



Lari Silvonon

# Ilmastointikoneen analytiikka pilvivalvomojärjestelmässä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Talotekniikka

Opinnäytetyö

30.3.2023

# Tiivistelmä

Tekijä: Lari Silvonen  
Otsikko: Ilmastointikoneen analytiikka pilvivalvomojärjestelmässä  
Sivumäärä: 47 sivua  
Aika: 30.3.2023

Tutkinto: insinööri (YAMK)  
Tutkinto-ohjelma: talotekniikka  
Ammatillinen pääaine: sähköinen talotekniikka  
Ohjaajat: lehtori Jarmo Tapio  
operatiivinen johtaja Timo Finnilä

---

Ilmastointikoneet ovat yksi suurimmista yksittäisistä energian kuluttajista kiinteistöissä. Optimoimalla koneiden toimintaa ja korjaamalla vikatilanteet nopeasti voidaan energian kulutusta ja kustannuksia minimoida. Opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää analytiikkamalleja ilmastointikoneiden toiminnan seurantaan. Analytiikkamallit tuottavat lisäarvoa asiakkaalle automatisoimalla systemaattisesti suoritettavia toistuvia tehtäviä ja seurantaprosesseja.

Ilmastointikoneiden dataa kerättiin kohteiden rakennusautomaationjärjestelmän etäyhteyden avulla AFRY Monitor -alustaan. AFRY Monitor on skaalautuva pilvivalvomojärjestelmä, joka tiedon keruun ja jäsentelyn lisäksi kykenee havaitsemaan datasta sellaisia poikkeamia prosessien toiminnassa, jotka ihmissilmältä jäävät usein huomaamatta. Optimoimalla ilmastointikoneen toimintaa järjestelmän käyttö parantaa kiinteistön energiatehokkuutta ja sisäilman olosuhteita.

Työn teoriaosuudessa tutustuttiin tiedonsiirtoketjuun kenttälaitteelta alkaen aina pilvivalvomon käyttöliittymään asti. Ilmankäsittelyprosessille ja siihen osallistuville laitteille asetettujen toiminnallisten vaatimusten avulla ilmastointikoneen toiminnalle johdettiin joukko sääntöpohjaisia ja tilastollisia analytiikkamalleja, joiden tehtävänä on havaita ilmankäsittelyprosessissa tapahtuvat vikatilanteet, diagnosoida vikatilanteiden aiheuttajat sekä ehdottaa korjaavia tai koneiden toimintaa kehittäviä toimenpiteitä.

Opinnäytetyössä tutustuttiin läheisemmin kolmeen rakenteeltaan hieman erilaiseen ilmastointikoneeseen, joiden toimintaa analysoitiin lopuksi työssä kehitettyjen mallien avulla. Havaittuaan poikkeaman tai kehityskohteen ilmastointikoneen toiminnassa järjestelmä antaa käyttäjälle herätteen, jonka perusteella käyttäjä pystyy suorittamaan tarvittavat korjaus- tai säätötoimenpiteet. Automaattiset analytiikkamallit havaitsivat jokaisen ilmastointikoneen toiminnassa jotain korjattavaa. Voidaan siis todeta, että hyödyntämällä tässä opinnäytetyössä kehitettyjä analytiikkamalleja laajemmalla otannalla, voidaan saavuttaa yhteiskunnallisestikin merkittäviä säästöjä kiinteistöjen energiakustannuksissa.

Avainsanat: ilmastointi, valvomo, rakennusautomaatio

## Abstract

Author: Lari Silvonen  
Title: Analytics of Air Conditioner in Cloud Control System  
Number of Pages: 47 pages  
Date: 30 March 2023

Degree: Master of Engineering  
Degree Programme: Building Services Engineering  
Supervisors: Jarmo Tapio, Senior Lecturer  
Timo Finnilä, Chief Operating Officer

---

The goal of this final year project was to develop analytic models for monitoring the operation of air conditioning machines. The purpose of the models was to detect malfunctions in the air handling process, diagnose the causes, and propose corrective or otherwise improving measures.

In the project, three structurally different air conditioners were investigated in detail. Data from the studied air conditioners was collected to the cloud control system with remote connection. A set of rule-based and statistical analytic models were derived mainly from the functional requirements set for the air handling process and the devices participating in it. The models were programmed into the cloud control system by using its own graphical programming tool.

When the analytic models were used on the three air conditioners that were studied in this project, the models found something to fix in the operation of all three machines. It can therefore be stated that by utilizing the models developed in this project with a wider sample, significant savings in the energy costs of buildings can be achieved. Models also produce added value for the customer by automating systematically performed repetitive tasks and monitoring processes.

Keywords: air conditioning, cloud control, building automation system

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Rakennusautomaatiojärjestelmä	2
2.1	Tehtävä ja rakenne	2
2.2	Rakennusautomaatiopisteet	5
2.3	Toiminnallisuuksia	6
2.4	Etäkäyttö	8
3	Käytetyn pilvivalvomojärjestelmän esittely	10
3.1	Järjestelmäalusta	10
3.2	Käyttöliittymä	10
3.3	Ohjelmointi	12
4	Ilmastointikoneen osat ja toimintaperiaatteet	13
4.1	Sulkupelti	13
4.2	Suodatin	13
4.3	Lämmöntalteenotto	14
4.4	Säätö- ja sekoituspelti	14
4.5	Lämmitys- ja jäähdytyspatterit	16
4.6	Puhallin	16
5	Ilmastointikoneen suorituskykyvaatimukset	17
5.1	Tuloilman lämpötila	18
5.2	Lämmityspatterin paluuveden lämpötila	19
5.3	Ominaisähköteho	19
5.4	Ilman kosteus	22
5.5	Lämpöteho	23
5.6	Lämmöntalteenoton lämpötilasuhteet	23
5.7	Muita ilmastointikoneen suorituskykyvaatimuksia	26
6	Tutkittavien ilmastointikoneiden kuvaus	27
6.1	Kone 1: Toimistokiinteistö nestekiertoisella lämmöntalteenotolla	27
6.2	Kone 2: Toimistokiinteistö lämpöputkipatterilla	29

6.3 Kone 3: Asuinkiinteistö ristivirtalämmöntalteenotolla	31
7 Diagnostiikkametodit	31
8 Kehitetyt analytiikkaratkaisut	34
8.1 Tuloilman lämpötilan säädön toiminta	34
8.2 Lämmöntalteenoton toiminta	38
8.3 Ilmansuodattimien toiminta	41
8.4 Puhaltimien toiminta	43
9 Yhteenveto	43
10 Jatkotoimenpiteet	44
Lähteet	46

## Lyhenteet

- AI: Analog Input, analoginen tulo. KytKentäpiste kenttälaitteelle rakennusautomaatiossa.
- AO: Analog Output, analoginen lähtö. KytKentäpiste kenttälaitteelle rakennusautomaatiossa.
- DI: Digital Input, digitaalinen tulo. KytKentäpiste kenttälaitteelle rakennusautomaatiossa.
- DO: Digital Output, digitaalinen lähtö. KytKentäpiste kenttälaitteelle rakennusautomaatiossa.
- EC-moottori: Electronically Commutated motor. Elektronisesti kommutoitu moottori.
- I/O-moduuli: Input-Output-moduuli. Yleisnimitys kenttälaitteiden erityyppisille fyysisille kytkentämoduuleille.
- SFP: Specific Fan Power. Ilmanvaihtojärjestelmän, ilmastointikoneen tai puhaltimen ominaissähköteho kW/(m<sup>3</sup>/s)
- TCP/IP: Useista tietokoneverkkoprotokollista koostuva tietoliikenneprotokollapino, joka on nimetty kahden protokollan mukaan: TCP (Transmission Control Protocol) ja IP (Internet Protocol). Vastaa tiedonsiirrosta kahden eri laitteen välillä. [Klusaité 2022]
- VAK: Valvonta-alakeskus. Valvonta-alakeskukseen sijoitetaan rakennusautomaatiojärjestelmän keskusyksikkö sekä kenttälaitteiden kytkentää varten tarvittavat moduulit.
- VPN: Virtual Private Network. Virtuaalinen erillisverkko.

# 1 Johdanto

Työn tilaajana on AFRY Buildings Finland Oy, jonka palveluksessa kirjoittaja itse työskentelee kehityspäällikön roolissa. Yrityksen Virtual Monitoring -osasto tuottaa asiantuntijapalveluita kiinteistöjen käytön ajalle. Yksi yrityksen tuottamista palveluista on kiinteistön rakennusautomaation etävalvonta. Osana palvelua asiantuntija vastaanottaa ja käsittelee rakennusautomaation lähettämät hälytykset, tekee suosituksia energiatehokkuuden optimoinnista rakennusautomaatiojärjestelmän toiminnallisuuden puitteissa ja seuraa kiinteistön lämmitysverkostojen ja ilmanvaihdon toimintaa. Tämän kaltainen asiantuntijatyö nojaa usein vahvasti työntekijän ammattitaitoon, eikä ole poikkeuksellista, että laatueroja esiintyy yritysten välillä tai jopa yrityksen sisällä. AFRY hyödyntää etävalvontapalvelun tuotannossa kehittämänsä AFRY Monitor -järjestelmää, jonka avulla rakennusautomaatiojärjestelmistä ja muista tietolähteistä kerättävää tietoa pystytään hallitsemaan tehokkaasti ja aikaisempaa tarkemmalla tasolla.

AFRY Monitor -järjestelmän avulla kerätyn tiedon automaattinen analysointi on myös helpottunut verrattuna perinteisiin keskitettyihin valvomoihin. Järjestelmään voidaan rakentaa monipuolisia analytiikkaratkaisuja, jotka pystyvät havaitsemaan vikatilanteita, diagnosoimaan niitä sekä ehdottamaan korjaus- ja kehitystoimenpiteitä energiatehokkuuden ja sisäilman olosuhteiden parantamiseksi. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on parantaa ilmastointikoneen toiminnan seuranta kehittämällä automaattisia analytiikkaratkaisuja ilmastointikoneiden toimintaan liittyville prosesseille.

Ilmastointikoneiden oikealla toiminnalla on merkittävä rooli kiinteistöjen energiatehokkuuden kannalta. Ilmanvaihdon kautta kulkee kiinteistö- ja ilmanvaihtotyyppistä riippuen 20–80 % kiinteistön lämmitysenergiasta ja jopa 20–40 % kiinteistön sähköenergiasta [Energiakatselmoijan käsikirja 2016]. Suunnitelmista poikkeavalla käytöllä tai lähtökohtaisesti huonosti suunnitelluilla prosesseilla ilmastointikoneiden energiatehokkuutta voidaan huonontaa merkittävästi. Nykyaikainen ilmastointikone on monimutkainen kokonaisuus, joka koostuu useista toimilaitteista, antureista ja ohjauksista. Toisaalta ilmastointikone on aina vain yksi

osa kiinteistön talotekniikkaa, eikä sen toiminnan optimoimisessa tule unohtaa suurta kokonaisuutta, johon liittyvät läheisesti kiinteistön lämmöntuotanto ja -jakelu sekä kiinteistön käyttötarkoituksen edellyttämät olosuhteet.

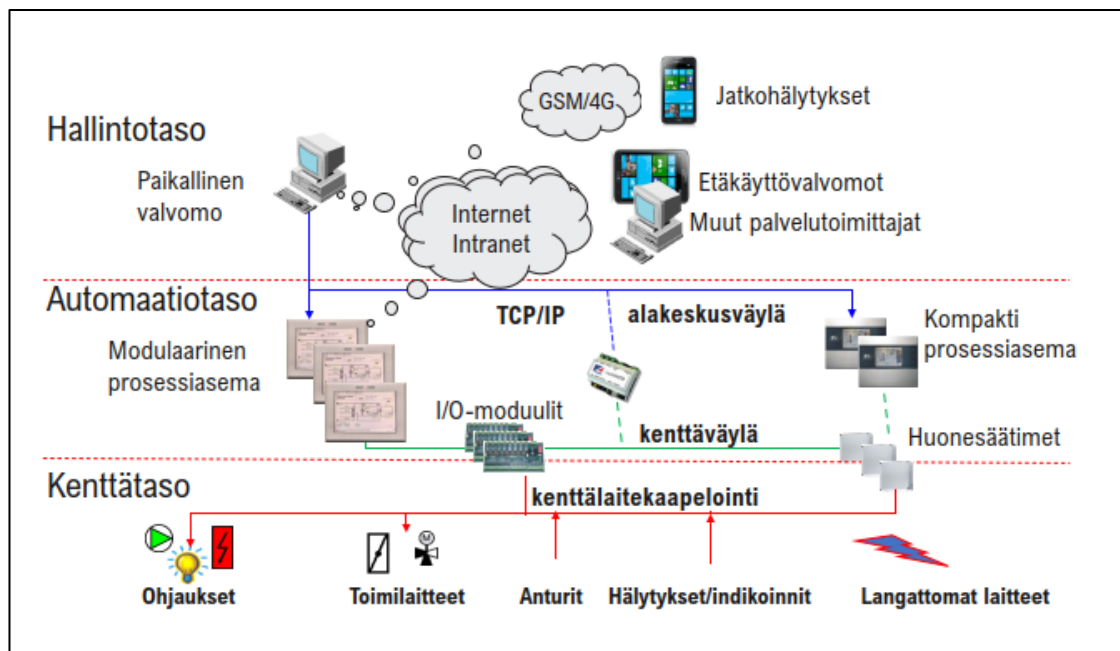
Opinnäytetyössä käsitellään aluksi rakennusautomaatiojärjestelmän roolia ja toimintaa kiinteistössä. Seuraavaksi työssä pureudutaan yrityksen käyttämän AFRY Monitor -järjestelmän toiminnallisuuksiin ja käydään läpi tyypilliset ilmastointikoneen osat siinä järjestyksessä, kuin ne tavallisesti ilmankäsittelyprosessiin osallistuvat. Ilmastointikoneen osan kuvauksen ja toimintaperiaatteen lisäksi esitellään osan toimintaan liittyviä toimilaitteita ja ohjauksia. Osana opinnäytetyötä tutkitaan tarkemmin kolmen erilaisen ilmastointikoneen rakennetta ja toiminnan yksilöllisiä piirteitä. Tarkasteltavien ilmastointikoneiden merkittävimmät keskinäiset erot ovat lämmöntalteenottolaitteissa, joiden analytiikan kehittämisessä onkin suurin energiatehokkuuden kehityspotentiaali. Työn viimeisessä osiossa esitellään toteutettuja analytiikka- ja optimointiratkaisuja sovellettuna työssä esitelyihin esimerkki-ilmastointikoneisiin.

## **2 Rakennusautomaatiojärjestelmä**

### **2.1 Tehtävä ja rakenne**

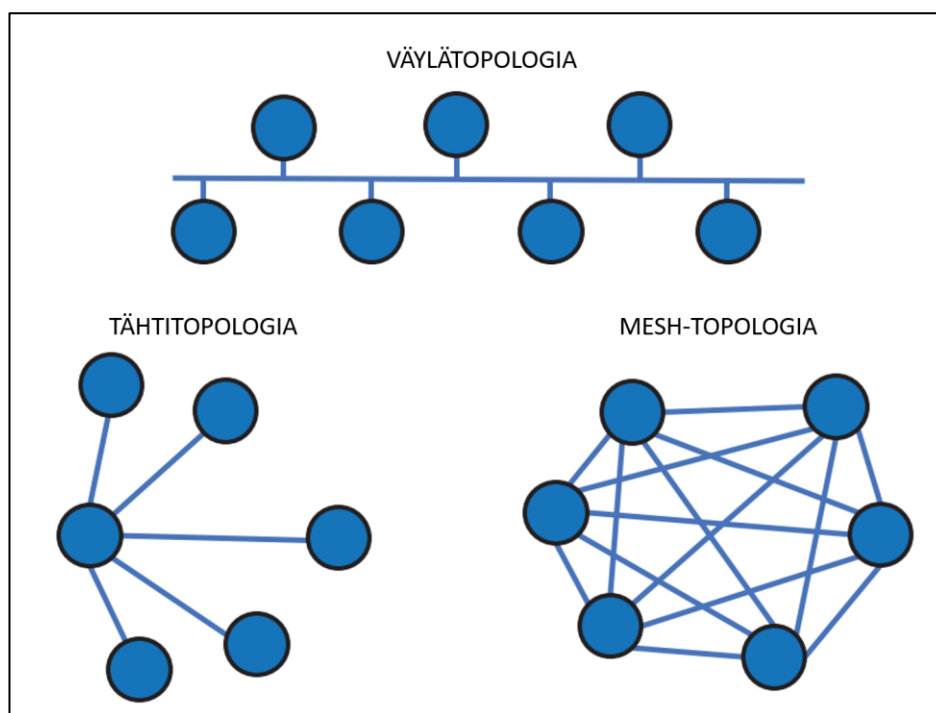
Rakennusautomaatiojärjestelmä vastaa kiinteistön prosessien säädöistä ja ohjauksista sekä valvoo taloteknisten järjestelmien toimintaa. Rakennusautomaatiojärjestelmää hyödynnetään usein myös tuottamaan tilastotietoa ylläpidon avuksi. Rakennusautomaatiojärjestelmän tehtäviin kuuluu myös tarjota ylläpitäjälle selkeä käyttöliittymä erilaisten siihen integroitujen järjestelmien ja koneiden hallintaan. Tyypillisten taloteknisten järjestelmien, kuten lämmitysjärjestelmän ja ilmanvaihdon ohjauksen lisäksi rakennusautomaatiojärjestelmään integroidaan usein muita kiinteistön järjestelmiä, esimerkiksi kulunvalvontajärjestelmä tai audiovisuaalisia järjestelmiä. [Rakennusautomaatiojärjestelmät 2018: 21.]

Rakennusautomaation hierarkkinen rakenne voidaan jakaa usein kuvan 1 mukaisesti kolmeen tasoon: hallintotasoon, automaatiotasoon ja kenttätasoon. Hierarkiassa alimpana ovat tyypillisesti anturit ja toimilaitteet, esimerkiksi lämpötila-anturit ja ilmastointikoneen lämmityspatterin säätöventtiili. Kenttälaitteet on usein kytketty kenttäväylän kautta automaatiotasolle valvonta-alakeskuksiin sijoitettuihin I/O-moduuleihin (Input/Output). Hallintotasolla toimivien valvomoiden tehtävänä on toimia keskitettynä käyttäjärajapintana rakennusautomaatiojärjestelmään. [Rakennusautomaatiojärjestelmät 2018: 59–61.]



Kuva 1. Rakennusautomaatiojärjestelmän perinteinen hierarkkinen rakenne [Rakennusautomaatiojärjestelmät 2018: 60]

Kuvassa 2 on esitetty yleisimpiä rakennusautomaatiojärjestelmissä käytettyjä fyysisiä verkon kytkentätapoja eli topologioita. Rakenne voi olla myös yhdistelmä kuvassa 2 esitetyistä topologioista, tällöin puhutaan yhdistelmätopologiasta eli hybridiverkosta. Kuvassa 2 esitettyjen topologioiden lisäksi on olemassa vielä neljäskin topologia: rengastopologia, jossa verkon laitteet on kytketty renkaan muotoon. Rengastopologiaa ei kuitenkaan käytetä rakennusautomaatiojärjestelmissä, koska verkkoon lähetetty sanoma saattaa jäädä kiertämään verkkoon. [Taloteknisten järjestelmien tiedonsiirto 2022: 16–20.]

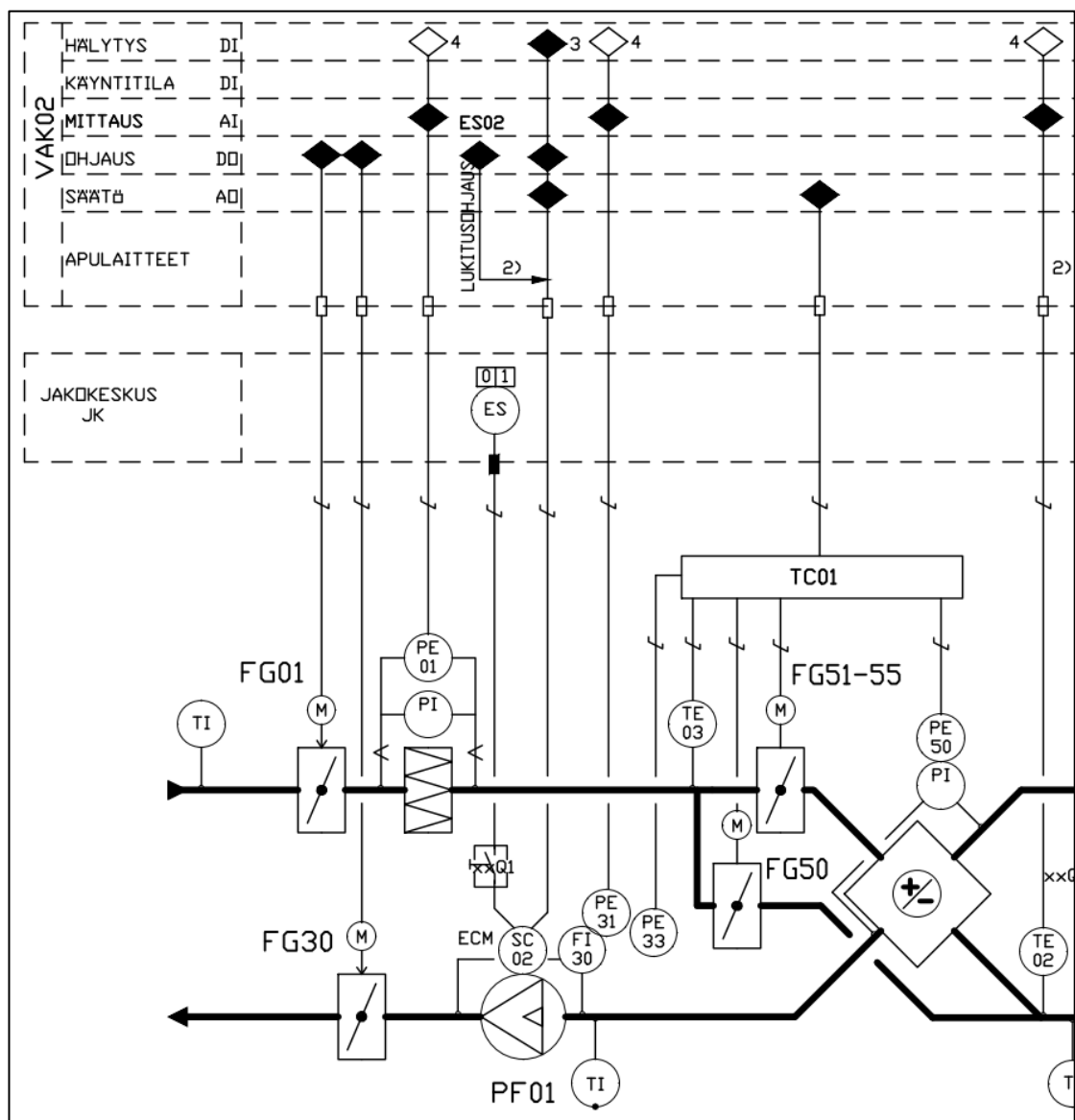


Kuva 2. Yleisimpiä rakennusautomaatiojärjestelmässä käytettyjä topologioita [Taloteknisten järjestelmien tiedonsiirto 2022: 16–20]

Verkon käyttötarkoitus ja siihen liitettävät laitteet määrittelevät kulloinkin optimaalisen topologian. Jokaisella topologialla on omat hyvät ja huonot puolensa ja erilaisia topologioita yhdistelemällä voidaan vaikuttaa kaapelointikustannuksiin sekä verkon toimintaan. Väylätopologiassa kaikki verkon laitteet on kytketty samaan kaapeliin, eli väylään, jonka päitä ei ole liitetty toisiinsa. Väylän merkittävin etu suhteessa muihin topologioihin on sen yksinkertaisuus. Yksinkertaisesta rakenteesta johtuu myös väylän heikkous: jos väylä katkeaa, verkon toiminta lakkaa. Tähtitopologia on tässä suhteessa vikasietokyvyltään parempi ratkaisu. Jokainen verkon laite on suorassa yhteydessä tähden keskuspiisteeseen, jolloin yksittäisen kaapelin katkeaminen ei estä verkon toimintaa. Tähtitopologiassa viestien välittäjänä toimiva keskuspiiste on kuitenkin kriittisessä asemassa, ja sen rikkoutuminen katkaisee kaiken viestinnän verkossa. Mesh-topologiassa tämä haavoittuvaisuus on eliminoitu yhdistämällä jokainen verkon laite suoraan kaikkiin muihin laitteisiin, jolloin minkään yksittäisen yhteyden tai laitteen hajoaminen ei kaada koko verkkoa. Kaapelointikustannusten vuoksi mesh-topologiaa ei juurikaan langallisissa toteutuksissa käytetä, mutta langattomissa verkoissa se on yleinen. [Taloteknisten järjestelmien tiedonsiirto 2022: 16–20.]

## 2.2 Rakennusautomaatiopisteet

Kenttälaitteet kytetään alakeskuksen fyysisiin I/O-pisteisiin (input/output). Fyysisten pisteiden lisäksi rakennusautomaatiojärjestelmässä on ohjelmallisia, eli laskennallisia pisteitä, jotka perustuvat fyysisten pisteiden tietoihin. Fyysiset rakennusautomaatiopisteet jaetaan digitaalisiin ja analogisiin, perustuen niihin kytkettyyn tietoon. Kuvassa 3 on esitetty ilmastointikoneen kenttälaitteiden kytkentää VAK:lle (valvonta-alakeskus). Mustat salmiakkikuviot kytkentäviivastolla kuvaavat fyysisiä pisteitä ja valkoiset ohjelmallisia pisteitä.



Kuva 3. Rakennusautomaatiopisteiden kytkentäesitys ilmastointikoneen säätökaaviossa.

Digitaalisiin tuloihin (DI, digital input) kytketään kosketintietoon perustuvat tilatiedot ja hälytykset. DI-pistettä voidaan käyttää myös impulssimittaukselle. Esimerkkinä fyysisestä DI-pisteestä kuvassa 3 on poistoilmapuhaltimen PF01 ristiiritähälytys. Digitaalisilla lähdöillä (DO, digital output) toteutetaan kenttälaitteiden päälle/pois -käyttö, kuten kuvassa 3 esitetty sulkupeltien ohjaus.

Analogisiin tulopisteisiin (AI, analog input) liitetään kaikki erilaiset mittausanturit, kuten lämpötila-anturit ja kuvassa 3 esitetty tuloilmasuodattimen paine-erolähtetin. DO-pisteiden hoitaessa päälle/pois -ohjaukset, analogisiin lähtöihin (AO, analog output) kytketään portaattomasti ohjattavat toimilaitteet, kuten ilmastointikoneen tuloilman lämmityspatterin säätöventtiilin ohjaus tai kuvassa 3 esitetty lämmöntalteenoton säätöpeltien ohjaus.

### 2.3 Toiminnallisuuksia

Tässä luvussa esitellään muutamia rakennusautomaatiojärjestelmän keskeisiä ja yleisimmin käytettyjä toiminnallisuuksia.

#### Aikaohjelmat

Aikaohjelmia käytetään useissa talotekniikan prosesseissa. Aikaohjelmalla voidaan antaa esimerkiksi käyntilupa ulkovalaistukselle tai ohjata ilmastointikoneen puhaltimien käynnistystä ja tehoa. Energiategokkuuden näkökulmasta on tärkeää, että käytetyt aikaohjelmat vastaavat kiinteistön todellista käyttöä. [Rakennusautomaatiojärjestelmän hyödyntäminen 2017: 2.]

#### Hälytykset

Talotekniikan prosessien toiminnan valvontaa varten rakennusautomaatiojärjestelmään on ohjelmoitu hälytyksiä. Hälytysrajat tulee määrittää tapauskohtaisesti oikein, jotta vältytään tarpeettomilta hälytyksiltä. Hälytykset jaetaan usein kiireellisyytensä mukaan kahteen luokkaan. Kiireellisiä hälytyksiä ovat henkeä ja terveyttä vaarantavat vikatilanteet sekä suurta taloudellista vahinkoa mahdolli-

sesti aiheuttavat vikatilanteet. Hyvä esimerkki kiireellisestä hälytyksestä on ilmastointikoneen lämmityspatterin jäätymisvaarahälytys. Jos vesikiertoinen lämmityspatteri jäätyy, siitä aiheutuu merkittävä taloudellinen tappio. Jäätymisvaaratermostaatin tehtävä estää lämmityspatterin jäätyminen pysäyttämällä ilmastointikone ja antaa hälytys. Vaikka ilmanvaihdon pysäyttäminen tiloissa ei useinkaan johda välittömään hengenhätään, on sillä vaikutus sisäilman olosuhteisiin. Ei-kiireellisiä hälytyksiä puolestaan ovat sellaiset hälytykset, joihin voi reagoida normaalin työajan puitteissa. Esimerkiksi kuvassa 3 on esitetty tulosuodattimen likaantumisen hälytys, eli toisin sanoen suodattimen paine-eron ylärajahälytys. [Rakennusautomaatiojärjestelmän hyödyntäminen 2017: 3.]

Hälytyshistorian avulla voidaan tarkastella toistuvasti hälyttäviä laitteita tai prosesseja ja löytää syitä hälytysten laukeamiselle. Uusien hälytysten käsittely tuottaa aina kustannuksia, ja on näin ollen kiinteistönpitäjän etu vähentää hälytysten määrää paikantamalla ja korjaamalla toistuvia hälytyksiä aiheuttavat vikatilanteet. [Rakennusautomaatiojärjestelmän hyödyntäminen 2017: 3 ja 8.]

#### Mittaushistoria ja trendiseuranta

Mittaushistoria ja trendiseuranta ovat käytännössä saman työkalun kaksi eri käyttötarkoitusta. Usein käytetään myös termejä historiatrendi ja dynaaminen trendi. Taloteknisiin prosesseihin osallistuu lukuisia laitteita, joiden toimintaa säätelevät mittaukset, ohjaukset ja asetuservat saattavat päivittyä jopa useita kertoja minuutissa. Vikaselvitystilanteessa mitaushistoria on korvaamaton apu, kun pyritään selvittämään vikatilanteeseen johtaneita tekijöitä. Mitä suurempi tallennuskapasiteetti laitteiden toiminnasta kerättävälle tiedolle on, sitä parempi. [Rakennusautomaatiojärjestelmän hyödyntäminen 2017: 4–5.]

Trendiseurantaa hyödynnetään yleensä lyhyiden tulevaisuuteen sijoittuvien muutosten tarkkailuun, hyvänä esimerkkinä tästä on säädön viritys:

1. Trendiseurantaan kytketään säädettävä suure ja siihen liittyvien laitteiden ohjaukset ja mittaukset.
2. Tehdään muutokset säätöparametreihin ja poikkeutetaan prosessin pääsuuretta.
3. Tarkastellaan säädön toimintaa trendiseurannassa.

Jos säädön toiminnassa havaitaan puutteita, toistetaan vaiheet 2–3. [Rakennusautomaatiojärjestelmän hyödyntäminen 2017: 4–5.]

## 2.4 Etäkäyttö

Rakennusautomaatiojärjestelmän etäkäyttö on hyödyllinen työkalu kiinteistön ylläpidossa ja vikatilanteiden nopeassa selvityksessä. Missä etäkäyttövalvomot kuitenkin loistavat, on useiden kiinteistöjen yhteyksien koostaminen samaan paikkaan. Etäkäyttövalvomoiden hyödyntäminen onkin lähes poikkeuksetta perusteltua mille tahansa toimijalle, jolla on ylläpidettävänä useita kiinteistöjä. Etäkäyttö mahdollistaa esimerkiksi aikaohjelmien ja muiden ohjausarvojen muuttamisen ilman käyntiä kiinteistöllä. Rakennusautomaatiojärjestelmästä tulevien sähköposti- tai tekstiviestihälytysten esiselvitys etäyhteyden avulla nopeuttaa usein myös vian korjausta, kun paikalle voidaan lähettää oikea korjaaja oikeiden varaosien tai työkalujen kanssa, eikä selvityskäyntiin kulu aikaa.

Kiinteistön ulkopuolelta tapahtuvaan laitteiston etäkäyttöön on käytännössä kolme tapaa: suora yhteys järjestelmään web-selaimella, keskitetty valvomo tai pilvivalvomo. Suora web-selaimella valvonta-alakeskukseen avattava yhteys edellyttää järjestelmän keskuslaitteelta mahdollisuutta rakentaa graafinen käyttöliittymä järjestelmän hallintaa varten. Yksittäisiin valvonta-alakeskuksiin kirjautuminen voi olla työlästä ja sekavaa suurissa kiinteistöissä, jolloin erillinen val-

vomo on hyödyllinen. Valvomo voi sijaita kiinteistössä, jonka järjestelmiä se ohjaa (paikallinen valvomo) tai muualla, esimerkiksi kiinteistöhuoltoyrityksen valvomohuoneessa (keskitetty valvomo). Keskitettyyn valvomoon on yleensä liitetty useampi kuin yksi kiinteistö. Keskitetyn valvomon käyttöliittymä voi olla yksittäisen valvonta-alakeskuksen käyttöliittymästä poikkeava erilaista käyttötarkoitusta varten rakennettu paikallinen tai web-selainpohjainen sovellus. Pilvivalvomo puolestaan eroaa keskitetystä valvomosta siinä, että etäyhteyden lisäksi palvelin on osa palveluntarjoajan pakettia. Tällöin valvomopalvelun investointikustannukset tilaajalle ovat merkittävästi pienemmät ja vastaavasti yhteyksien hallinnoinnista laskutetaan tyypillisesti kuukausimaksua. [Kiinteistöjen etävalvonta ja ilmoitusten siirto 2021: 9–10.]

Tiedonsiirto rakennusautomaatiojärjestelmistä ulkomaailmaan pohjautuu nykyisin useimmiten TCP/IP-teknologiaan ja hyödyntää nykyaikaisia laajakaistayhteyksiä, kuituverkkoa tai mobiiliyhteyttä. Liitettäessä rakennusautomaatiojärjestelmä internetiin, on huolehdittava myös asianmukaisesta tietoturvasta. Kiinteällä IP-osoitteella muodostettua yhteyttä voidaan rajata esimerkiksi palomuurin avulla. [Kiinteistöjen etävalvonta ja ilmoitusten siirto 2021: 11–14.]

Viime aikoina etäyhteyden suojauksessa on myös yleistynyt suoraan VPN-tunneliin (Virtual Private Network) perustuva Tosibox-yrityksen samannimisen tuoteperheen tuotteet. Siirrettävä tieto salataan vahvasti tunnelin päässä, eikä salasta pureta kuin tunnelin toisessa päässä. Kohteelle asennetaan fyysinen tai ohjelmallinen Tosibox-lukko, ja avatakseen yhteyden kohteeseen käyttäjän tarvitsee suorittaa kaksivaiheinen tunnistautuminen hallussaan olevan fyysisen tai ohjelmallisen Tosibox-avaimen sekä salasanan avulla. [What makes Tosibox so secure? 2022.]

### 3 Käytetyn pilvivalvomojärjestelmän esittely

#### 3.1 Järjestelmälusta

AFRY Buildings Finland Oy tuottaa etähallintapalvelua kehittämänsä AFRY Monitor -sovelluksen avulla. Sovelluksen alustana toimii suomalaisen Wapice Oy:n kehittämä IoT-Ticket-järjestelmä. Järjestelmä mahdollistaa tiedonkeruun, analysoinnin ja raportoinnin esimerkiksi kiinteistön rakennusautomaatiojärjestelmästä. Rakennusautomaatiosta kerättävää dataa voidaan rikastuttaa esimerkiksi ilmatieteenlaitoksen rajapinnasta saatavilla säätiedoilla. Myös erilaisia langattomia antureita voidaan hyödyntää yhdistämällä niistä kerättävä tieto kiinteistön dataan.

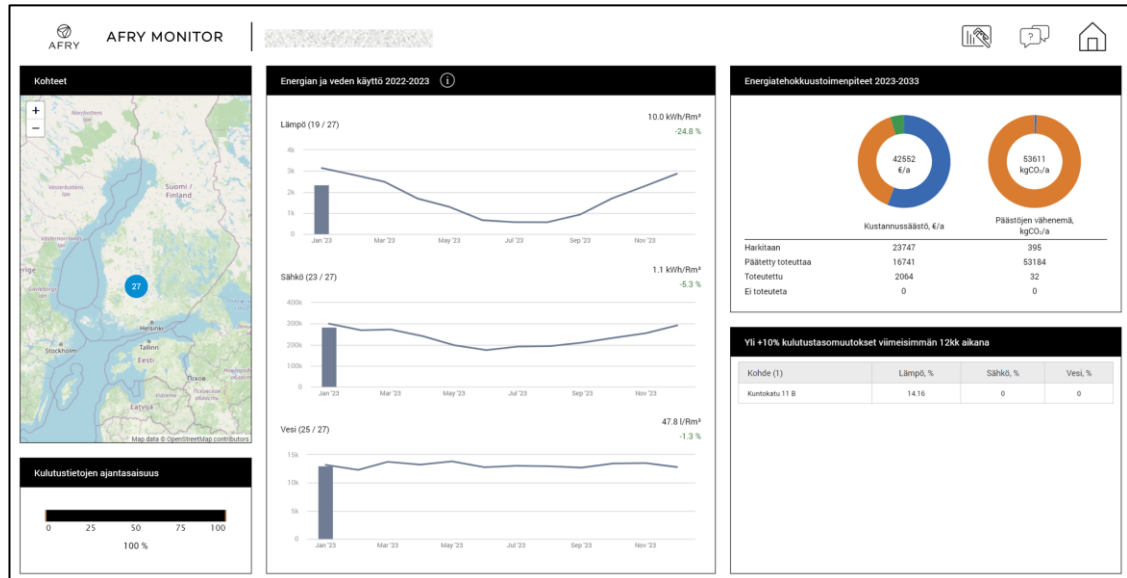
#### 3.2 Käyttöliittymä

Järjestelmän käyttöliittymä rakentuu dashboardeista, eli kojelaudoista. Nämä vapaasti muodostettavat näkymät voivat sisältää laajasti erilaisia elementtejä:

- kaavioita
- taulukoita
- mittareita
- painikkeita
- valintalistoja
- tietokenttiä
- tekstiä
- ikkunoita
- kuvia
- grafiikkaa.

Näkymät voidaan jakaa luonteeltaan kahteen peruskategoriaan: raportteihin ja työkaluihin. Raportti-kategorian näkymät ovat pidemmälle yksilöityjä eivätkä vaadi useinkaan vaadi käyttäjältä kuin esimerkiksi kohde- ja aikajaksovalinnan määrittämisen.

Kuvan 4 näkymä on esimerkki raportointinäkymästä, joka kokoaa yhteen kiinteistöjen energiajohtamisen kannalta oleellista tietoa kuten energian ja kulutukset, kiinteistöille asetetut tavoitteet ja suunnitellut toimenpiteet. Näkymä myös nostaa esiin kiinteistöjä, joissa on aktiivisia hälytyksiä tai joiden kulutustrendeihin kiinteistönpitäjän tulisi kiinnittää erityistä huomiota.



Kuva 4. AFRY Monitor -järjestelmän Energiajohtaminen-dashboardin valvomonäkymä.

Työkalu-kategorian näkymät puolestaan mahdollistavat käyttäjälle esimerkiksi laajemmat porautumismahdollisuudet kerättyyn tietoon ja tai mahdollisuuden tallentaa arvoja. Esimerkkinä tällaisesta näkymästä on kuvassa 5 esitetty Tapahtumat-työkalun näkymä, jossa käyttäjä pystyy kirjaamaan kohteille tapahtumia, kuten rakennusautomaation asetusarvojen muutoksia tai tulevaisuuteen sijoituvia saneerauksia. Manuaalisesti syötettävien teksti- ja numerotietojen lisäksi työkalu suorittaa laskelmia ja tallentaa lokitietoja.

The screenshot shows the AFRY Monitor interface. At the top, there's a search bar for 'Kohde'. Below it, the 'Tapahtuman kuvaus' (Event description) section includes fields for 'Otsikko' (Title), 'Teksti' (Text), 'Tapahtuman tyyppi, luokka ja vaihe' (Event type, class, and phase), and 'Vaikutusjakso' (Impact period) with date pickers. To the right, 'Tapahtuman arvioidut vaikutukset' (Estimated impacts of the event) shows input fields for 'Sähkö säästö' (Electricity savings), 'Lämpö säästö' (Heat savings), 'Kaakokylmä säästö' (Cooling savings), 'Vesi säästö' (Water savings), 'Kustannussäästö' (Cost savings), and 'Päästöjen vähennys' (Emission reduction). Below these are checkboxes for 'ESCO tai muu rah.' and 'TEM inv. tuki', and a 'Kannattavuus' (Payback) section with 'Suora takaisinmaksuaika [a]' and 'Tapahtuman kesto [a]'. On the far right, a 'Tallennus' (Save) section contains icons for undo, redo, delete, and refresh.

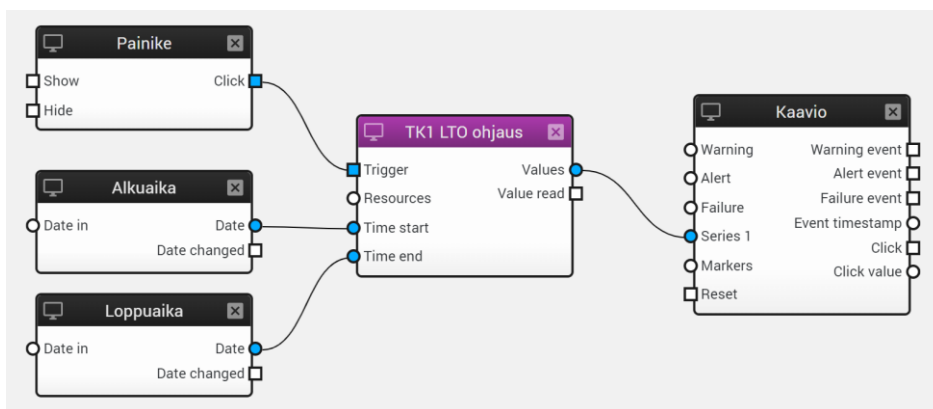
The main part of the dashboard is a table titled 'Kohteelle kirjautut tapahtumat' (Events recorded for the object). The table has columns for 'Kohde' (Object), 'Otsikko' (Title), 'Teksti' (Text), 'Tyyppi' (Type), 'Luokka' (Class), 'Toteutusvaihe' (Implementation phase), 'Toteutusvuosi' (Implementation year), 'Vaik. alku' (Start), 'Vaik. loppu' (End), 'Säästö sähkö' (Electricity savings), 'Säästö lämpö' (Heat savings), 'Säästö kaakokylmä' (Cooling savings), 'Säästö vesi' (Water savings), 'Säästö kustannukset' (Cost savings), 'Päästöjen vähennys' (Emission reduction), 'Investointi' (Investment), 'TMA' (TMA), 'Tapahtuman kesto [a]' (Event duration), 'ESCO- tai muu rah.' (ESCO or other funding), 'TEM inv. tuki' (TEM investment support), 'Kirjaaja' (Recorder), and 'Kirjautusajankohta' (Recording time).

Kohde	Otsikko	Teksti	Tyyppi	Luokka	Toteutusvaihe	Toteutusvuosi	Vaik. alku	Vaik. loppu	Säästö sähkö (MWh/a)	Säästö lämpö (MWh/a)	Säästö kaakokylmä (MWh/a)	Säästö vesi (m <sup>3</sup> /a)	Säästö kustannukset (€)	Päästöjen vähennys (kgCO <sub>2</sub> /a)	Investointi (€)	TMA (a)	Tapahtuman kesto [a]	ESCO- tai muu rah.	TEM inv. tuki	Kirjaaja	Kirjautusajankohta
	LKV-säästö huojuu	LKV-säästö huojuu liikaa. Menoedessä lämpötila on 52.62 astetta ja säästöventtiili 30-70%. Vikailmoitus FMX	Havainto	Rakennusautomaatio	Pyydetty laistama		2022-09-08	2027-09-08	0	0	0	0	0	0	0	0	5	Ei	Ei	Lari Siivonen	08.09.2022 13.45.42
	TK203 aikajäljelman muutos	TK203 ollut käytössä ympäri vuorokauden, nyt kone pysähtyy öisin.	Energiatallennus: Käyttökateeninen	Ilmanvaihtojärjestelmä	Toteutettu	2022	2022-09-30	2027-09-30	0	0	0	0	0	0	0	0	5	Ei	Ei	Lari Siivonen	12.10.2022 08.33.23
	TK201 aikajäljelman muutos	Liikitty koneelle pysähtymäjakso yölle ja lyhennetty tehostusjaksoa.	Energiatallennus: Käyttökateeninen	Ilmanvaihtojärjestelmä	Toteutettu	2022	2022-09-27	2027-09-27	0	0	0	0	0	0	0	0	5	Ei	Ei	Lari Siivonen	12.10.2022 08.39.20
	Kahteen Poistopuhaltimen	Jäähdytyslaitteiden PF11 on ollut pois päältä 2015 lähtien. Onko konetta olemassa? PK320 PF06 WC-tila. Puhaltin pois päältä, vaikka ohjaukset on päällä. PK320 PF07 kuumuustuloa 2 kerros. Puhaltin pois päältä, vaikka ohjaukset on päällä.	Havainto	Rakennusautomaatio	Korjaukset tilattu		2022-10-26	2027-10-26	0	0	0	0	0	0	0	0	5	Ei	Ei	Jukka Ruuska	26.10.2022 13.02.55
	Vikoneiden tehojen laskeminen	Ipuredut tehója 5 %	Energiatallennus: Käyttökateeninen	Ilmanvaihtojärjestelmä	Toteutettu	2022	2022-11-09	2028-11-09	0	0	0	0	0	0	0	0	5.2	Ei	Ei	Mikael Joensuu	24.01.2023 09.25.06

Kuva 5. AFRY Monitor -järjestelmän Tapahtumat-dashboards.

### 3.3 Ohjelmointi

Luvussa 3.2 listattujen käyttöliittymäkomponenttien taustalla toimii graafinen ohjelmointityökalu, joka helpottaa datalinkitysten ja laskentojen toteuttamista ilman laajaa ohjelmointiosaamista. Järjestelmä mahdollistaa tarvittaessa myös JavaScript-koodien käytön osana ohjelmointia. Kuvassa 6 on esimerkki yksinkertaisesta ohjelmasta, jossa käyttöliittymään sijoitetuilla päivämääräkentillä määritetään haettavan datan aikajakso ja käyttöliittymään sijoitettu painike aktivoi tiedonhauksen. Esimerkin aikasarjadata (ilmastointikoneen lämmöntalteenoton ohjaustieto) esitetään kaaviossa viivakuvaajana.



Kuva 6. Esimerkki yksinkertaisesta ohjelmasta.

## 4 Ilmastointikoneen osat ja toimintaperiaatteet

### 4.1 Sulkupelti

Sulkupelti on rakenteeltaan yleensä suorakaiteen muotoinen monisälepeltili, jonka tehtävä on sulkea ilmavirta ja lämpövuoto mahdollisimman tiiviisti [Sandberg 2014b: 166]. Pelti ei saa tyypillisesti sulkeutua puhaltimen käydessä, ellei suunnitelmissa toisin määrätä. Sulkupelti avataan aina ennen puhaltimen käynnistystä, jotta alipaine koneen sisällä ei aiheuta vaurioita [Talotekniikan rakentamisen yleiset laatuvaatimukset 2002: 143]. Sulkupellin ohjaus onkin tyypillisesti kytköksissä ilmastointikoneen käynnistykseen ja sammutukseen. Ilmastointikoneen käynnistyessä ensimmäisenä avautuu sulkupelti ja pellin avauduttua puhaltimet saavat käyntiluvan.

Sulkupellin, sekä myöhemmin esiteltävien säätö- ja sekoituspeltien, käyttö tapahtuu tyypillisesti suoraan pellin akselille kiinnitettävällä toimimootorilla, jonka asennuksessa tulee huomioida erityisesti pellin asennon osoittimen oikeellisuus. Ulko- ja jäteilmapeltien toimimootorit varustetaan jousipalautuksella, jotta estetään lämmityspatterin jäätyminen sähkökatkon tapahtuessa. [Sandberg 2014a: 352.]

### 4.2 Suodatin

Suodattimella on kaksi tehtävää ilmastointikoneessa: puhdistaa ilma koneen palveleman tilan vaatimustason mukaiseksi ja suojata ilmastointikoneen osia likaantumiselta. Nykyaikaisessa suurikokoisessa ilmastointikoneessa käytetään tyypillisesti pussisuodattimia, mutta myös mattosuodattimia ja kompaktisuodattimia käytetään. Suodattimen likaantumista tarkastellaan suodattimen yli tapahtuvan paine-ero-mittauksen avulla: suodattimen likaantuessa paine-ero suodattimen yli kasvaa. [Sandberg 2014a: 167–168.]

### 4.3 Lämmöntalteenotto

Lämmöntalteenottolaitteet voidaan jakaa rakenteensa puolesta kolmeen tyyppiin: nestekiertoinen lämmöntalteenotto, pyörivä lämmöntalteenotto ja levylämmönsiirrin [Talotekniikan rakentamisen yleiset laatuvaatimukset 2002: 140–141].

Lämmöntalteenottolaitteen tehtävänä ilmastointikoneessa on siirtää lämpöenergiaa poistoilmasta tuloilmaan. Lämmöntalteenottoa ohjataan yleensä sarjassa lämmitys- ja jäähdytyspattereiden kanssa. Tehon säätö tapahtuu pyörivässä lämmöntalteenotossa pyörimisnopeutta muuttamalla, nestekiertoisessa lämmönsiirtonesteen virtausta muuttamalla ja levylämmönsiirtimessä säätöpeltien avulla ilmapirtausta muuttamalla. [Sandberg 2014b: 178–185.]

Lämmöntalteenottoprosessin toiminnan seurannan kannalta merkityksellisimmät rakennusautomaatiossa seurattavat mittaukset ovat prosessiin tulevien ja poistuvien ilmapirtojen lämpötilat. Lämpötilojen avulla voidaan laskea esimerkiksi lämmöntalteenoton tuloilman lämpötilasuhte. Lämpötilasuhteen laskentaa käsitellään tarkemmin luvussa 5.6. Lämmöntalteenottolaitteen yli mitattavaa paine-ero hyödynnetään yleisesti lämmöntalteenoton sulatuksen ohjauksessa.

### 4.4 Säätö- ja sekoituspeltili

Säätö- ja sekoituspeltejä käytetään ilmastointikoneissa kahteen käyttötarkoitukseen:

- Ohitusilmapirran säätäminen, esimerkiksi levylämmönsiirtimellä toteutetussa poistoilman lämmöntalteenotossa. Ohituksen käytöllä voidaan säätää lämmöntalteenottolaitteen tehoa tai sulattaa jäädyntä kosteutta.
- Säätämään kierrätys- tai palautusilman sekoitussuhdetta raitisilmaan. Kerättävän poistoilman puhtaus määrittää sen, voiko ilmaa ylipäättään käyttää kierrätys- tai palautusilmana (taulukko 1).

[Sandberg 2014b: 166–167.]

Taulukko 1. Poistoilmaluokat [Sisäilmasto ja ilmanvaihto -opas 2021: 13]

Poistoilmaluokka	käytön rajoitus	tilaesimerkkejä
Luokka 1	Ilma soveltuu palautus- ja siirtoilmaksi	Toimistotilat ja niiden yhteydessä olevat pienet varastotilat, yleisöpalvelutilat, opetustilat, eräät koontumistilat sekä liiketilat, joissa ei ole hajukuormitusta.
Luokka 2	Ilmaa ei käytetä muiden tilojen palautusilmana, mutta se voidaan johtaa siirtoilmaksi esimerkiksi WC- ja pesutiloihin.	Asuinhuoneet, ruokailutilat, kahvikeittiöt, myymälät, toimistorakennusten varastot, pukuhuoneet sekä ravintolatilat.  Myymlöiden, kahviloiden ja pizzerioiden kierto-/pizzauunin huu- van poistoilma voidaan liittää luokan 2 poistoilmakanavaan.
Luokka 3	Poistoilmaa tiloista, joissa kosteus, prosessit, kemikaalit ja hajut oleellisesti huonontavat poistoilman laatua. Ilmaa ei käytetä palautus- tai siirtoilmaksi	WC- ja pesutilat, saunat, pyykin kuivatushuoneet, ulkoiluvälinevarastot, asuinhuoneistojen keittiöt, jakelu- ja opetuskeittiöt, kopiolaitokset
Luokka 4	Ilmaa ei käytetä palautus- tai siirtoilmaksi.	Ammattimaisessa käytössä olevat vetokaapit, grillit ja keittiöiden kohdepoistot sekä pesuloiden likapyykkitalat.  Autosuoja- ja katsastusasemat, autokorjaamot ja -maalaamot, ja ajotunnelit, maalien ja liuottimien käsittelyhuoneet, elintarvikejätehuoneet, kemialliset laboratoriot ja tupakointitalat.  Elintarviketeollisuuden ja suurpesuloiden tilat.

## 4.5 Lämmitys- ja jäähdytyspatterit

Lämmitys- ja jäähdytyspatterit ovat toimintaperiaatteiltaan samanlaisia. Molemmat toimivat lämmönsiirtimenä siirtäen lämpöenergiaa tuloilmaan (lämmityspatteri) tai tuloilmasta pois (jäähdytyspatteri). Patterit koostuvat vierekkäisistä lamelleista, joiden läpi mutkittelee lämmönsiirtonestettä sisältävä putki. Lämmityspatteri voi olla myös sähkötoiminen. [Sandberg 2014b: 170–173.]

Lämmityspatterin lämmitystehoa ja jäähdytyspatterin jäähdytystehoa säädetään sarjassa poistoilman lämmöntalteenoton kanssa. Kun lämmöntalteenoton teho ei enää riitä lämmittämään tuloilmaa tavoitelämpötilaansa, lämmityspatterin venttiili avautuu.

Nestekiertoisen lämmityspatterin toiminnan kannalta on tärkeää, että lämmönsiirtoneste ei pääse jäätymään missään tilanteessa. Jäätymissuojauksesta huolehtii joko fyysinen tai ohjelmallinen jäätymisvaaratermostaatti, joka mittaa jatkuvasti lämmityspatterilta palaavan nesteen lämpötilaa ja pysäyttää ilmastointikoneen, mikäli termostaatin hälytysraja alittuu. Jäätymissuoja voi sisältää myös ennakoitimoiminnon, joka avaa lämmityksen säätöventtiiliä, mikäli paluuveden lämpötila alkaa lähestyä hälytysrajaa.

## 4.6 Puhallin

Puhaltimien tehtävänä ilmastointikoneessa on siirtää ilmaa. Puhallin koostuu sähkömoottorista, siipipyörästä ja rungosta. Siipipyörän pyöriessä ilma virtaa kanavistossa. Siipipyörän pyöriminen aiheuttaa aina myös paineen nousun. Puhaltimelta tarvittava ilmavirta säädetään muuttamalla puhaltimen pyörimisnopeutta joko säätämällä moottorin pyörimisnopeutta taajuusmuuttajalla tai hihnakäyttöisten puhaltimien tapauksessa hihnan välityssuhdetta muuttamalla. [Sandberg 2014b: 174.]

Energiatehokkuutensa ja muiden hyötyjensä vuoksi ilmastointikoneiden puhaltimina ovat yleistyneet EC-moottorilla (electronically commutated) varustetut suorakäyttöiset puhaltimet. EC-moottorin etuna on korkea hyötysuhde laajalla pyörimisnopeusalueella, toisin kuin oikosulkumoottorilla, jonka hyötysuhde laskee merkittävästi pienillä pyörimisnopeuksilla. Suorakäyttöisissä puhaltimissa siipipyörä on asennettu suoraan moottorin akselille, eikä huoltoa vaativaa hihnaa näin ollen tarvita. Suorakäyttöiset puhaltimet on myös helpompi tasapainottaa, jolloin vähennetään puhaltimen kanavistoon aiheuttamaa melua. [Sandberg 2014b: 175–176.]

Ilmastointikoneen pääilmavirta lasketaan puhaltimen yli mitattavan paine-eron perusteella. Tätä tietoa voidaan käyttää puhaltimen ilmavirtaa säädettäessä. [Sandberg 2014a: 352.]

Ilmastointi- ja puhallinmoottorityypistä riippuen puhaltimen käyntiä ohjataan tyyppillisesti joko kellokytkimen avulla (vakioilmavirtajärjestelmä) tai tilassa olevan anturin, esim. hiilidioksidimittausanturin perusteella (ilmavirtasäättö) [Sandberg 2014a: 31].

## **5 Ilmastointikoneen suorituskykyvaatimukset**

Ilmanvaihtojärjestelmän toiminnan tavoitteena on yhdessä muiden taloteknisten järjestelmien kanssa tuottaa tiloihin niiden käyttötarkoituksen mukainen sisäilmasto. Sisäilmaston laadun ohella muita ilmanvaihtojärjestelmiin liittyviä optimoitavia tekijöitä ovat muun muassa järjestelmän energiankulutus, käyttökustannukset ja käyttövarmuus. Järjestelmän suorituskykyyn liittyviä vaatimuksia analysoimalla voidaan määrittää järjestelmän toiminnalle tarvittavat kriteerit sekä vikoja ja toimintahäiriöitä, joita tulisi havaita. Suorituskykykriteereitä voidaan käyttää vikojen havaitsemisessa ja kehittämään järjestelmän toiminnan seurantaan soveltuvia työkaluja. [Kärki & Karjalainen 1999: 12–13.]

Tässä luvussa käsitellään pääasiassa sellaisia ilmastointikoneelle asetettavia suorituskykyvaatimuksia, jotka ovat seurattavissa jatkuvilla mittauksilla.

## 5.1 Tuloilman lämpötila

Ilmankäsittelyprosessin tuloksena tuotetun tuloilman lämpötila on viihtyvyyden kannalta tärkeässä asemassa. Oikean tuloilman lämpötila vaikuttaa paitsi lämpötila-aistimukseen, myös sisäilman puhtauteen. Kun säädettävänä suureena on tuloilman lämpötila, Suomen standardoimisliitto SFS asettaa vaatimuksiksi säädölle taulukon 2 mukaiset arvot.

Taulukko 2. Ilmastointikoneen tuloilman lämpötilan säädön toimintavaatimukset, kun säädettävänä suureena on ilmastointikoneen jälkeisen tuloilman lämpötila [SFS 5768 1993: 3].

Ilmastointikoneen käyttötilanne	Vaatimukset säädettävälle suureelle	
Käynnistys	Asettumisaika $\pm 1$ °C:n tarkkuudella lopullisesta arvosta enintään	15 min
Käyntiaika	Lämpötilan keskiarvon suurin sallittu poikkeama asetusarvosta	$\pm 1$ °C
	Symmetrisesti keskiarvon molemmin puolin sijaitsevat rajat, joiden sisällä lämpötilan tulee olla vähintään 90 % ajasta.	$\pm 0,5$ °C
	Jatkuvaa värähtelyä ei saa esiintyä.	
Asetusarvon muutos	Asettumisaika $\pm 1$ °C:n tarkkuudella lopullisesta arvosta enintään	10 min
	Lämpötilan asettumisajan jälkeisen keskiarvon suurin sallittu poikkeama uudesta asetusarvosta	$\pm 1$ °C
	Symmetrisesti asettumisrajan jälkeisen keskiarvon molemmin puolin sijaitsevat rajat, joiden sisällä lämpötilan tulee olla vähintään 90 % ajasta.	$\pm 0,5$ °C

Ilmastointikoneen käynnistystä koskevaan vaatimukseen liittyen on huomiotava, että asuinkiinteistöjen ilmanvaihtoa ei tavallisesti koskaan pysäytetä kuin huoltotoimenpiteitä varten ja Sisäilmayhdistyksen suosituksen mukaan rakennuksissa, joissa käyttö ajoittuu säännöllisesti tiettyihin aikoihin, kuten valtaosassa liike- ja toimitilakiinteistöissä on tilanne, on ilmanvaihto käynnistettävä 2

tuntia ennen rakennuksen käyttöajan alkamista. Näin ollen 15 minuutin asettumisaikavaatimus lämpötilan säädölle käynnistyksen yhteydessä ei useinkaan ole merkityksellinen. [Julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohje 2019.]

## 5.2 Lämmityspatterin paluueden lämpötila

Vesikiertoisen patterin paluueden lämpötila on tärkeä seurattava suure, koska lämpötilan laskiessa liian matalalle jäätymisvaaratermostaatti pysäyttää koko ilmastointikoneen estääkseen patteria jäätymästä ja vaurioitumasta. Kiinteistön ilmastointikoneiden vesipattereiden paluueden lämpötilan ja säätöventtiilien avauman perusteella voidaan myös määrittää energiatehokkuuden kannalta optimaaliset arvot ilmanvaihdon lämmityspiirin säätimelle. SFS-standardi 5768 [1993: 3] antaa lämmityspatterin paluueden lämpötilalle taulukossa 3 esitetyt vaatimukset ilmastointikoneen seisonta-ajalle ja käynnistykseen.

Taulukko 3. Lämmityspatterin säätöä koskevat toimintavaatimukset [SFS 5768 1993: 3]

Ilmastointikoneen käyttötilanne	Vaatimukset lämmityspatterin paluueden lämpötilalle	
Seisonta-aika	Paluueden lämpötila	15... 25 °C
Käynnistys	Paluueden alin lämpötila	10 °C

## 5.3 Ominais sähköteho

Ilmanvaihtojärjestelmien puhaltimien sähköenergian kulutus on usein merkittävä osuus kiinteistösähkön kokonaiskulutuksesta. Ominais sähköteho on indeksi, joka kuvaa yhden ilmakuution siirtämiseksi sekunnissa vaadittavaa sähkötehoa. Ominais sähköteho voidaan laskea kiinteistön koko ilmanvaihtojärjestelmälle (kaava 1), yksittäiselle ilmastointikoneelle (kaava 2) tai yksittäiselle puhaltimelle (kaava 3). [Ilmanvaihtojärjestelmän ominais sähköteho SFP 2013: 2.]

Ominais­sähköteho lasketaan jakamalla tarkasteltavan järjestelmän, koneen tai puhaltimen kaikkien osien sähköverkosta ottama teho laskennan kohteena olevan järjestelmän, koneen tai puhaltimen ilmavirralla. [Ilmanvaihtojärjestelmän ominais­sähköteho SFP 2013: 2.]

Ilmanvaihtojärjestelmän SFP-luvun laskenta [Ilmanvaihtojärjestelmän ominais­sähköteho SFP 2013: 2]:

$$SFP = \frac{P_{tulo} + P_{poisto} + P_{apulaitteet}}{q_{max}} \quad (1)$$

SFP on ilmanvaihtojärjestelmän ominais­sähköteho, kW/(m<sup>3</sup>/s)

P<sub>tulo</sub> on tuloilmapuhaltimien ottama sähköteho yhteensä, kW

P<sub>poisto</sub> on poistoilmapuhaltimien ottama sähköteho yhteensä, kW

P<sub>apulaitteet</sub> on taajuusmuuttajien ja muiden säätölaitteiden sekä mahdollisten LTO-pumppujen ja -moottorien ottama sähköteho, kW

q<sub>max</sub> on mitoittava jäteilmavirta tai ulkoilmavirta, m<sup>3</sup>/s

Yksittäisen ilmastointikoneen SFP-luvun laskenta [Ilmanvaihtojärjestelmän ominais­sähköteho SFP 2013: 2]:

$$SFP = \frac{P_{tulo} + P_{poisto} + P_{apulaitteet}}{q_{max}} \quad (2)$$

SFP on ilmastointikoneen ominais­sähköteho, kW/(m<sup>3</sup>/s)

P<sub>tulo</sub> on tuloilmapuhaltimen ottama sähköteho, kW

P<sub>poisto</sub> on poistoilmapuhaltimen ottama sähköteho, kW

P<sub>apulaitteet</sub> on taajuusmuuttajien ja muiden säätölaitteiden sekä mahdollisten LTO-pumppujen ja -moottorien ottama sähköteho, kW

q<sub>max</sub> on koneen ilmavirroista suurempi (tulo tai poisto), m<sup>3</sup>/s

Yksittäisen puhaltimen SFP-luvun laskenta [Ilmanvaihtojärjestelmän ominais-sähköteho SFP 2013: 2]:

$$SFP = \frac{P_{\text{puhallin}} + P_{\text{apulaitteet}}}{q_{\text{max}}} \quad (3)$$

SFP on puhaltimen ominaissähköteho, kW/(m<sup>3</sup>/s)

P<sub>puhallin</sub> on puhaltimen ottama sähköteho, kW

P<sub>apulaitteet</sub> on taajuusmuuttajien ja muiden säätölaitteiden ottama sähköteho, kW

q<sub>max</sub> on puhaltimen ilmavirta, m<sup>3</sup>/s

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta määrittää rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähkötehon vaatimuksiksi tulo- ja poistoilmajärjestelmälle enintään 1,8 kW/(m<sup>3</sup>/s) ja poistoilmajärjestelmille 0,9 kW/(m<sup>3</sup>/s). Näistä arvoista voidaan kuitenkin perustellusti poiketa. Yksittäisille ilmastointikoneille tai puhaltimille ei ole asetettu ominaissähkötehon suhteen vaatimuksia, mutta näitä arvoja voidaan käyttää esimerkiksi suunnitteluvaiheessa tai kyseisen järjestelmäosan toiminnan seurantaan. [Asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 2017.] Edellä mainitut vaatimukset rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän SFP-luvulle koskevat uusia rakennuksia. Taulukossa 4 on esitetty kulloinkin voimassa olleet vastaavat arvot.

Taulukko 4. Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän SFP-luvun vaatimukset julkaisuittain. [Rakentamismääräyskokoelman osat D2 2003, D5 2007 ja D5 2012 sekä Asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 2017]

Julkaisu	RakMK D2 (2003)	RakMK D5 (2007)	RakMK D5 (2012)	YM asetus 1010/2017
Voimassa	2003–2009	2008–2012	2013–2017	2018–
Poistoilmajärjestelmä	1	1	1	0,9
Tulo- ja poistoilmajärjestelmä	2,5	2,5	2	1,8

## 5.4 Ilman kosteus

Ilman sisältämää kosteutta kuvataan tyypillisesti joko suhteellisella kosteudella tai absoluuttisella kosteudella. Yleisesti sisäilman kosteudesta puhuttaessa käytetään suhteellista kosteutta, joka ilmaisee käytännössä vesihöyryn määrän ilmassa suhteessa siihen, paljonko kyseisessä lämpötilassa ilmaan mahtuu vesihöyryä. Absoluuttinen kosteus kertoo vesihöyryn määrän suhteessa kuivaan ilmakiloon. Ilmastointitekniikan laskelmissa käytetään absoluuttista kosteutta, koska sen avulla on helpompi selittää prosessissa tapahtuvia kosteuden muutoksia. [Sandberg 2014b: 81.]

Kun säädettävänä suurena on huoneilman tai poistoilman suhteellinen kosteus, SFS-standardi 5768 määrittää ilmastointikoneen tuottaman tuloilman suhteelliselle kosteudelle taulukossa 5 esitetyt vaatimukset.

Taulukko 5. Vaatimukset suhteelliselle kosteudelle, kun säädettävänä suurena on huoneilman tai poistoilman suhteellinen kosteus [SFS 5768 1993: 4].

Ilmastointikoneen käyttötilanne	Vaatimukset säädettävälle suurelle	
Käyntiaika	Kosteuden keskiarvon suurin sallittu poikkeama asetusravosta	±10 %RH
	Symmetrisesti keskiarvon molemmin puolin sijaitsevat rajat, joiden sisällä kosteuden tulee olla vähintään 90 % ajasta.	±3,0 %RH
	Vaatimukset ilmastointikoneen jälkeisen ilman suhteelliselle kosteudelle	
Käynnistys	Asettumisaika tarkkuuteen ±10 %RH lopullisesta arvosta enintään	15 min
Käyntiaika	Jatkovaa värähtelyä ei saa esiintyä.	
Asetusravon muutos	Kosteuden muutoksen tulee tapahtua asetusravon muutosta vastaavaan suuntaan.	

Kiinteistön tilojen käyttötarkoituksesta riippuen vaatimukset säädölle voivat toki olla huomattavasti kireämpiäkin. Teollisuuden puhdastiloissa kosteuden säädön tarkkuusvaatimuksena voi olla esimerkiksi  $\pm 3\%$  RH. Korkea kosteuden tarkkuusvaatimus tarkoittaa aina myös lämpötilan säädön tarkkuuden korkeaa vaatimustasoa, poiketen luvussa 5.2 esitetyistä SFS-standardin määrittelemistä vähimmäisvaatimuksista. [Sandberg 2014b: 82.]

## 5.5 Lämpöteho

Yksi ilmastointikoneen keskeisistä suorituskykyvaatimuksista on saada ilmastointikoneesta kullakin hetkellä haluttu lämmitys- tai jäähdytysteho. Ilmastointikoneen tuottama lämpöteho lasketaan kaavalla 4. Vakioilmavirtaisessa järjestelmässä ilmavirran pysyessä muuttumattomana säädetään lämpötehoa muuttamalla ilmastointikoneen jälkeisen ilman lämpötilaa. Muuttuvilmavirtaisessa järjestelmässä lämpötehoa voidaan säätää ilmastointikoneelta lähtevän ilman lämpötilan lisäksi myös ilmavirran avulla. Mikä tahansa ilmavirran ja lämpötilan yhdistelmä, joka tuottaa tarvittavan lämpötehon ei välttämättä kuitenkaan ole viihtyisyystekijät huomioiden mahdollinen. [Kärki & Karjalainen 1999: 22–23.]

$$\phi_{ik} = q_{v,i} \rho_i c_{p,i} (t_{ik} - t_u) \quad (4)$$

$q_{v,i}$  on ilman tilavuusvirta ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$\rho_i$  ilman tiheys ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$c_{p,i}$  ilman ominaislämpökapasiteetti ( $\text{kJ}/\text{kgK}$ )

$t_{ik}$  ilmastointikoneelta lähtevän ilman lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_u$  ulkoilman lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ ).

## 5.6 Lämmöntalteenoton lämpötilasuhteet

Lämpötilasuhte on standardoidussa testaustilanteessa yhtä suurilla tulo- ja poistoilman massavirroilla määritetty laitteen ominaisuus, joka kuvaa lämmöntalteenottolaitteen kykyä siirtää poistoilmasta lämpöä tuloilmaan. Lämpötilasuhte voidaan laskea tuloilmalle ja poistoilmalle erikseen. Standardoidussa mitaustilanteessa määritetyt tulo- ja poistoilman lämpötilasuhteet ovat yhtä suuret.

Tuloilman lämpötilasuhde lasketaan ulkoilman lämpenemisen sekä poisto- ja ulkolämpötilan erotuksen suhteena (kaava 5). [Saari & Nyman 2017: 50.]

$$\eta_t = \frac{t_{tLTO} - t_u}{t_s - t_u} \quad (5)$$

$\eta_t$  on tuloilman lämpötilasuhde yhtä suurilla ilmavirroilla

$t_{tLTO}$  on tuloilman lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen, °C

$t_u$  on ulkoilman lämpötila, °C

$t_s$  on poistoilman lämpötila, °C

Tuloilman lämpötilasuhdetta hyödynnetään tyypillisesti lämmöntalteenottolaitteen toiminnan seurannassa rakennusautomaatiojärjestelmässä. Poistoilman lämpötilasuhde soveltuu paremmin käytettäväksi nestekiertoisten lämmöntalteenottolaitteiden toiminnan seurantaan, joissa ei aina ole löydettävissä selkeitä tulo- ja poistoilmavirtoja vastaavasti kuin esimerkiksi ristivirtalämmönsiirtimillä. Poistoilman lämpötilasuhde lasketaan poistoilman jäähtymisen sekä poisto- ja ulkolämpötilan erotuksen suhteena kaavan 6 avulla. [Saari & Nyman 2017: 50.]

$$\eta_p = \frac{t_s - t_j}{t_s - t_u} \quad (6)$$

$\eta_p$  on poistoilman lämpötilasuhde yhtä suurilla ilmavirroilla

$t_s$  on poistoilman lämpötila, °C

$t_j$  on jäteilman lämpötila, °C

$t_u$  on ulkoilman lämpötila, °C

Koska tulo- ja poistoilmavirrat ovat käytännössä erittäin harvoin täysin tasapainossa, aiheuttaa pelkän kaavan 5 käyttäminen usein prosentuaalisesti merkittäviä virheitä. Asettamalla poistoilmasta otettu lämpöteho samaksi kuin tuloilmaan siirtyvä lämpöteho sekä olettamalla tulo- ja poistoilmavirtojen ominaislämpökapasiteetit ja tiheydet yhtä suuriksi, voidaan vertailukelpoisen tuloilman lämpötilasuhteen laskentakaava epäsuhtaisilla ilmavirroilla johtaa kaavassa 7 esitettyyn muotoon. Lämpötehon laskentakaava 4 on esitetty luvussa 5.5. Poistoilman lämpötilasuhde epäsuhtaisilla ilmavirroilla saadaan kaavassa 8 esitettyyn muotoon. [Saari & Nyman 2017: 50–51.]

$$\eta_t = \left( \frac{1 + \frac{q_{tLTO}}{q_{pLTO}}}{2} \right) \left( \frac{t_{tLTO} - t_u}{t_s - t_u} \right) \quad (7)$$

$\eta_t$  on tuloilman lämpötilasuhde yhtä suurilla ilmavirroilla

$q_{tLTO}$  on tuloilman ilmavirta, m<sup>3</sup>/s

$q_{pLTO}$  on poistoilman ilmavirta, m<sup>3</sup>/s

$t_{tLTO}$  on tuloilman lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen, °C

$t_u$  on ulkoilman lämpötila, °C

$t_s$  on poistoilman lämpötila, °C

$$\eta_p = \frac{q_{tLTO}}{q_{pLTO}} \eta_t \quad (8)$$

$\eta_p$  on poistoilman lämpötilasuhde yhtä suurilla ilmavirroilla

$q_{tLTO}$  on tuloilman ilmavirta, m<sup>3</sup>/s

$q_{pLTO}$  on poistoilman ilmavirta, m<sup>3</sup>/s

$\eta_t$  on tuloilman lämpötilasuhde yhtä suurilla ilmavirroilla

Taulukossa 6 on esitetty erityyppisten lämmöntalteenottolaitteiden lämpötilasuhteita. Yksittäisen ilmastointikoneen lämpötilasuhteelle tai vuosihyötysuhteelle ei ole asetettu vaatimuksia, joten tarkasteltaessa lämmöntalteenottolaitteen toimintaa voidaan raja-arvot laitteen toiminnan tarkastelua varten johtaa taulukon 2 arvoista.

Taulukko 6. Erilaisten lämmönsiirtimien lämpötilasuhteita. [Energiatehokkuus – Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta 2017]

Lämmönsiirrintyyppi	Lämpötilasuhde, $\eta_t$
Nestekiertoinen lämmönsiirrin	0,4
Ristivirtalevylämmönsiirrin	0,5
Vastavirtalevylämmönsiirrin	0,6
Regeneratiivinen lämmönsiirrin	0,65

## 5.7 Muita ilmastointikoneen suorituskykyvaatimuksia

Aikaisemmissa luvuissa esiteltyjen suorituskykyvaatimusten lisäksi ilmastointikoneiden tai ilmanvaihtojärjestelmän toiminnalle on asetettu useita sellaisia vaatimuksia, joiden jatkuva mittauksiin perustuva seuranta ei kuitenkaan ole helpposti toteutettavissa, vaikka nykypäivän anturitekniologia kyllä mahdollistaa näidenkin suureiden mittaamisen. Tällaisia vaatimuksia on asetettu esimerkiksi ilmastointikoneen tiiviydelle, ilman puhtaudelle ja järjestelmän äänitasolle.

Vuodot ilmastointikoneessa ja kanavistossa kasvattavat puhaltimien energiankulutusta. Ilmastointikoneen tiiveyden on suositeltavaa täyttää vähintään minimitason tiiviysluokan A vaatimukset sekä tulo- ja poistopuolen välillä olevan vuotoilmavirran tulisi olla pienempi kuin 6 % ilmastointikoneen nimellisilmavirrasta 300 Pa:n koepaineella mitattuna. [Sisäilmasto ja ilmanvaihto -opas 2021: 19.]

Ilmastointikoneen tuloilman suodatus suunnitellaan käytettävissä olevalla ulkoilmalla ja ilmavirralla. Suomessa ulkoilma yleensä suhteellisen puhdasta, alittaen ulkoilman pienhiukkapiitoisuuksille Maailman Terveysjärjestön asettamat raja-arvot. Ulkoilman puhtaus ja sisäilman vaatimustaso huomioiden voidaan ilmastointikoneelle määrittää suodatuksen vähimmäistehokkuus, jonka perusteella käytettävä suodatin tai suodattimet valitaan. [Eurovent 2020.]

Vaikka ilmastointikoneen tuottamalle äänitasolle ei ole suoranaisesti asetettu raja-arvoa, SFS-standardi 5907 [2004] määrittää kuitenkin tavoitearvoja LVIS-laitteiden äänitasolle erityyppisissä tiloissa. Puhaltimien aiheuttaman äänen vaimentamiseksi kanavistossa käytetään äänenvaimentimia sekä pyritään äänitason minimoimiseen tähtääviin suunnitteluratkaisuihin.

## 6 Tutkittavien ilmastointikoneiden kuvaus

Analytiikkamallien kehittämistä ja testausta varten valittiin kolme rakenteellisesti hieman erilaista ilmastointikonetta. Opinnäytetyön tavoitteena on kehittää analytiikkamalleja, joita voidaan hyödyntää minkä tahansa ilmastointikoneen toiminnan seurannassa ja optimoinnissa. Valintaa rajoitti käytännössä ainoastaan työn kirjoitushetkellä etävalvontajärjestelmään yhdistettyjen ilmastointikoneiden määrä, koska valinta oli suoritettava valmiiksi yhdistetyistä koneista.

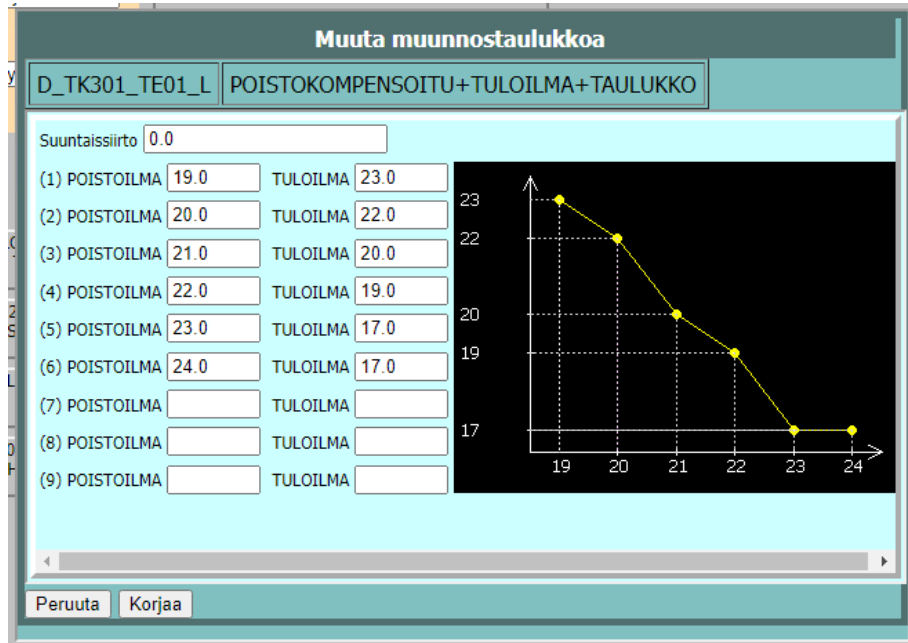
### 6.1 Kone 1: Toimistokiinteistö nestekiertoisella lämmöntalteenotolla

Rakennus on Helsingin keskustassa sijaitseva vuonna 1898 rakennettu liike- ja toimitilakiinteistö. Ilmastointikone palvelee rakennuksen 1.–5. kerrosten toimisto- ja ravintolatiloina. Koneen käyntiä ohjataan rakennusautomaatiojärjestelmän aikaohjelman avulla. Koneen käynnistyessä sulkupellit avautuvat ja puhaltimet käynnistyvät 60 sekunnin viiveellä. Tuloilmapuhallin ei käynnisty, jos lämmityspatterin kiertovesipumppu ei ole käynnissä. Koneen käyntiä rajoitetaan ulkoilman lämpötilan mukaan: ulkoilman lämpötilan ollessa alle  $-11\text{ °C}$  puhaltimet saavat käydä ainoastaan puoliteholla.

Koneen seisoessa sulkupellit ovat kiinni, puhaltimet seis ja lämmityspatterilta palaavan veden lämpötilaa pidetään asetusarvossaan ohjaamalla lämmityspatterin venttiilin asentoa.

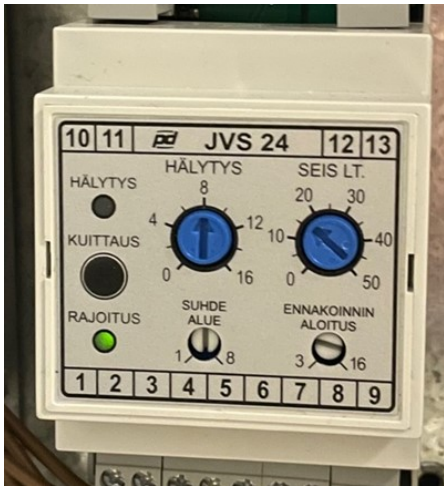
Lämmöntalteenoton huurtuminen estetään ohjaamalla lämmöntalteenoton moottoriventtiiliä lämmöntalteenottopatterin paluuveden lämpötilan laskiessa alle määritetyn raja-arvon.

Tuloilman lämmitystä säädetään ohjaamalla sarjassa lämmöntalteenoton ja lämmityspatterin venttiilejä. Tuloilman lämpötilan asetusarvo määräytyy poistoilman lämpötilan perusteella, jolloin puhutaan poistoilmakompensoinnista (kuva 7).



Kuva 7. Ilmastointikoneen poistoilmakompensointikäyrä, jossa vaaka-akselilla poistoilman lämpötila ja pystyakselilla tuloilman lämpötilan asetusarvo.

Ilmastointikoneella on fyysinen ennakoiva jäätymisvaaratermostaatti asennettuna valvonta-alakeskukseen (kuva 8). Ennakoiva jäätymisvaaratermostaatti poikkeaa yksinkertaisemmasta mallista siinä, että se pyrkii estämään jäätymisvaarahälytyksen syntymisen ja ilmastointikoneen pysähtymisen korjaamalla lämmityspatterin säätöventtiilille menevää ohjauskäskyä patterin paluueden lämpötilan alittaessa termostaatille määritellyn raja-arvon. Jos paluueden lämpötila kuitenkin ennakoinnista huolimatta laskee alle hälytysrajan, termostaatti pysäyttää ilmastointikoneen ja antaa hälytyksen, joka on kuitattavissa ainoastaan fyysisestä painikkeesta jäätymisvaaratermostaatissa. Kuvasta 8 nähdään, että jäätymisvaaratermostaatin "SEIS LT" -kytkin, joka määrittää ilmastointikoneen seisonta-ajan lämmityspatterin paluueden lämpötilan, on asetettu kohtaan 15 °C. Vertaamalla arvoa luvun 5.2 taulukon 3 vaatimukseen voidaan todeta laitteen asetusarvojen noudattavan tältä osin vaatimuksia.



Kuva 8. Lämmityspatterin ennakoiva jäätymisvaaratermostaatti

## 6.2 Kone 2: Toimistokiinteistö lämpöputkipatterilla

Rakennus on Helsingissä sijaitseva vuonna 1882 valmistunut liike- ja toimitila-kiinteistö. Ilmastointikone palvelee rakennuksen 1.–6. kerrosten toimistotiloja. Ilmastointikone on päällä rakennusautomaation aikaohjelman mukaisesti (kuva 9).

E_UK13_13TK6_T -- TULOILMAKONE AIKAOHJELMA						
Peruuta   Korjaa   Kopioi tapahtumia						
<b>Ma</b>	06:00 Käy	22:00 Seis				16 ▼
<b>Ti</b>	06:00 Käy	22:00 Seis				16 ▼
<b>Ke</b>	06:00 Käy	22:00 Seis				16 ▼
<b>To</b>	06:00 Käy	22:00 Seis				16 ▼
<b>Pe</b>	06:00 Käy	22:00 Seis				16 ▼
<b>La</b>	07:00 Käy	22:00 Seis				16 ▼
<b>Su</b>						16 ▼

Kuva 9. Ilmastointikoneen aikaohjelma

Ilmastointikoneen lämmöntalteenottoyksikkönä on lämpöputkipatteri (kuva 10). Suomessa tämän malliset lämmöntalteenottolaitteet ovat ilmastointikoneissa varsin harvinaisia. Se koostuu useista suljetuista lämmönsiirtonesteellä täytetyistä putkista, joiden toinen pää on poistokanavassa ja toinen tulo-kanavassa. Lämmöntalteenoton tehoa säädetään ohjaamalla yksikön kallistusta: kun lämmintä poistoilmakanavassa olevaa päätä lasketaan, lämmönsiirto tehostuu. [Hagner 2017: 91.] Jos lämmöntalteenoton teho ei riitä tuloilman lämmitykseen, ilmastointikoneessa on kiertoilmapelti, jonka avulla osa poistoilmasta voidaan sekoittaa suoraan tuloilmaan.



Kuva 10. Lämpöputkipatteri ja asennonsäätömootori

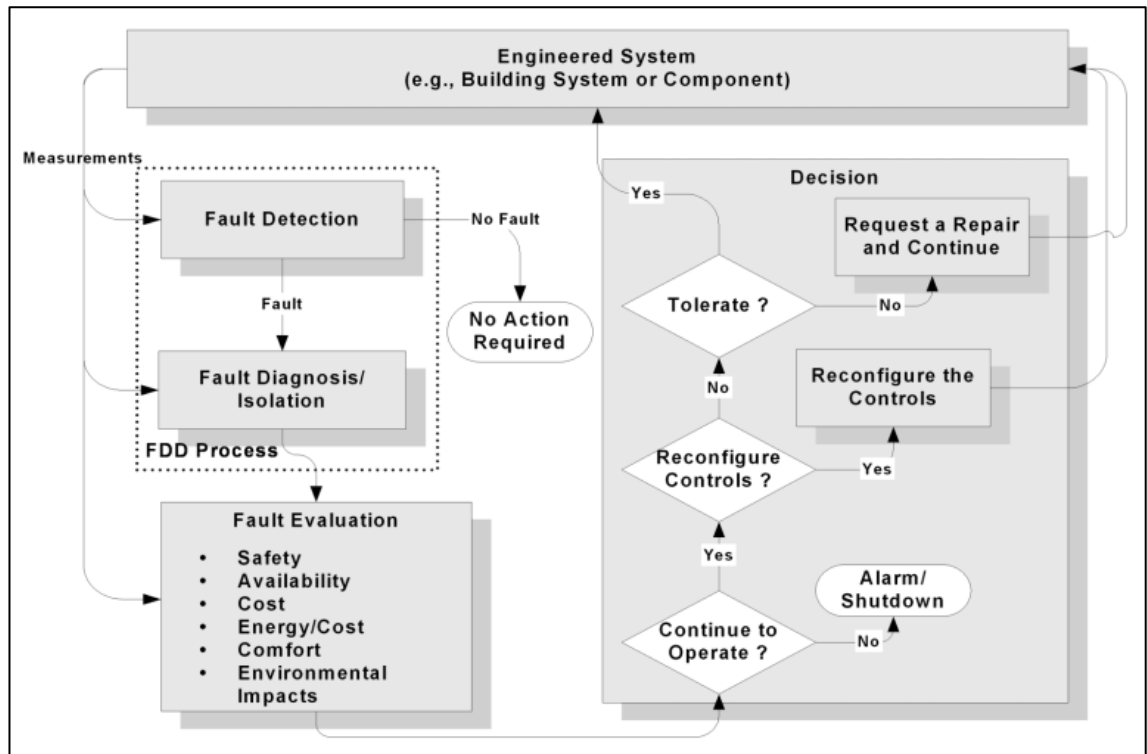
### 6.3 Kone 3: Asuinkiinteistö ristivirtalämmöntalteenotolla

Rakennus on Tampereella sijaitseva vuonna 2019 valmistunut asuinkerrostalo. Ilmastointikone palvelee kaksiportaisen rakennuksen B-portaan asuntoja. Koneen käydessä, tuloilman lämpötila pidetään asetusarvossaan säätämällä sarjassa lämmöntalteenoton tehoa ja lämmityspatterin venttiilin avaumaa. Tuloilman lämpötilan asetusarvo määräytyy poistoilman lämpötilan perusteella. Ilmastointikone on muuttuvailmavirtainen: tulo- ja poistoilman kanavapaine pidetään asetusarvossaan säätämällä EC-moottoreilla varustettujen puhaltimien pyörimisnopeutta.

Koneessa on levylämmönsiirrin, jonka valmistajan ilmoittama poistoilman lämpötilasuhde mitoituskolämpötilassa  $-29\text{ °C}$  Tampereella on 72 %. Lämmöntalteenotossa on lohkosulatusautomaatiikka, jonka toimintaa ohjattiin alun perin kennon pinnalta mitatun lämmöntalteenoton jälkeisen tuloilman lämpötilan perusteella, mutta kennon jatkuvasta huurtumisesta johtuen lohkosulatus muutettiin 2021 perinteisempään kennon yli mitattavan paine-eron perusteella suoritettavaan säätöön.

## 7 Diagnostiikkametodit

Automatisoitua diagnostiikkaa voidaan hyödyntää taloteknisten järjestelmien asennusvaiheessa, käyttövaiheessa ja huollossa. Asennusvaiheessa tapahtuvat asennusvirheet, mitoitusvirheet sekä asetus- ja ohjausarvojen virheet ovat kaikki havaittavissa automaattisen diagnoosin avulla. Usein asennusvaiheeseen liittyvät järjestelmän toiminnan tarkastukset suoritetaan kuitenkin manuaalisesti ja jopa kerättävät tiedon analysointi saattaa tapahtua manuaalisesti. Kuvassa 11 esitetyt toiminnallisuudet omaavat automaattiset diagnostiikat voisivat parantaa merkittävästi asennuksen laatua ja yhdenmukaisuutta. [Katipamula & Brambley 2005.]

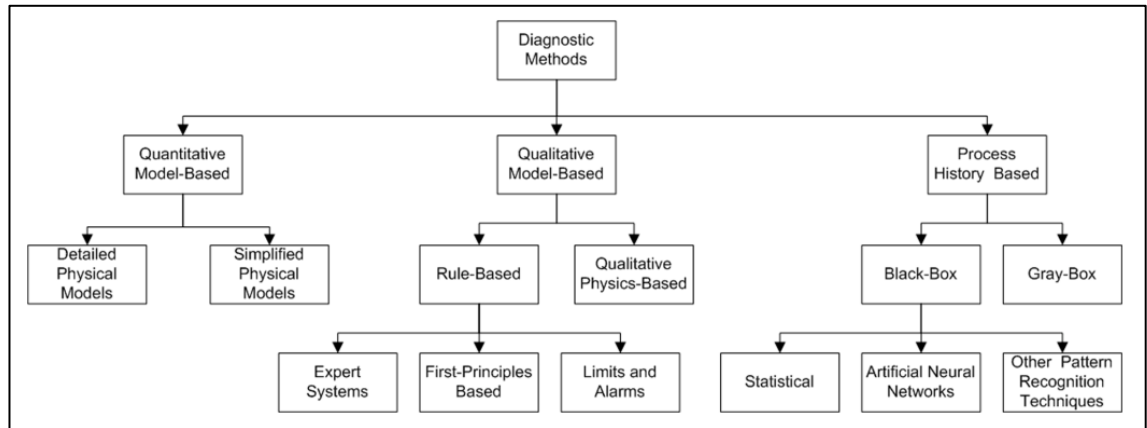


Kuva 11. Yleinen vian havaitsemisen ja diagnosoinnin vuokaavio [Katipamula & Brambley 2005]

Tutkittavan järjestelmän tai laitteen käyttövaiheessa automaattinen diagnostiikka voi havaita toiminnan poikkeamat selvästi manuaalisia metodeja nopeammin. Talotekniikkaan liittyvissä vikatilanteissa on myös mahdollista, että yhdessä järjestelmässä esiintyvää virhettä kompensoidaan muutoksella toisen järjestelmän toimintaan. Näin voi käydä esimerkiksi korkean tuloilman lämpötilan sulkiessa tilojen lämmitysverkoston termostaatteja, siirtäen näin lämmityksen painopistopistettä enemmän ja enemmän ilmanvaihdolle. Vaikka rakennuksen lämpötiloissa ei tapahtuisikaan merkittäviä muutoksia, vikatilanteen aiheuttama talotekniikan toiminnan muutos johtaa energiatehokkuuden laskemiseen ja kustannusten nousuun. Automaattiset diagnostiikat voivat havaita ja estää tällaisetkin vikatilanteet. [Katipamula & Brambley 2005.]

Erilaiset vikadiagnostiikkametodit voidaan jakaa esimerkiksi kuvan 12 mukaisesti kolmeen kategoriaan: kvantitatiivisiin malleihin, kvalitatiivisiin malleihin ja prosessihistoriamalleihin. Eri sovelluksissa käytettävien metodien valinnalla on suuri merkitys analytiikan toimintaan. Vikojen havaitsemiseen voidaan myös

käyttää eri metodia kuin vian diagnosointiin. Kvantitatiiviset mallit perustuvat tarkasteltavaa laitetta tai prosessia matemaattisesti selittäviin ennusteisiin, joita verrataan mittausrvoihin vian havaitsemiseksi. Prosessihistoriamallit puolestaan eivät edellytä varsinaista ymmärrystä seurantakohteen toiminnasta, vaan perustuvat suuresta datamäärästä johdettuun tietoon. Kvalitatiiviset mallit perustuvat puhtaasti järjestelmien, laitteiden tai prosessien yksilöllisten toiminnallisten ominaisuuksien tuntemiseen. [Katipamula & Brambley 2005.]



Kuva 12. Diagnostiikkametodit [Katipamula & Brambley 2005]

Tässä opinnäytetyössä toteutetut analytiikkaratkaisut on rakennettu käyttäen sääntöpohjaisia ja tilastollisia menetelmiä. Kvalitatiivisten sääntöpohjaisten mallien etuina ovat ohjelmoinnin helppous ja kustannustehokkuus. Mallin pohjalta on myös helppo määrittää toimenpide-ehdotuksia havaittujen ongelmien korjaamiseksi, koska malli pohjautuu tunnistettuihin syy-seuraussuhteisiin. Mallin heikkoutena yleisesti on sääntöjen soveltamisen huomiointi erilaisissa kohteissa. Malli luonteensa mukaisesti myös edellyttää tarkasteltavan prosessin yksityiskohtaista tuntemista. [Katipamula & Brambley 2005.]

## 8 Kehitetyt analytiikkaratkaisut

Opinnäytetyön tuloksena AFRY Monitor -järjestelmään ohjelmoitiin joukko ilmastointikoneen toimintaa seuraavia ja optimoivia analytiikkamalleja. Sovellus on helposti skaalattavissa ja soveltuu käytettäväksi yhdessä suuren joukon erilaisia ilmastointikoneita kanssa. Havaittuaan poikkeaman tai kehityskohteen ilmastointikoneen toiminnassa järjestelmä antaa käyttäjälle herätteen, jonka perusteella käyttäjä pystyy suorittamaan tarvittavat korjaus- tai säätötoimenpiteet. Tavoitteena oli tuottaa lisäarvoa asiakkaalle automatisoimalla systemaattisesti suoritettavia toistuvia tehtäviä ja seurantaprosesseja. Järjestelmä kykenee myös havaitsemaan datasta sellaisia poikkeamia prosessien toiminnassa, jotka ihmissilmältä jäävät usein huomaamatta. Optimoimalla ilmastointikoneen toimintaa järjestelmän käyttö parantaa kiinteistön energiatehokkuutta ja sisäilman olosuhteita. Luvuissa 8.1–8.4 esitellään tarkemmin näitä toimintoja sekä tarkastellaan, millaisia tuloksia ohjelmat antavat luvuissa 6.1–6.3 esitellyille ilmastointikoneille.

### 8.1 Tuloilman lämpötilan säädön toiminta

Vaativuudet tuloilman lämpötilan säädön toiminnalle on esitetty luvussa 5.2. Tarkastellaan aluksi ilmastointikoneiden käynnistymistä. Taulukossa 7 on esitetty tarkasteltavien ilmastointikoneiden käynnistymisen yhteydessä tapahtuvaa tuloilman lämpötilan hakeutumista asetusarvoonsa. Esimerkkikoneiden asettumisajoissa havaitaan merkittävää hajontaa ja yleisesti asettumisajat poikkeavat SFS-standardin vaatimuksista. Kuten luvussa 5.2 todetaan, liike- ja toimitilakiinteistöissä asettumisajan vaatimuksena on perusteltua pitää kiinteistön käyttöajan alkamista. Koneen 1 käynnistymisajankohta on 3 tuntia ennen käyttöajan alkamista ja koneen 2 käynnistymisaika 1,5 tuntia ennen käyttäjien saapumista, joten tässä suhteessa koneiden toiminnalle asetetut vaatimukset täyttyvät.

Taulukko 7. Ilmastointikoneiden tuloilman lämpötilan asettuminen käynnistystilanteessa (AFRY Monitor, tarkasteluvuorokausi 9.1.2023).

Ilmastointikone	Asettumisaika $\pm 1$ °C:n tarkkuudelle lopullisesta arvosta
Kone 1: Toimistokiinteistö nestekiertoisella lämmöntalteenotolla	22 minuuttia
Kone 2: Toimistokiinteistö lämpöputkipatterilla	73 minuuttia
Kone 3: Asuinkiinteistö ristivirtalämmöntalteenotolla	Asuinkiinteistö, joten ilmanvaihtoa ei sammuteta

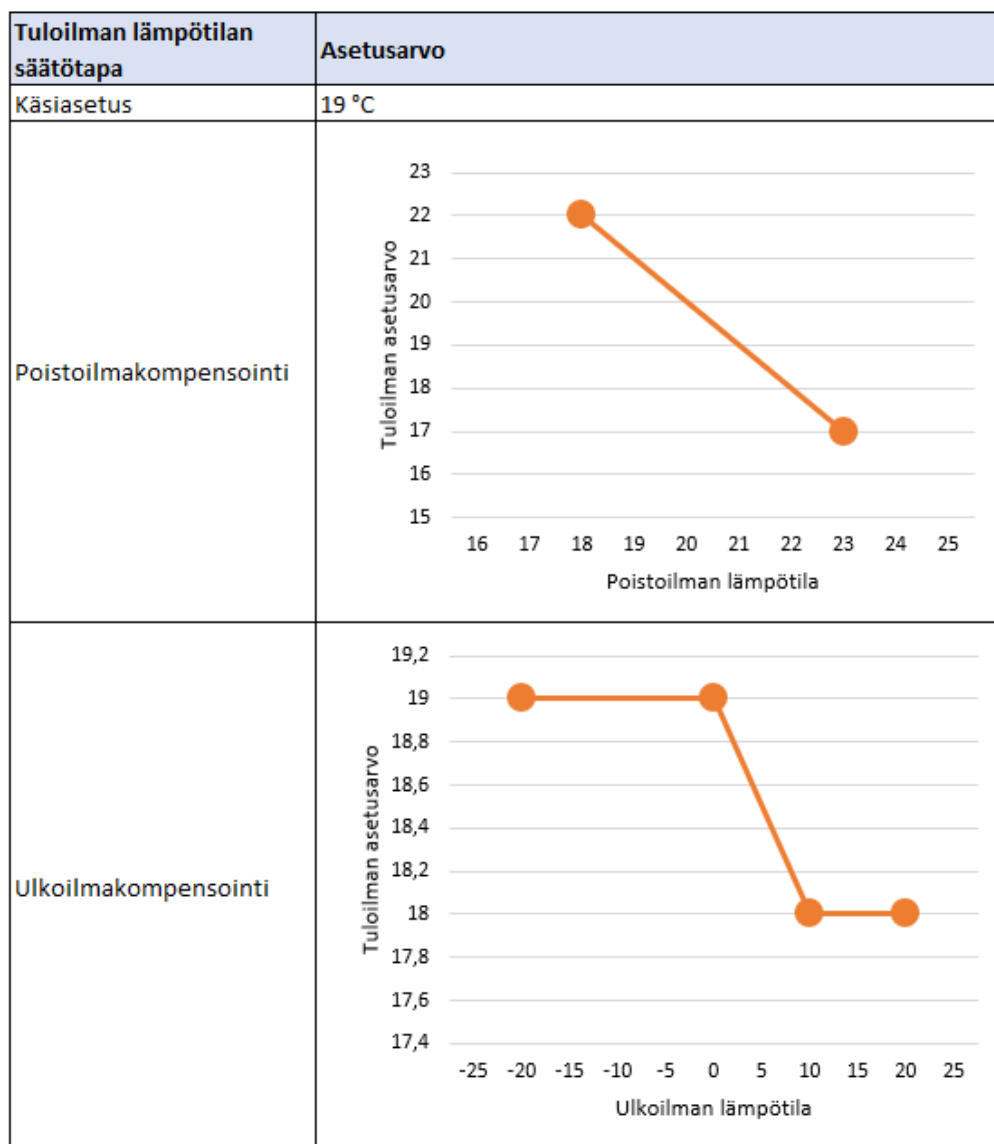
Ilmastointikoneen käyntiaikana tuloilman lämpötilan tulisi seurata asetusravoon mahdollisimman tarkasti. Kuten taulukon 8 arvoista havaitaan, kaikkien koneiden tuloilman lämpötilan säätö täytti niille asetetut vaatimukset, joskin kone 3 oli tässä suhteessa selvästi kahta muuta heikompi.

Taulukko 8. Ilmastointikoneiden tuloilman lämpötilan säädön tarkkuus käyntiaikana (AFRY Monitor, tarkasteluvuorokausi 9.1.2023)

Ilmastointikone	Tuloilman lämpötilan poikkeama asetusravosta	
	Vaihteluväli	Keskiarvo
Kone 1: Toimistokiinteistö nestekiertoisella lämmöntalteenotolla	-0,4... 0,3 °C	0,01 °C
Kone 2: Toimistokiinteistö lämpöputkipatterilla	-0,3... 0,3 °C	0,03 °C
Kone 3: Asuinkiinteistö ristivirtalämmöntalteenotolla	-0,8... 0,6 °C	-0,06 °C

Tuloilman lämpötilan on suositeltavaa olla muutama astetta tilan oleskeluvyöhykkeen tavoitelämpötilaa alhaisempi. Tällä varmistetaan puhtaan ulkoilman tehokkaampi sekoittuminen huoneilman kanssa ja miellyttävät olosuhteet tiloissa. [Julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohje 2019.]

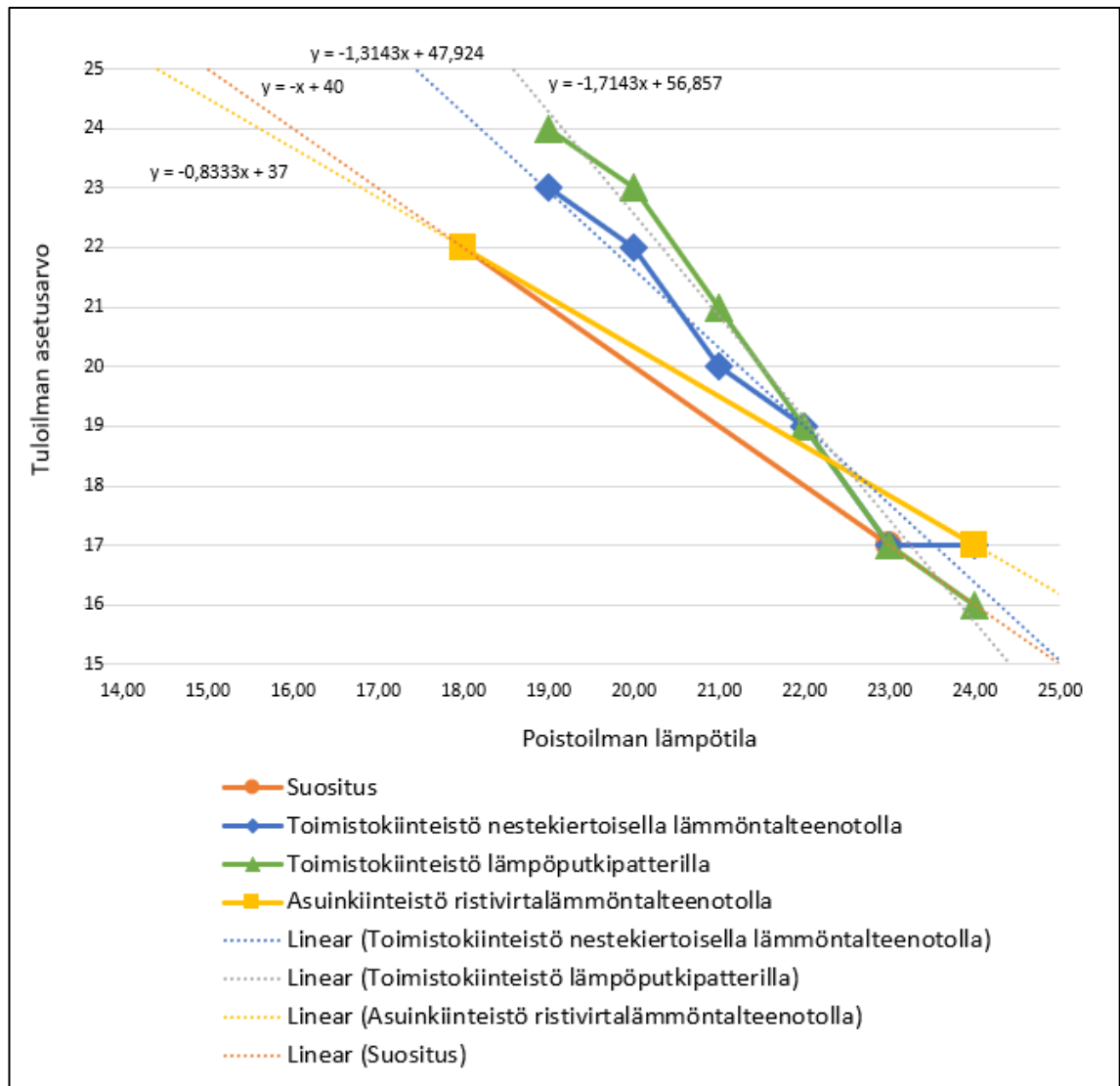
Tuloilman lämpötilan asetusarvo voidaan asettaa manuaalisesti johonkin staattiseen arvoon tai se voidaan määrittää joko suhteessa poistoilman lämpötilaan tai ulkoilman lämpötilaan. Jotta järjestelmä voi analysoida nykyisen asetusarvon järjestyttä, tarvitaan näille kolmelle käyttötapauskelle vertailukohtat, eli suositusarvot. Järjestelmään asetetut suositusarvot on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Tuloilman lämpötilan suositukset asetusarvoiksi säätötavoittain.

Järjestelmä vertaa näitä edellä esitettyjä suositusarvoja ilmastointikoneen nykyiseen tuloilman lämpötilan asetusarvoon. Mikäli asetusarvo poikkeaa selvästi suosituksesta, järjestelmä esittää toimenpiteen asetusarvon muuttamisesta.

Luvussa 6 esiteltyjen ilmastointikoneiden tuloilman lämpötilaa säädetään poistoilman lämpötilan mukaan. Kuvassa 14 on esitetty jokaisen koneen poistoilmakompensointikäyrä, sekä edellä esitetty suositusarvo.



Kuva 14. Poistoilmakompensointikäyrät sekä niille piirretyt lineaariset regressiosuorat ilmastointikoneittain.

Lämmitystä ohjaavan säätimen mallista riippuen käyrän määrittävien pisteiden lukumäärä voi vaihdella välillä 2–15. Jotta nykyistä käyrää voidaan verrata tehokkaasti suosituskäyrään, piirretään kompensointikäyrälle lineaarinen regressiosuora. Poistoilman lämpötila on yleisimmin välillä 20–24 °C, joten valitaan laskentaan kolme poistoilman lämpötilan arvoa tuolta väliltä: 20 °C, 22 °C ja

24 °C. Nykyisen käyrän regressiosuoran ja suosituskäyrän poikkeamien itseisarvot näissä kohdissa summataan ja tuloksena kullekin käyrälle saadaan sen etäisyyttä suositusarvosta kuvaava positiivinen numeroarvo.

	Kone 1. Toimistokiinteistö nestekiertoisella lämmöntalteenotolla	Kone 2. Toimistokiinteistö lämpöputkipatterilla	Kone 3. Asuinkiinteistö ristivirtalämmön- talteenotolla	Suosituskäyrä
Regressiosuoran yhtälö	$y = -1,3143x + 47,924$	$y = -1,7143x + 56,857$	$y = -0,8333x + 37$	$y = -x + 40$
x = 20	21,6	22,6	20,3	20
x = 22	19,0	19,1	18,7	18
x = 24	16,4	15,7	17,0	16
Poikkeama yhteensä	3,0	4,0	2,0	

Kuva 15. Ilmastointikoneiden poistoilmakompensointikäyrien vertailu suosituskäyrään lineaarisen regressiosuoran avulla.

Kuten kuvasta 15 nähdään, koneen 3 tuloilman lämpötilan asetusravon määrittävä poistoilman kompensointikäyrä poikkeaa suosituskäyrästä vähiten ja koneen 2 eniten. Tässä yhteydessä poikkeaman laskenta tehdään kolmen pisteen avulla. Suorien väliin jäävä pinta-ala olisi mahdollista määrittää tarkasti integraalilaskennan avulla, mutta koska kyseessä on lineaaristen suorien vertailu, riittää tämä ohjelmoinnin kannalta yksinkertaisempi laskentamalli. Myöskään tarkastelupisteiden määrän kasvattamisella ei saavuteta merkittäviä parannuksia laskennan tarkkuudessa, kun verrataan tarkastelupisteiden määrään suhteutettua keskimääräistä poikkeamaa.

## 8.2 Lämmöntalteenoton toiminta

Ilmastointikoneessa lämmöntalteenottoyksikön tehtävänä on siirtää poistoilmasta lämpöenergiaa tuloilmaan, vähentäen näin ostoenergialla katettavaa lämmitystarvetta. Energian siirron tehokkuutta kuvataan lämpötilasuhteella, jonka hetkellisen arvon laskentakaava on esitetty luvussa 5.6. Standardoidusta laskentamenettelystä poiketen lämpötilasuhteen laskenta tehdään ilmastointikoneen normaalissa käyttötilanteessa, jolloin tuloilmavirran suhde poistoilmavirtaan on tyypillisesti noin 0,9.

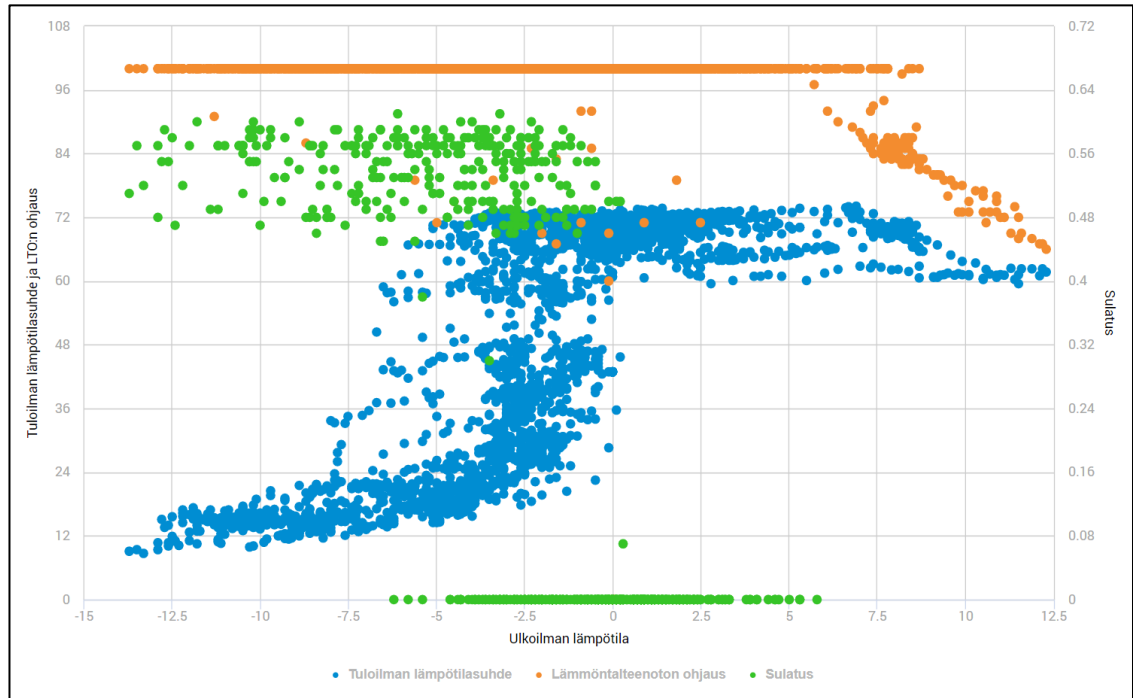
Osassa rakennusautomaatiojärjestelmissä lämpötilasuhteen laskenta on ohjelmoitu valmiiksi ja tallennetaan tarkasteltavaksi esimerkiksi trendikuvaajissa tai järjestelmäkaaviossa. Usein kuitenkin törmätään tilanteeseen, jossa joko yksi tai useampi laskennan edellyttämä mittaus puuttuu tai itse laskentaa ei ole ohjelmoitu osaksi rakennusautomaatiojärjestelmää. Toisinaan vastaan tulee myös tilanne, jossa laskentakaavan ohjelmointi on toteutettu virheellisesti. Yleisesti käään lämpötilasuhteen laskennassa rakennusautomaatiossa ei ole huomioitu tulo- ja poistoilmavirtoja laskentakaavojen 7 ja 8 mukaisella tavalla. Näin ollen on lähtökohtaisesti yksinkertaisempaa toteuttaa tuloilman lämpötilasuhteen laskenta kaikille ilmastointikoneille etävalvontajärjestelmässä, huolimatta siitä, onko kyseinen tieto luettavissa ohjelmallisena pisteenä rakennusautomaatiosta. Näin voidaan varmistua myös tulosten vertailukelpoisuudesta. Taulukkoon 9 on koottu tuloilman lämpötilasuhteiden keskimääräiset arvot yhdeltä vuorokaudelta.

Taulukko 9. Ilmastointikoneiden keskimääräiset lämpötilasuhteet tarkasteluvuorokaudelta 9.1.2023.

Ilmastointikone	Tuloilman lämpötilasuhte
Kone 1: Toimistokiinteistö nestekiertoisella lämmöntalteenotolla	Ei laskettavissa
Kone 2: Toimistokiinteistö lämpöputkipatterilla	0,47
Kone 3: Asuinkiinteistö ristivirtalämmöntalteenotolla	0,17

Koneelta 1 puuttui sekä lämmöntalteenottolaitteen jälkeinen tuloilman lämpötilanturi, että jäteilman lämpötila-anturi, joten lämpötilasuhteita ei voitu laskea. Vertaamalla taulukossa 4 esitettyjä koneiden 2 ja 3 tuloilman keskimääräisiä lämpötilasuhteita tarkasteluvuorokaudelta luvussa 5.6 esitetyn taulukon 6 erityyppisten lämmönsiirtimien lämpötilasuhteisiin, voidaan sanoa koneen 2 lämmöntalteenoton toimineen sille asetetulla vaatimustasolla, kun puolestaan koneen 3 lämmöntalteenoton toiminnassa on selkeitä puutteita. Molempien koneiden lämpötilasuhteiden laskennassa on mitattu ja huomioitu tulo- ja poistoilmavirtojen suhde.

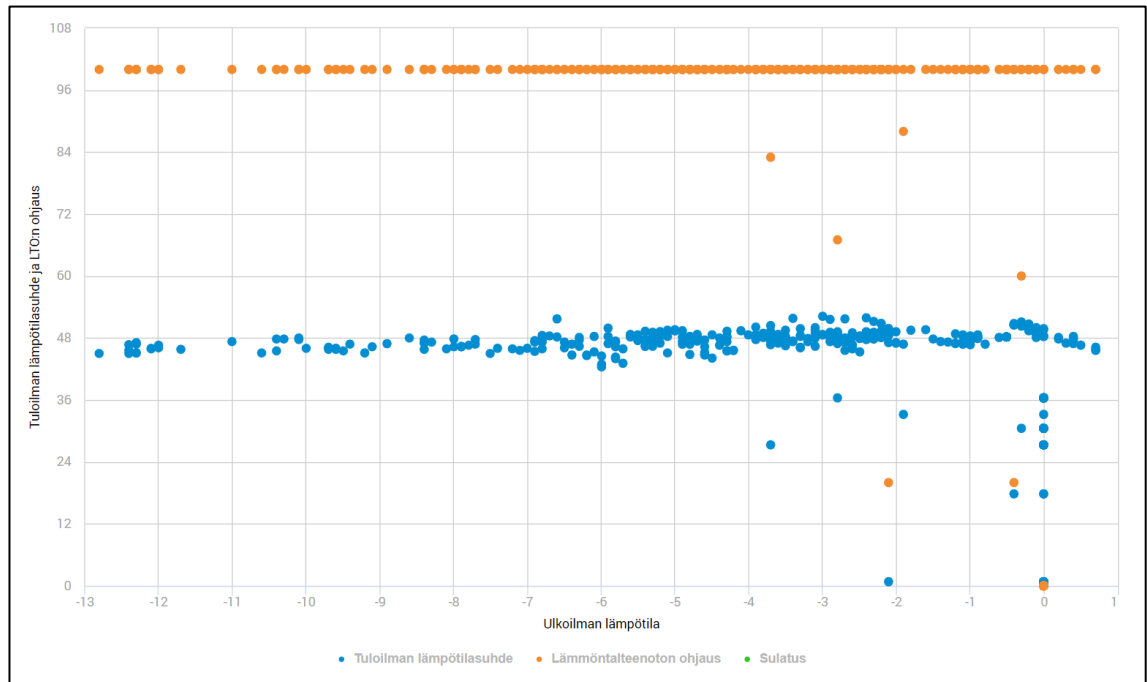
Tarkastelemalla tuloilman lämpötilasuhdetta yhdessä ulkoilman lämpötilan kanssa, saadaan selkeämpi käsitys lämmöntalteenottolaitteen toiminnasta eri ulkolämpötiloilla. Kuten kuvasta 16 havaitaan, koneen 3 lämmöntalteenottolaitteen tuloilman lämpötilasuhte (siniset pisteet kuvaajassa) alkaa pudota merkittävästi 0 °C:n lämpötilassa.



Kuva 16. Koneen 3 lämmöntalteenoton toiminta eri ulkolämpötiloissa. Kuvassa havaittavissa selkeä vika lämmöntalteenottolaitteen toiminnassa tarkastelujaksolla 5.11.2022–4.3.2023.

Syyksi tuloilman lämpötilasuhteen laskuun pakkaskeleillä on epäilty lohkosulatusautomaatiikan toimimattomuutta, joka on vaivannut tätä konetta alusta asti. Sulatus toimintoa on muutettu lämpötilaohjatusta paine-ero-ohjatuksi, mutta muutoksesta ei vaikuttanut olevan välitöntä apua. Sulatusautomaatiikan pääläoloidikointi on kuvaajaan merkitty vihreällä värillä ja kuten kuvaajasta nähdään, 0 °C:n alapuolella sulatus on käynnissä noin 50 % ajasta. Kuvaajassa nähdään myös, että lämmöntalteenoton tehoa (kuvaajassa oranssit pisteet) aletaan rajoittaa jo noin 7 °C:ssa. Lämpötilavälillä 0... 6 °C lämmöntalteenoton tuloilman lämpötilasuhte on lähellä valmistajan ilmoittamaa arvoa.

Kone 2 palvelee toimistotiloja, joten mittauksiedot koneen lämmöntalteenoton toiminnan tarkasteluun kuvassa 17 on otettu ainoastaan arkipäiviltä klo 8–16. Toisin kuin koneen 3 lämmöntalteenottolaitteella, koneen 2 tuloilman lämpötilasuhde pysyy stabiilina noin 47 %:n osalta kaikissa tarkastelujakson ulkolämpötiloissa. Koneen 2 lämmöntalteenoton sulatusindikointia ei ole ohjelmoitu rakennusautomaatioon, joten sen toimintaa ei voida tässä yhteydessä esittää.



Kuva 17. Koneen 2 lämmöntalteenoton toiminta eri ulkolämpötiloissa tarkastelujaksolla 23.11.2022–12.1.2023.

### 8.3 Ilmansuodattimien toiminta

Ilmansuodattimien likaantumista seurataan suodattimen paine-erolähtetimen mittauksiedon perusteella. Paine-erotietoa käytetään usein myös puhaltimien käynnin indikoinnin määrittämisessä. Paine-eroon vaikuttavia tekijöitä ovat valitun suodattimen erotusaste, ilmavirta suodattimen läpi ja suodattimen puhtaus. Toisaalta myös esimerkiksi virheellisestä asennuksesta johtuva ohivirtaus vaikuttaa laskevasti suodattimien yli mitattuun paine-eroon.

Kuvassa 18 on esimerkki vikatilanteesta, jonka AFRY Monitor -järjestelmä havaitsi koneen 1 tuloilmasuodattimen toiminnassa: Ilmastointikoneen käyntiä ohjataan rakennusautomaation aikaohjelmalla viikkoaikataulun mukaisesti pysähdyksiin, puoliteholle tai täysiteholle (punainen viiva kuvassa 22). Koneen pysähtyessä kokonaan viikonloppuna yöllä, pitäisi paine-eron (vihreä viiva kuvassa 22) laskea hyvin lähelle nollaa. Myös puolitehon ja täysitehon välillä pitäisi olla ero suodattimen paine-erossa, koska ilmavirta suodattimen läpi on merkittävästi suurempi täysiteholla. Ongelmaksi diagnosoitiin vikaantunut paine-erolähetin, jonka vaihdon jälkeen tilanne normalisoitui.



Kuva 18. Koneen 1 tulosuodattimen paine-ero ja tulopuhaltimen ohjaus tarkastelujaksolla 25.–31.7.2022.

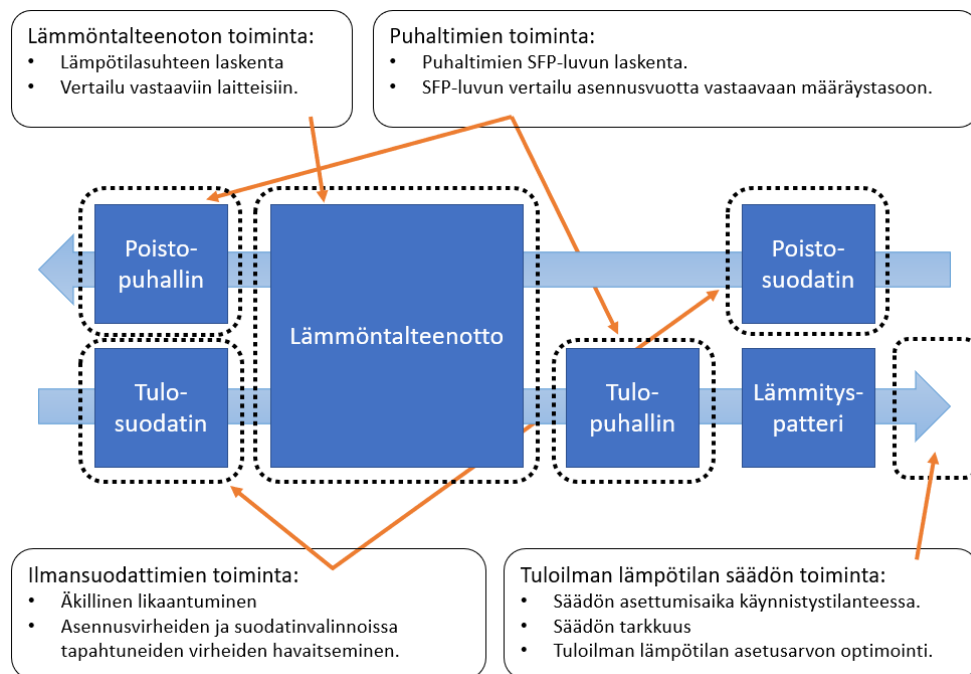
Ilmastointikoneella on tyypillisesti kaksi ilmansuodatinta, jotka sijaitsevat ilman käsittelyprosessissa tulo- ja poistupuolella ennen lämmöntalteenottolaitetta. Yleensä tulosuodattimen paine-ero on selvästi suurempi kuin poistosuodattimen, koska tulosuodattimena käytetään tehokkaampaa suodatinta. Jos paine-ero tulo- ja poistosuodattimien yli on lähellä samaa tasoa, on jompikumpi suodattimista todennäköisesti valittu väärin, eli käytössä on joko kaksi tulosuodatinta tai kaksi poistosuodatinta. Tulo- ja poistoilmavirtojen merkittävästä epätasapainosta saattaa aiheutua normaaliksi luokiteltava tilanne, jossa oikean tyyppisen tulosuodattimen paine-ero on pienempi kuin oikean tyyppisen poistosuodattimen.

## 8.4 Puhaltimien toiminta

Puhaltimien verkosta ottama sähköteho on usein luettavissa taajuusmuuttajilta, mutta valitettavan harvoin tätä mahdollisuutta on hyödynnetty kiinteistöautomaatiota suunniteltaessa tai ilmastointikoneita saneerattaessa. AFRY Monitor -järjestelmään ohjelmoitiin joka tapauksessa valmiit laskennat yksittäisten puhaltimien ja koko ilmastointikoneen ominaissähkötehon, eli SFP-luvun laskentaan luvun 5.4 kaavojen 2 ja 3 mukaisesti. Laskettuja arvoja verrataan taulukossa 4 esitettyihin vaatimuksiin.

## 9 Yhteenveto

Opinnäytetyössä perehdyttiin ilmastointikoneiden toiminnalle asetettuihin vaatimuksiin ja kehitettiin AFRY Monitor -järjestelmään analytiikkamalleja ilmastointikoneiden toiminnan optimointiin sekä vikatilanteiden havaitsemiseen ja diagnosointiin. Kuvassa 19 on säätökaaviomuodossa yksinkertaistettu generisen ilmastointikoneen rakenne sekä ilmankäsittelyprosessin eri vaiheisiin liittyvät toiminnallisuudet etähallintajärjestelmässä.



Kuva 19. Opinnäytetyön tuloksena etähallintajärjestelmään kehitettyjä toimintoja.

Kehitettyjen analytiikkaratkaisujen avulla tarkasteltiin kolmen rakenteeltaan hie-  
man erityyppisen ilmastointikoneen toimintaa. Työn vaikuttavuuden ja järjestel-  
män potentiaalin kannalta on hienoa todeta, että kaikissa valituissa kolmessa  
ilmastointikoneessa havaittiin vähintään yksi poikkeama koneen toiminnassa:

- Kone 1: suodattimen paine-erolähetin vikaantunut.
- Kone 2: Tuloilman lämpötilan asettumisaika käynnistymistilanteessa on to-  
della pitkä. Tuloilman lämpötilan asetusarvo on myös tarpeettoman kor-  
kea.
- Kone 3: lämmöntalteenoton hyötysuhde laskee pakkaskeleillä huomatta-  
vasti kennon huurtumisen vuoksi.

Opinnäytetyön tavoitteena oli parantaa ilmastointikoneen toiminnan seuranta  
kehittämällä automaattisia analytiikkaratkaisuja. Valittujen metodien ja järjestel-  
män skaalautuvuuden ansiosta tavoite saavutettiin selkeästi. Tätä kirjoitetta-  
essa AFRY Monitor -järjestelmässä on etävalvonnassa noin 250 ilmastointiko-  
netta. Vikatilanteet havaitaan uusien analytiikkamallien avulla nopeammin kuin  
olisi koskaan ollut ihmisvoimin mahdollista ja myös pienet merkityksettömiltäkin  
vaikuttavat poikkeamat huomataan ennen kuin niistä kasvaa suurempia ongel-  
mia. Luvussa 10 tuodaan esille vielä muutamia jatkotoimenpiteitä, joita syystä  
tai toisesta ei tämän opinnäytetyön puitteissa pystytty toteuttamaan.

## 10 Jatkotoimenpiteet

Kiinteistöjen erilaiset käyttötarkoitukset, ilmastointikoneiden kehitys ja monipuo-  
liset ohjaukset sekä vuodenaikojen mukaan vaihtelevat ulko- ja sisäilman olo-  
suhteet edellyttävät, että tämän opinnäytetyön tuloksena tehtyjä ohjelmointeja  
päivitetään tulevaisuudessakin.

Muutamia kehityskohteita jäi vielä odottamaan jatkotoimenpiteitä. Esimerkiksi  
ilmastointikoneen tuloilman kosteuden säätö on siinä määrin harvinaista, että  
opinnäytetyötä laadittaessa käytettävissä ei ollut mittaustietoja yhdestäkään  
kosteussäätöä suorittavasta ilmastointikoneesta. Analytiikan ohjelmoinnin vii-  
meistely on näin ollen mahdollista suorittaa vasta kun sen toimintaa voidaan  
testata todellisella datalla.

Myös suodattimien analysoinnissa on kehityspotentiaalia. Ilmanvaihtokoneiden suodattimien vaihto on merkittävä menoerä. Suodattimien vaihto tehdään kuitenkin lähes poikkeuksetta kalenteriin perustuen kaksi kertaa vuodessa, huolimatta suodattimien todellisesta likaantumisasteesta ja jäljellä mahdollisesti olevasta käyttöiästä. Suodattimen likaantumista automaattisesti seuraamalla voidaan aikaistaa tai lykätä vaihtoja. Näin on mahdollista saavuttaa joko kustannussäästöjä tai vähintäänkin parempi sisäilman laatu. Suodattimien likaantumisen seuranta varten ohjelmoitiin tässä työssä sääntöpohjainen malli. Optimaalisen vaihtoajankohdan määrittämiseksi suodattimien likaantumista ennustavaa mallia tulisi jatkokehittää tunnistamaan suodattimien vaihtoajankohdat ja likaantumisnopeuden muutokset. Mallin tuottamaa tietoa voitaisiin hyödyntää kiinteistön sähköisessä huoltokirjassa suodatinvaihtotehtävän suorituksen varmennuksessa ja seuraavan vaihdon aikataulutuksessa.

## Lähteet

Asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 2017. 1010/2017. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Energiakatselmoijan käsikirja osa 2. 2016. Helsinki: Motiva Oy.

Energiatehokkuus – Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2017. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Eurovent 4/23–2020. Ilmansuodattimien EN ISO 16890 -luokituksen mukaisen suodatinluokan valinta yleisilmanvaihdon sovelluksiin - 3. painos. 2020. Bryssel: Eurovent.

Hagner, Börje. 2017. Kun isoisä Fläktiltä pajatuhottimen osti. LVI-alan historia-kooste 2017. Tampere: Hagner, Börje.

Julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohje ja Julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohjeen perustelumuuisto. 2019. Espoo, Helsinki, Jyväskylä, Kuopio, Lahti, Oulu, Tampere, Turku, Vantaa: Kuntien sisäilmaverkosto.

Katipamula, Srinivas. & Brambley, Michael. 2005. Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems—A Review, Part I. International Journal of HVAC&R Research. Vol. 11. No. 1.

Klusaitė, Laura. 2022. TCP IP -mikä se on, mihin sitä tarvitaan ja mitä se tekee? Blogikirjoitus. Verkkoaineisto. NordVPN. <<https://nordvpn.com/fi/blog/tcp-ip-protokolla/>>. Luettu 14.3.2023

Kärki, Satu & Karjalainen, Sami. 1999. Ilmastointijärjestelmän vikadiagnostiikka: Menetelmät ja sovellukset. Espoo: VTT.

Talotekniikan rakentamisen yleiset laatuvaatimukset. 2002. LVI 01-10355. Hämeenlinna: Rakennustieto Oy.

Ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho SFP. 2013. LVI 30-10529. Rakennustieto Oy.

Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D5. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2013. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D5. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. 2002. Suomen rakentamismääräyskoelma, osa D2. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Saari, Mikko & Nyman, Mikko. 2017. Tasauslaskentaopas 2018: Rakennuksen lämpöhäviön määrystenmukaisuuden osoittaminen. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Sandberg, Esa. 2014a. Ilmastointilaitoksen mitoitus. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Sandberg, Esa. 2014b. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

SFS 5768. Ilmastointijärjestelmien säädön toiminnalle asetettavat vaatimukset. 1993. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto ry.

SFS 5907. Rakennusten akustinen luokitus. 2004. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

Sisäilmasto ja ilmanvaihto -opas. 2021. Verkkoaineisto. Talotekniikkainfo. Talotekninen teollisuus ja kauppa ry. <<https://www.talotekniikkainfo.fi/sisailmasto-ja-ilmanvaihto-opas>>. Päivitetty 11.6.2021. Luettu 4.11.2022.

Kiinteistöjen etävalvonta ja ilmoitusten siirto. 2021. ST 669.10. Espoo: Sähkö-tieto ry.

Rakennusautomaatiojärjestelmän hyödyntäminen. 2017. ST 710.10. Espoo: Sähkö-tieto ry.

Rakennusautomaatiojärjestelmät. 2018. ST-käsikirja 17. Espoo: Sähkö-tieto ry.

Taloteknisten järjestelmien tiedonsiirto. 2022. ST-käsikirja 21. Espoo: Sähkö-tieto ry.

What makes Tosibox so secure? 2022. Verkkoaineisto. Tosibox Oy. <<https://blog.tosibox.com/what-makes-tosibox-so-secure>>. Luettu 4.3.2023.