät. Kanavaan porattiin porakoneella reikä, josta kuumalanka-anemometrillä mittaus suoritettiin. Kuvassa 18 on esitetty ilmamäärämittaus kuumalanka-anemometrillä ja TSI 9600-monitoimimittarilla ja kuvassa 19 etäisyys EMSD-laitteeseen

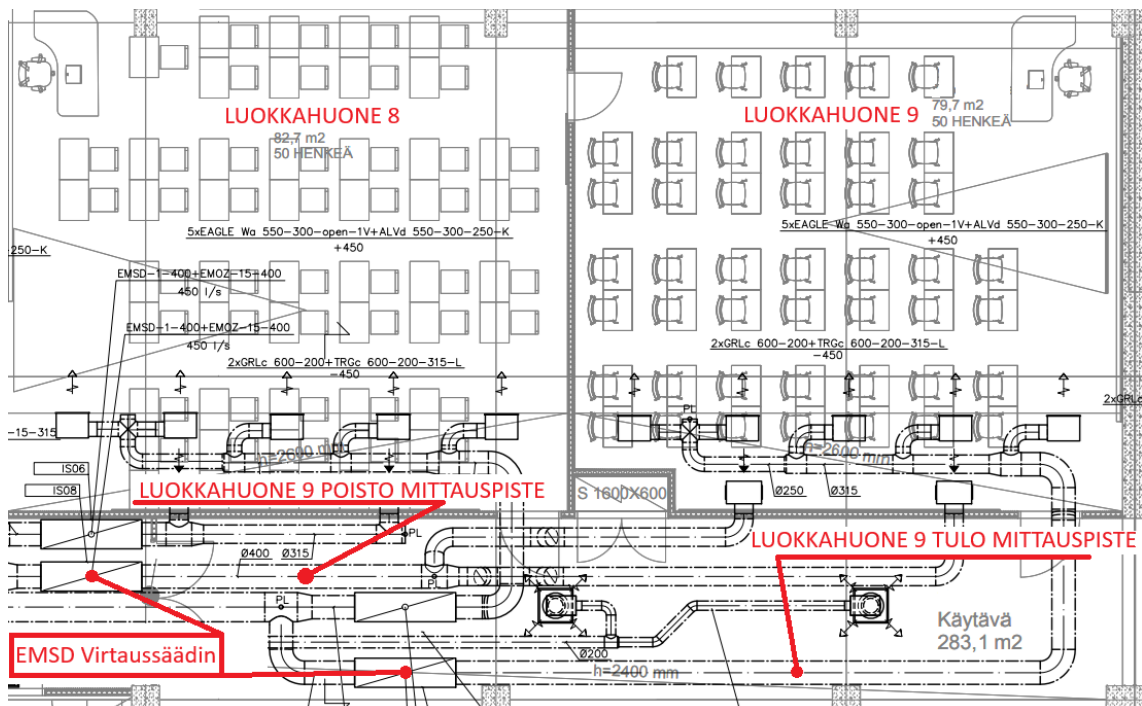
samasta mittauspisteestä. Kuvassa 20 näkyy luokkahuoneen 9 kuumalanka-anemometrimitauspisteet sekä EMSD-ilmavirtasäätimien sijainnit.



KUVA 18. Ilmamäärämittaus kuumalanka-anemometrillä ja TSI9600-monitoimimittarilla



KUVA 19. Kanavamittauspiste ja EMSD-säätölaite



KUVA 20. Luokahuoneen 9 ilmamäärien mittauspisteet kanavista

Luokkahuone 9-esimerkissä poistokanavan mittauspisteen etäisyys EMSD-säätölaitteesta ja t-haarasta oli 2 metriä, jolloin suojaetäisyyskertoimeksi saatiin 5, kun kanavakoko on 400 mm. Tulokanavassa etäisyys EMSD-säätölaitteeseen ja käyrään oli 4 metriä, jolloin 400 mm haarakanavalla saatiin suojaetäisyyskertoimeksi 10.

Mittaus suoritettiin luokkakohtaisesti ensin säätölaitteiden maksimi-ilmamäärällä ja sen jälkeen minimi-ilmamäärällä. Jokaisen säätölaitteen kohdalla mittauksissa todettiin todellisen ilmavirran olevan EMSD-säätölaitteen asetusarvoa suurempi. Säätölaitteen asetusarvoa laskettiin, kunnes kuumalanka-anemometrillä saatiin luokkatiloihin vaaditut maksimi- ja minimi-ilmamäärät. Esimerkkinä luokkahuoneen 9 vaadittuun maksimi-ilmamäärään 450 l/s EMSD-säätölaitteen asetusarvoiksi jouduttiin asettamaan tulopuolella 419 l/s ja poistopuolella 364 l/s. Vaaditun minimi-ilmamäärä asetuksen ollessa 225 l/s EMSD-säätölaitteiden asetusarvoiksi jouduttiin asettamaan tulopuolella 219 l/s ja poistopuolella 188 l/s. Mittauksen aikana kiinnitettiin myös huomiota säätölaitteiden suojaetäisyyksiin ja nämä kirjattiin ylös mittauspöytäkirjaan jokaisen säätölaitteen kohdalta. Taulukossa 3 näkyy luokkahuone 9:n mittaustulokset sekä säätölaitteen virhe prosentteina asetusarvon ja mitatun tuloksen välillä.

TAULUKKO 3. Luokkahuone 9 ilmamäärämittaus tulokset

| Luokkahuone 9              |           |                  |               |               |               |
|----------------------------|-----------|------------------|---------------|---------------|---------------|
| Ilmavirran tyyppi          | Vaadittu  | Säätölaitteen    | Kuumalanka-   | Suojaetäisyys | Säätölaitteen |
|                            | ilmavirta | asetusarvo (l/s) | anemometri    |               | virhe (%)     |
|                            | (l/s)     |                  | mittaus (l/s) |               |               |
| Maksimi-ilmavirta (tulo)   | 450       | 419              | 430,6         | Ei            | 2,8           |
| Maksimi-ilmavirta (poisto) | 450       | 364              | 440,6         | Ei            | 21            |
| Minimi-ilmavirta (tulo)    | 225       | 219              | 219,6         | Ei            | 0,3           |
| Minimi-ilmavirta (poisto)  | 225       | 188              | 243,1         | Ei            | 29,3          |

### Kanavapaineasetusten tarkastus

Mittaustyön aikana huomattiin ilmanvaihtokoneen kanavapaineasetuksen olevan liian korkea poistoilmakanavassa. Minimi-ilmavirta asetuksella säätöpellin asento oli useissa säätölaitteissa alle 30 % auki, kun säätölaitteen toiminta-alue on 30-

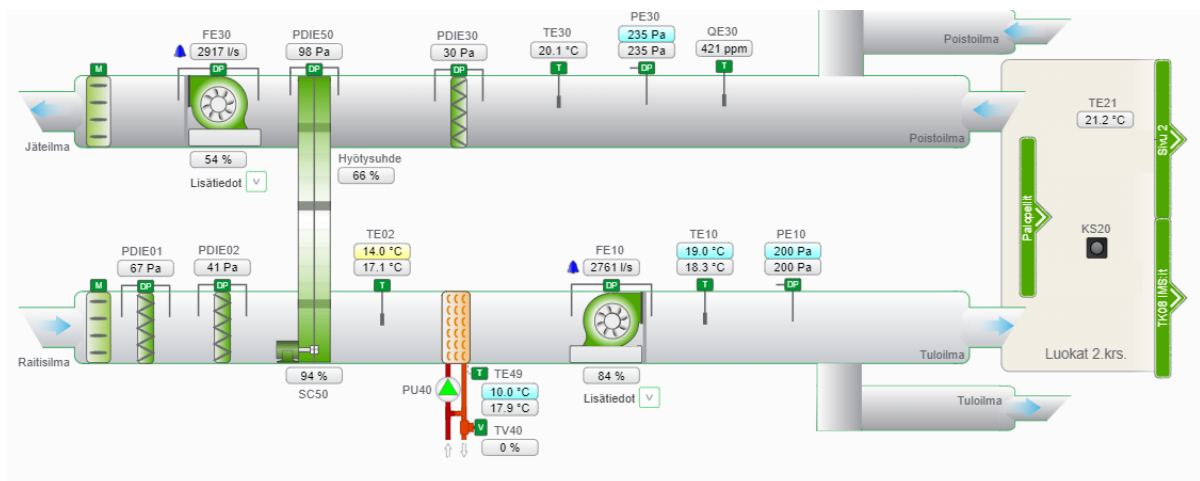
100 %. 0%:n asetuksella säätöpelti on täysin kiinni ja 100%:n asetuksella täysin auki. Maksimi-ilmavirralla myös kanaviston perimmäisen luokahuoneen säätölaite joutui kuristamaan säätöpeltiä saavuttaakseen vaaditun ilmamäärän. Liian korkea kanavapaine aiheuttaa turhaa energian kulutusta, kun säätölaitteet joutuvat kuristamaan ilmavirtaa turhaan. Korkea kanavapaine aiheuttaa myös mittauksen epätarkkuutta, jos säätölaitteen toiminta-alueesta poiketaan. Tulokanavassa kanavapaine asetus oli liian pieni, jolloin säätölaitteet eivät saavuttaneet vaadittua ilmamäärää, kun osa säätölaitteista oli täysin auki.

Mittaustyön aikana selvitettiin referenssisäätölaitteet, jossa säätöpellin asento oli eniten auki vaadittuun maksimi-ilmamäärään verrattuna. Tulokanavassa referenssi säätölaite oli luokassa 9 ja poistokanavassa luokassa 8. Poistokanavassa ilmanvaihtokoneen alkuperäinen kanavapaine asetus oli 365 Pa. Kanavapainetta muutettiin etäyhteydellä rakennusautomaatiikan kautta muuttamalla ilmanvaihtokoneen PE30-paineanturin asetusarvoa. Säätöpellin asentoa seurattiin toimilaitteessa olevan akselin ja asteikon perusteella. Kuvassa 21 näkyy Fläktwoods 227VM -kompaktisäädin ja säätöpellin asento.



KUVA 21. Fläktwoods 227VM -kompaktisäädin ja säätöpellin asento

Poistokanavan paineasetusta laskettiin kunnes referenssisäätölaitteen säätöpellin asento oli 90-100 % välillä maksimi-ilmavirralla. Poistokanavan uudeksi kanavapaineeksi asetettiin 235 Pa. Tulokanavan alkuperäinen kanavapaineasetus oli 185 Pa. Uudeksi tulokanavan asetettiin 200 Pa muuttamalla PE10 -kanavapaineanturin asetusarvoa, jolloin tulokanavan referenssisäätölaite saavutti vaaditun maksimi-ilmamäärän 90-100 % säätöpellin asennolla. Uusilla kanavapaineasetuksilla saavutettiin mahdollisimman taloudellinen käyntinopeus ilmanvaihtokoneelle ja säätölaitteiden säätöpeltien asennot pysyivät toiminta-alueen sisällä minimi-ilmamäärillä. Säätölaitteiden ilmamäärät tarkistettiin vielä uudelleen kuumalanka-anemometrillä kanavapainemuutoksen jälkeen. Kuvassa 22 näkyy ilmanvaihtokoneen näkymä rakennusautomaatiojärjestelmästä, josta muutokset tehtiin.



KUVA 22. Ilmanvaihtokoneen näkymä rakennusautomaatiojärjestelmästä

### Painesuhteiden mittaukset ja tarkastelu

Ilmanvaihtokoneen kanavapaine muutosten ja säätölaitteiden ilmamäärien säädön jälkeen huonetilojen painesuhteet tarkistettiin rakennuksen vaipan yli ikkunasta, sekä huoneiden ja käytävän väliltä. Säätötyöt suoritettiin kesän aikana jolloin rakennuksen sisälämpötila oli hyvin lähellä ulkolämpötilaa. Painesuhteiden mittauksia käytettiin apuvälineenä ilmamäärien tasapainotuksessa, jolla varmistettiin säätölaitteiden virtausmittauksien tulokset. Säätölaitteiden maksimi- ja minimi-ilmamäärä asetuksilla hetkellisillä paine-eromittauksilla tarkasteltiin luokkahuoneiden tulo- ja poistoilman välistä tasapainoa. Rakennuksen vaipan yli

paine-eromittauksissa tavoitetasona pidettiin luokkahuoneissa -2...-5 Pa, luokkahuoneiden ja käytävän välinen tavoitetaso +2...-2 Pa. A-insinöörien laatiman Ilmanvaihdon säädön yleisohje rakennusten paine-erojen hallintaan (2023) mukaan muuttuvilmavirtajärjestelmien normaalikäytössä paine-erojen tavoitetaso rakennuksen vaipan yli ja tilojen välillä on +5...-15 Pa. Taulukossa 4 näkyy yleisohjeen paine-erojen tavoitetasot (10).

TAULUKKO 4. *Opetus, liike- ja toimistorakennukset ja muut rakennukset paine-ero tavoitetasot (16, taulukko 4.3)*

| Rakennuksen tyyppi                            | Normaali käyttötilanne | Maksimi-arvo                  | Lisätieto   |
|---|------------------------|-------------------------------|---|
| Toimisto-, liike- tai opetusrakennus          | +5...-5 Pa             | +5...-10 Pa                   | Ei erillispoistoja, mitoitusilmavirta noin 2 l/(s·m <sup>2</sup> ) vähäinen kosteuslisä                                   |
| Paine-erojen hallinnan kannalta vaativa kohde | +5...-15 Pa            | Määritetään tapauskohtaisesti | Muuttuvilmavirtaiset ja siirtoilman käyttöön perustuvat järjestelmät, suuret mitoitusilmavirrat, yli 25 m korkea rakennus |

Mittaukset suoritettiin TSI9600-monitoimimittarilla ja painesuhteiden mittauksiin rakennetulla letkulla. Mittausletku oli rakennettu kokoonpainumattomasta ohuesta pvc muoviletkusta, johon lisättiin Produal PEL-USK-suojakotelo ja monitoimimittarin mittausyhdettä varten suurempaa joustavaa muoviletkua. PEL-USK-suojakotelo on tarkoitettu suojelemaan painemittausletkua tuulen vaikutuksilta ja muilta ulkotiloista vaikuttavilta paine-iskuilta. Kuvassa 23 näkyy painesuhteiden mittaukseen rakennettu letku kokonaisuudessaan. Painesuhteiden mittauksessa mittausletkun suojakotelon pää asetettiin ikkunan tai oven ulkopuolelle ja kytkettiin monitoimimittarin miinusmerkkiseen mittausyhteeseen. Kuvassa 24 näkyy painesuhteen mittaus rakennuksen vaipan yli ikkunasta TSI9600-monitoimimittarilla. Esimerkkikuvassa sisätilan alipaine oli -2,6 Pa rakennuksen vaipan yli.



KUVA 23. Rakennuksen vaipan yli ja sisätilojen välisten painesuhteiden mittaukseen rakennettu mittausletku.



KUVA 24. Paine-eromittaus rakennuksen vaipan yli ikkunasta

#### 4.4 Tulokset

Tasapainotuksen jälkeen Freesi-järjestelmän kautta tarkastetut paine-erot rakennuksen vaipan yli näyttivät mittaustuloksissa merkittävän eron lähtötilanteeseen verrattuna. Kuvissa 25 ja 26 näkyvät viikon ajalta paine-erologgerien mittausdataa käytävältä ja luokkahuoneesta 4. Viikon aikana keskiarvo paine-ero rakennuksen vaipan yli pysyi lähellä -2...-5 Pa arvoa, johon tasapainotustyötä tehdessä pyrittiin. Paine-erologgereissa ei ollut rakennuksen ulkopuolella mittausletkuissa suojakoteloja tuulensuojana, joten voimakkaat piikit mittaustuloksissa johtuivat luultavasti tuulenpuuskista tai muista olosuhdemuutoksista mittaushetkellä. Monitoimimittarilla tehtiin myös käsin tarkastusmittauksia eri luokista ja paine-erot olivat samalla tasolla kuin paine-erologgereilla. Monitoimimittarilla tehtyjä paine-eromittauksia ei kirjattu ylös.



KUVA 25. Paine-ero rakennuksen vaipan yli luokkahuoneesta 4 tasapainotuksen jälkeen



KUVA 26. *Paine-ero rakennuksen vaipan yli käytävältä tasapainotuksen jälkeen*

Taulukoissa 5 ja 6 näkyvät ilmamäärien mittaustulokset kuumalanka-anemometrillä, säätölaitteiden asetusarvot, vaaditut ilmamäärät ja säätölaitteen virheprosentti asetusarvon ja kuumalanka-anemometrin mittaustuloksen välillä. Tulokanavassa olevien säätölaitteiden virheprosenttikeskisarvo oli maksimi-ilmavirralla 14,2 % ja minimi-ilmavirralla 23,9 %. Poistokanavassa olevien säätölaitteiden virheprosenttikeskisarvo oli maksimi-ilmavirralla 20,7 % ja minimi-ilmavirralla 28,5 %.

Huomioitavaa mittaustuloksissa oli luokahuoneiden 8 ja 9 säätölaitteiden pienempi virheprosentti verrattuna alkuperäisiin säätölaitteisiin, jotka olivat olleet käytössä vuodesta 2011 asti. Uusien tulokanavassa olevien säätölaitteiden virheprosenttikeskisarvo maksimi-ilmavirralla oli 2,9 % ja minimi-ilmavirralla 0,8 %. Poistokanavassa uusien säätölaitteiden virheprosentti oli maksimi-ilmavirralla 13,7 % ja minimi-ilmavirralla 30,3 %. Alkuperäisillä säätölaitteilla virheprosentti tulokanavassa oli maksimi-ilmavirralla 17,6 % ja minimi-ilmavirralla 30,5 %. Alkuperäisillä säätölaitteilla poistokanavassa virheprosentti oli maksimi-ilmavirralla 22,7 % ja minimi-ilmavirralla 28 %.

Ilmanvaihtokoneen palvelualueen yhteensä 18:sta säätölaitteesta vain neljässä poistokanavassa olevasta säätölaitteesta oli valmistajan suosittelema suojaetäisyys ilmavirtauksen häiriötekijöihin. Säätölaitteiden mittaustarkkuuteen suojaetäisyydellä ei kuitenkaan tässä ilmanvaihtokoneen palvelualue esimerkissä ollut merkitystä, vaikka suosituksia ei oltu noudatettu. Säätölaitteiden virheprosentti suojaetäisyydellä oli 24,8 % ja puutteellisella suojaetäisyydellä olevien säätölaitteiden 21 %, kun huomioitiin tulo- ja poistokanavien säätölaitteet.

TAULUKKO 5. Luokkahuoneet 1-5 ilmamäärien mittaustulokset

| Tila          | Ilmavirran tyyppi          | Vaadittu ilmavirta (l/s) | Säätölaitteen asetusarvo (l/s) | Kuumalanka-anemometri mittaus (l/s) | Suojaetäisyys | Säätölaitteen virhe (%) | Koko (mm) |
|---------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------------|-------------------------|-----------|
| Luokkahuone 1 | Maksimi-ilmavirta (tulo)   | 290                      | 249                            | 306                                 | Ei            | 22,9                    | 315       |
| Luokkahuone 1 | Maksimi-ilmavirta (poisto) | 290                      | 227                            | 300                                 | Kyllä         | 32,2                    | 315       |
| Luokkahuone 1 | Minimi-ilmavirta (tulo)    | 145                      | 107                            | 135                                 | Ei            | 26,2                    | 315       |
| Luokkahuone 1 | Minimi-ilmavirta (poisto)  | 145                      | 122                            | 139,3                               | Kyllä         | 14,2                    | 315       |
|               |                            |                          |                                |                                     |               |                         |           |
| Luokkahuone 2 | Maksimi-ilmavirta (tulo)   | 290                      | 249                            | 281,5                               | Ei            | 13,1                    | 315       |
| Luokkahuone 2 | Maksimi-ilmavirta (poisto) | 290                      | 232                            | 290,9                               | Ei            | 25,4                    | 315       |
| Luokkahuone 2 | Minimi-ilmavirta (tulo)    | 145                      | 109                            | 152                                 | Ei            | 39,4                    | 315       |
| Luokkahuone 2 | Minimi-ilmavirta (poisto)  | 145                      | 112                            | 148,2                               | Ei            | 32,3                    | 315       |
|               |                            |                          |                                |                                     |               |                         |           |
| Luokkahuone 3 | Maksimi-ilmavirta (tulo)   | 290                      | 232                            | 286,2                               | Ei            | 23,4                    | 315       |
| Luokkahuone 3 | Maksimi-ilmavirta (poisto) | 290                      | 246                            | 293,7                               | Kyllä         | 19,4                    | 315       |
| Luokkahuone 3 | Minimi-ilmavirta (tulo)    | 145                      | 119                            | 146,7                               | Ei            | 23,3                    | 315       |
| Luokkahuone 3 | Minimi-ilmavirta (poisto)  | 145                      | 114                            | 157                                 | Kyllä         | 37,7                    | 315       |
|               |                            |                          |                                |                                     |               |                         |           |
| Luokkahuone 4 | Maksimi-ilmavirta (tulo)   | 290                      | 254                            | 297,1                               | Ei            | 17,0                    | 315       |
| Luokkahuone 4 | Maksimi-ilmavirta (poisto) | 290                      | 249                            | 285,9                               | Kyllä         | 14,8                    | 315       |
| Luokkahuone 4 | Minimi-ilmavirta (tulo)    | 145                      | 119                            | 156,3                               | Ei            | 31,3                    | 315       |
| Luokkahuone 4 | Minimi-ilmavirta (poisto)  | 145                      | 119                            | 152                                 | Kyllä         | 27,7                    | 315       |
|               |                            |                          |                                |                                     |               |                         |           |
| Luokkahuone 5 | Maksimi-ilmavirta (tulo)   | 290                      | 256                            | 292,5                               | Ei            | 14,3                    | 315       |
| Luokkahuone 5 | Maksimi-ilmavirta (poisto) | 290                      | 246                            | 292,4                               | Kyllä         | 18,9                    | 315       |
| Luokkahuone 5 | Minimi-ilmavirta (tulo)    | 145                      | 112                            | 148,9                               | Ei            | 32,9                    | 315       |
| Luokkahuone 5 | Minimi-ilmavirta (poisto)  | 145                      | 114                            | 151,9                               | Kyllä         | 33,2                    | 315       |

TAULUKKO 6. Luokkahuoneet 6-9 ilmamäärien mittaustulokset

| Tila          | Ilmavirran tyyppi          | Vaadittu ilmavirta (l/s) | Säätölaitteen asetusarvo (l/s) | Kuumalanka-anemometri mittaus (l/s) | Suojaetäisyys | Säätölaitteen virhe (%) | Koko (mm) |
|---------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------------|-------------------------|-----------|
| Luokkahuone 6 | Maksimi-ilmavirta (tulo)   | 300                      | 268                            | 288,1                               | Ei            | 7,5                     | 315       |
| Luokkahuone 6 | Maksimi-ilmavirta (poisto) | 300                      | 229                            | 293,9                               | Ei            | 28,3                    | 315       |
| Luokkahuone 6 | Minimi-ilmavirta (tulo)    | 150                      | 127                            | 156                                 | Ei            | 22,8                    | 315       |
| Luokkahuone 6 | Minimi-ilmavirta (poisto)  | 150                      | 117                            | 149,9                               | Ei            | 28,1                    | 315       |
| Luokkahuone 7 | Maksimi-ilmavirta (tulo)   | 300                      | 249                            | 311,1                               | Ei            | 24,9                    | 315       |
| Luokkahuone 7 | Maksimi-ilmavirta (poisto) | 300                      | 246                            | 294,2                               | Ei            | 19,6                    | 315       |
| Luokkahuone 7 | Minimi-ilmavirta (tulo)    | 150                      | 107                            | 146,9                               | Ei            | 37,3                    | 315       |
| Luokkahuone 7 | Minimi-ilmavirta (poisto)  | 150                      | 122                            | 149,5                               | Ei            | 22,5                    | 315       |
| Luokkahuone 8 | Maksimi-ilmavirta (tulo)   | 450                      | 423                            | 433                                 | Ei            | 2,4                     | 400       |
| Luokkahuone 8 | Maksimi-ilmavirta (poisto) | 450                      | 407                            | 433                                 | Ei            | 6,4                     | 400       |
| Luokkahuone 8 | Minimi-ilmavirta (tulo)    | 225                      | 223                            | 225,8                               | Ei            | 1,3                     | 400       |
| Luokkahuone 8 | Minimi-ilmavirta (poisto)  | 225                      | 172                            | 226                                 | Ei            | 31,4                    | 400       |
| Luokkahuone 9 | Maksimi-ilmavirta (tulo)   | 450                      | 419                            | 430,6                               | Ei            | 2,8                     | 400       |
| Luokkahuone 9 | Maksimi-ilmavirta (poisto) | 450                      | 364                            | 440,6                               | Ei            | 21                      | 400       |
| Luokkahuone 9 | Minimi-ilmavirta (tulo)    | 225                      | 219                            | 219,6                               | Ei            | 0,3                     | 400       |
| Luokkahuone 9 | Minimi-ilmavirta (poisto)  | 225                      | 188                            | 243,1                               | Ei            | 29,3                    | 400       |

## 5 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli tasapainottaa muuttuvilmavirtajärjestelmä koulurakennuksessa ja parantaa sen toimivuutta erityisesti painesuhteiden osalta. Työn tavoitteena oli tunnistaa sisäilman painesuhteiden ongelmien syyt rakennuksessa, tarkastaa ja huoltaa huonekohtaiset säätölaitteet ja lopuksi tasapainottaa muuttuvilmavirtajärjestelmä yhden ilmanvaihtokoneen palvelualueella. Työssä keskityttiin erityisesti muuttuvilmavirtajärjestelmän säätölaitteiden toimintaan ja ongelmiin, säätölaitteiden mittaustarkkuuden todentamiseen, ilmavirtojen säätöön ja painesuhteiden hallintaan rakennuksen vaipan yli ja sisätilojen välillä.

Työ alkoi huonekohtaisten säätölaitteiden asetusten ja toiminnan tarkastuksilla. Säätölaitteet puhdistettiin, asetukset ja toiminta tarkastettiin, neljä viallista säätölaitetta vaihdettiin uusiin. Säätölaitteiden asetuksissa ja kytkennöissä havaittiin virheitä työn aikana, jotka korjattiin. Huonekohtaisten säätölaitteiden ilmavirrat tarkastettiin mittaamalla kuumalanka-anemometrillä kanavasta ja mittaustulosten perusteella säätölaitteiden asetusarvoja hienosäädettiin vastaamaan vaadittuja ilmamääriä. Lisäksi ilmanvaihtokoneen kanavapaine asetuksia ja säätölaitteiden säätökäyriä jouduttiin muuttamaan rakennusautomaation kautta työn edetessä.

Painesuhteiden mittaukset rakennuksen vaipan yli ennen ja jälkeen tasapainotuksen osoittivat selkeän parannuksen lähtötilanteeseen verrattuna. Rakennuksen alipaineisuus laski keskimäärin -20 Pa tasolta tasapainotustyön tavoitetasolle -2...-5 Pa. Lisäksi sisätilojen välillä ei havaittu painesuhteiden hallitsematonta vaihtelua tasapainotustyön jälkeen. Tämä viittaa siihen, että tasapainotustyö onnistui ja kalibroidulla kuumalanka-anemometrillä saadut mittaustulokset olivat luotettavampia kuin säätölaitteiden oma paine-eroon perustuva mittaustapa. Ilmamäärien mittaustuloksissa havaittiin tämän ilmanvaihtokoneen palvelualueen osalta, että huonekohtaisilla minimi-ilmamäärillä säätölaitteiden mittaustarkkuus oli heikompi, poistokanavien säätölaitteissa oli heikompi mittaustarkkuus verrattuna tuloilmaan huolimatta

suojaetäisyyksistä keskimäärin ja uusien säätölaitteiden mittaustarkkuus oli selvästi parempi vanhoihin laitteisiin verrattuna.

Muuttuvailmavirtajärjestelmän rakennusvaiheessa tulisi kiinnittää erityistä huomiota säätölaitteiden sijoitteluun ja huollettavuuteen. Rakennusautomaation näkökulmasta järjestelmä kannattaa suunnitella ja toteuttaa mahdollisimman yksinkertaiseksi, koska monimutkaisissa järjestelmissä virheiden mahdollisuus on aina suurempi. Ennen rakennuksen luovutusta koko ilmanvaihtojärjestelmän toiminnan tarkastus tulisi tehdä huolellisesti ja varmentaa säätölaitteiden mittaustarkkuus. Tarvittaessa säätölaitteen asetusarvoja säädetään vastaamaan todellisia vaadittuja ilmamääriä ja käyttää painesuhdemittauksia rakennuksen vaipan yli ja sisätilojen välillä ilmamäärämittausten tukena. Muuttuvailmavirtajärjestelmä vaatii tiheämpään huoltotoimenpiteitä kuin perinteinen vakioilmavirtajärjestelmä. Käyttöaikana rakennuksen ylläpitäjän tulisi kiinnittää myös erityistä huomioita muuttuvailmavirtajärjestelmän säätölaitteiden toiminnantarkastuksiin ja huoltoon riittävän usein.

Työ osoitti kuinka pienikin virhe muuttuvailmavirtajärjestelmän säätölaitteiden asennuksessa, kytkennöissä tai toiminnassa voivat vaikuttaa koko järjestelmän toimivuuteen. Ilmanvaihtonmittaajan näkökulmasta työ osoitti, kuinka tärkeää on ymmärtää koko ilmanvaihtojärjestelmän, rakennusautomaatiojärjestelmän ja muuttuvailmavirtajärjestelmän säätölaitteiden toiminta hyvän lopputuloksen saamiseksi tasapainotustyössä. Näin voidaankin todeta, että tämä opinnäytetyö tuo tärkeää informaatiota muuttuvailmajärjestelmistä talotekniikan alalle, sillä näiden asioiden kanssa painivat niin rakentajat, kiinteistöjen ylläpitäjät kuin käyttäjätkin. Työn tuloksia voidaan soveltaa käytännön kohteissa, joissa on käytössä huone- tai vyöhykekohtainen muuttuvailmavirtajärjestelmä.

Tätä tutkimusta voisi laajentaa esimerkiksi vertailemalla paine-eromittauksella ja ultraäänimittauksella toimivien säätölaitteiden mittaustarkkuutta eri käytännönkohteissa. Myös vakioilmavirtajärjestelmien ja muuttuvailmavirtajärjestelmien kokonaiskustannuksien vertailu koko rakennuksen elinkaaren aikana voisi olla hyvä tutkimusaihe.

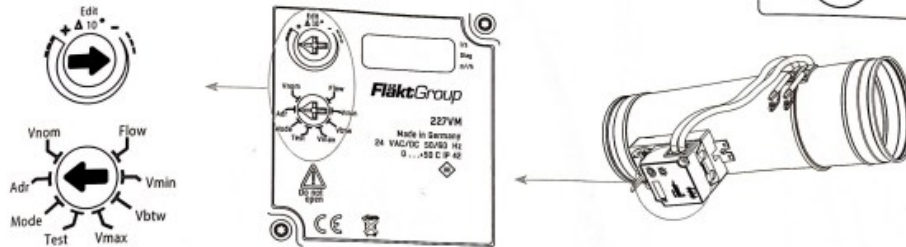
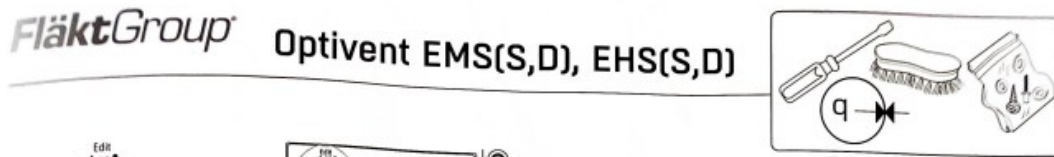
## LÄHTEET

1. Porthan, P. 2023. Haasteita tarpeenmukaisessa ilmanvaihdossa. Talotekniikka-lehti, 26.4.2023.  
Luettavissa: <https://talotekniikka-lehti.fi/haasteita-tarpeenmukaisessa-ilmanvaihdossa-2/>. Luettu: 19.5.2025.
2. Sainio, J. s.a. Lämpö, vesi ja ilmanvaihto 1970-luvun kouluissa.  
Luettavissa: <https://www.koulurakennus.fi/1970-luvun-koulu/talotekniikka>.  
Luettu: 21.3.2025.
3. FINVAC ry. 2019. Opas ilmanvaihdon mitoittamiseen muissa kuin asuinrakennuksissa 2019.  
Luettavissa: [https://finvac.org/wp-content/uploads/2020/06/Opas ilmanvaihdon mitoittamiseen muissa kuin asuinrakennuksissa 2019b.pdf](https://finvac.org/wp-content/uploads/2020/06/Opas_ilmanvaihdon_mitoittamiseen_muissa_kuin_asuinrakennuksissa_2019b.pdf) .  
Luettu: 21.2.2025.
4. Sandberg, E. (toim.) 2014. Ilmastointitekniikka osa 1, Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Ilmastointitekniikka 1. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.
5. RT 103807 Ilmanvaihtojärjestelmän puhdistus ja ilmavirtojen säätö. Urakoitsijan ohje. Rakennustieto Oy.  
Luettavissa: <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/RT%20103807>. Vaatii lisenssin. Luettu 22.5.2025.
6. FläktGroup. s.a. OptiVent käyttöopas.  
Luettavissa: <https://www.flaktgroup.com/api/v1/Documents/135068?analytics=0>.  
Luettu 20.5.2025.
7. Sandberg, E. (toim.) 2014. Ilmastointitekniikka osa 2, Ilmastointilaitoksen mitoitus. Ilmastointitekniikka 2. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.
8. Sisäilmayhdistys. 2023. Tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän ohje 2023.  
Luettavissa: [https://sisailmayhdistys.fi/wp-content/uploads/2023/12/Tarpeenmukaisen ilmanvaihtojarjestelman ohje 20220518.pdf](https://sisailmayhdistys.fi/wp-content/uploads/2023/12/Tarpeenmukaisen_ilmanvaihtojarjestelman_ohje_20220518.pdf). Luettu: 20.5.2025.

9. FläktGroup. s.a. EMSD tekninen esite.  
Luettavissa: <https://www.flaktgroup.com/api/v1/Documents/129356?analytics=0>. Luettu: 21.5.2025.
10. FläktGroup. s.a. EMS(S,D), EHS(S,D) + 327VMZ-MB Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje.  
Luettavissa: <https://www.flaktgroup.com/api/v1/Documents/1337510?analytics=0>. Luettu: 21.5.2025.
11. Lindab. s.a. FTCU ilmavirtasäädin käyttöohje.  
Luettavissa: <https://www.lindab.fi/globalassets/commerce/lindabwebproductsdoc/assets/production/yta5ntvmntetngnmzs00mwfjltk3yj-kytydmn2jijywq5ogq5/5250483847438658084/technical-ftcu.pdf?v=1746930313>. Luettu: 11.5.2025.
12. Lindab. s.a. FTCU-leikkauskuva.  
Luettavissa: <https://www.lindab.co.uk/globalassets/media/se/pages/losningar/images/ultralink-see-through.png?width=1200&v=1742690569>. Luettu: 20.5.2025.
13. FläktGroup. s.a. ECSD-vakiovirtaussäädin käyttöohje.  
Luettavissa: <https://www.flaktgroup.com/api/v1/Documents/128962?analytics=0>.  
Luettu: 12.5.2025.
14. Harju, P. 2008. Ilmastointitekniiikan oppikirja 2. Penan tieto-opus.
15. Mäkinen, S., Alanko, A., Lindholm, J., Määttä, J., Luoma, J., Näppi, J., & Penttilä, J. 2023. Ilmavirtojen mittaus ja tasapainotus -opus. Talotekniikkaliitto ry.  
Luettavissa: [https://talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/2024-01/Ilmavirtojen%20mittaus%20ja%20tasapainotus%20-opas\\_19.12.2023.pdf](https://talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/2024-01/Ilmavirtojen%20mittaus%20ja%20tasapainotus%20-opas_19.12.2023.pdf). Luettu: 17.5.2025.
16. A-insinöörit. 2023. Ilmanvaihdon säädön yleisohje rakennusten painerojen hallintaan Tiiviit rakennukset  
Luettavissa: <https://talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/2024-01/Ilmanvaihdon%20s%C3%A4%C3%A4t%C3%B6hjeet%20tiiville%20rakennuksille%206.12.2023.pdf>. Luettu: 17.5.2025.

## **LIITTEET**

Liite 1 FläktGroup EMSD käyttöohje



|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
| 1  | <p><b>Air flow unit selection</b><br/>Ilmavirtayksikön valinta<br/>Inställning av luftflödesenhet</p>  |  |  |  |
| 2  | <p><b>Vmax value setup</b><br/>Vmax asettele<br/>Vmax inställning</p>                                  |  |  | <p>example/esimerkki/exempel:<br/>Vmax = 100 l/s</p> <p>Notel/Huoml/OBS!</p> |
| 3  | <p><b>Vmin value setup</b><br/>Vmin asettele<br/>Vmin inställning</p>                                  |  |  | <p>example/esimerkki/exempel:<br/>Vmin = 50 l/s</p>                          |
| 4  | <p><b>Input signal range setup</b><br/>Ohjauksviestialueen asettele<br/>Insignalområde inställning</p> |  |  |  |
| <p>After setup / Asettelujen jälkeen / Efter inställningar</p> |  |  |  |  |
|  | <p>Flow rate<br/>Ilmavirta (l/s)<br/>Luftflöde</p>   | <p>example/esimerkki/exempel: 60 l/s</p> |  |  |