



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mikko Hakanen

Rakennusautomaation avulla saavutettava energiatehokkuus ja pienempi hiilijalanjälki

Opinnäytetyö

Kevät 2022

SeAMK Tekniikka

Automaatiotekniikka YAMK



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Seamk Tekniikka

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (YAMK)

Suuntautumisvaihtoehto: Automaatiotekniikka

Tekijä: Mikko Hakanen

Työn nimi: Rakennusautomaation avulla saavutettava energiatehokkuus ja pienempi hiilijalanjälki

Ohjaaja: Ismo Tupamäki

Vuosi: 2022

Sivumäärä: 44

Liitteiden lukumäärä: 2

Tämän tutkimustyö tehtiin Helsingissä toimivan kiinteistösijoitusyhtiön toimeksiannosta. Tutkimustyön tarkoituksena oli kartoittaa kolmen esimerkki kiinteistön avulla rakennusautomaation avulla saavutettavia energiansäästöjä. Työ tehtiin yhteistyössä Leo Maaskola Oy:n rakennusautomaatio- ja energiaosastojen kesken.

Työ aloitettiin selvittämällä kaikki nykyiset järjestelmät, sekä keräämällä nykyiset energiakulutustiedot. Kiinteistöistä ja suunnittelutoimistoilta kerättiin myös pieni määrä kiinteistöjen nykyisten ratkaisujen suunnitelmia. Rakennusautomaatiojärjestelmään ehdotetut muutokset simuloitiin Leo Maaskola Oyn energiaosaston toimesta. Saatuja tuloksia vertailtiin nykyisiin energiakulutustietoihin, tämän perusteella tehtiin elinkaari- ja kannattavuuslaskelmat.

Simulointituloksien perusteella tilaajalle koostettiin esitys suositelluista toimenpiteistä sekä esiteltiin simulointien ja laskelmien tulokset. Lisäksi esitettiin perusteet, miksi jotkin ehdotetut toimenpiteet eivät ole kannattavia investointeja. Laskelmien perusteella ehdotetut toimenpiteet rajattiin laskelmien perusteella kustannustehokkaimpiin ratkaisuihin ja näistä esiteltiin tilaajalle investointikustannukset, takaisinmaksuajat sekä laskelmat säästetyistä hiilidioksidipäästöistä. Kannattavammiksi toimenpiteiksi kaikkien kiinteistöjen kokonaisuutta ajatellen nousivat älykkäämpi lämmityksen ohjauksen säätö, erillispoistojen yöaikainen käyntitehon puolitus, tilojen yötuuletus sekä liiketilojen tarpeenmukainen ilmanvaihdon ohjaus.

¹ Asiasanat: rakennusautomaatio, talotekniikka, energiatehokkuus, kiinteistöt, hiilijalanjälki

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Faculty: School of Technology

Degree programme: Master's Degree in Automation Technology

Author: Mikko Hakanen

Title of thesis: Better Energy Efficiency and Smaller Carbon Footprint in Buildings with Building Automation

Supervisor: Ismo Tupamäki

Year: 2022

Number of pages: 44

Number of appendices: 2

The thesis was made for a real estate investment company operating in Helsinki. The purpose of the research was to find energy savings that can be achieved with building automation. For this, three example properties owned by the company were studied. The work was done in collaboration with the building automation and energy department of Leo Maaskola Oy.

The work was started by mapping all existing systems in the properties and collecting current energy consumption data. Also a small number of plans for the existing systems was collected. The planned changes for the building automation system were simulated by the energy department. The results of the simulations were compared to the old energy consumption data.

The results of the simulations were presented to the customer. In addition, it was explained why some of the planned changes are not profitable for these properties. The proposed measures to be taken were limited to a few of the most cost-effective solutions. All investment costs, payback periods, and calculations of CO₂ emissions were presented to the customer. The most beneficial changes for the properties were smarter control of heating, night-time split of power for separate exhausts, night ventilation and the ventilation control by need for business spaces.

¹ Keywords: building automation, energy efficiency, buildings, carbon footprint

SISÄLTÖ

| | |
|--|----|
| Opinnäytetyön tiivistelmä | 1 |
| Thesis abstract | 2 |
| SISÄLTÖ | 3 |
| Kuva- ja taulukkoluetelo..... | 5 |
| 1 JOHDANTO | 8 |
| 1.1 Työn taustaa ja tavoite | 8 |
| 1.2 Insinööritoimisto Leo Maaskola Oy..... | 8 |
| 1.3 Rakennusautomaatio | 9 |
| 1.4 Rakennusautomaatiosuunnittelu | 11 |
| 1.5 Energiasuunnittelu | 12 |
| 2 RAKENNUSTEN ENERGIAATEHOKKUUS | 15 |
| 2.1 Yleistä | 15 |
| 2.2 Kiinteistöjen oikea käyttö..... | 15 |
| 2.3 Energiatehokkuus | 16 |
| 2.4 Hiilijalanjälki..... | 17 |
| 3 TUTKIMUSOSA | 18 |
| 3.1 Työssä käytetty tutkimusmenetelmä..... | 18 |
| 3.2 Lähtötilanteen kartoitus | 18 |
| 3.2.1 Valvomo..... | 18 |
| 3.2.2 Alakeskukset..... | 20 |
| 3.2.3 Ilmanvaihto..... | 21 |
| 3.2.4 Lämmönjako | 24 |
| 3.2.5 Jäähdytys..... | 25 |
| 3.2.6 Energian kierrätys | 27 |
| 3.2.7 Sähkö ja valaistus | 27 |
| 3.3 Energialaskelmat ja simuloinnit | 27 |
| 3.3.1 Simuloinnissa käytetyt ohjelmat..... | 29 |

| | |
|--|----|
| 3.4 Laskelmien tulokset..... | 30 |
| 4 TULOKSET | 32 |
| 4.1 Ehdotetut toimenpiteet | 32 |
| 4.1.1 Aikaohjelmat | 32 |
| 4.1.2 Ehdotetut rakennusautomaatiojärjestelmän muutokset | 32 |
| 4.1.3 Muita suositeltuja toimenpiteitä | 35 |
| 4.2 Toimenpiteiden vertailujen tulokset | 36 |
| 5 YHTEENVETO | 38 |
| LÄHTEET | 39 |
| LIITTEET | 42 |

Kuva- ja taulukkoluetelo

| | |
|---|----|
| Kuva 1. Ilmanvaihtokoneen säätökaavio..... | 11 |
| Kuva 2. Laitetunnuksen rakenne | 12 |
| Kuva 3. Energiatodistus (Raksystems Group, 2020). | 13 |
| Kuva 4. Esimerkkikaavio Honeywell Excel5000..... | 19 |
| Kuva 5. Esimerkkikaavio Stematic..... | 19 |
| Kuva 6. Esimerkkikaavio Fidelix | 20 |
| Kuva 7. Alakeskukset..... | 20 |
| Kuva 8. Ilmanvaihtokoneen laitekilpi..... | 21 |
| Kuva 9. Hihnavetoinen moottori..... | 22 |
| Kuva 10. Taajuusmuuttajat | 22 |
| Kuva 11. Ilmanvaihtokoneen aikaohjelma..... | 23 |
| Kuva 12. Ilmanvaihtokoneen vyöhykepeltien prosessikaavio | 24 |
| Kuva 13. Lämmönjaon prosessikaavio | 25 |
| Kuva 14. Kaukojäähdytyksen prosessikaavio | 26 |
| Kuva 15. Palkkijäähdytyksen asetusarvon käyrän prosessikaavio | 26 |
| Kuva 16. Energiamalli..... | 29 |
| Kuva 17. Sisäilmaolosuhteet..... | 30 |
| Kuva 18. Investoinnin kannattavuus | 31 |
| Kuva 19. Kumulatiivinen kassavirta | 31 |

| | |
|---|----|
| Taulukko 1. Energiatarpeen laskentataulukko | 28 |
|---|----|

Käytetyt termit ja lyhenteet

| | |
|--------|--|
| LVIA | Taloteknisestä suunnittelusta käytetty yleisnimitys, joka pitää sisäl- lään lämpö-, vesi- ja ilmanvaihtosuunnittelun sekä automaatio- suunnittelun. |
| ARA | Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus |
| E-LUKU | Energiamuotojen kertoimilla painotettu, rakennuksen normaaliin käyttöön perustuva ostoenergiankulutus jokaista lämmitettyä net- toalaa kohden vuodessa (Motiva 2019). |
| I/O | Input/Output eli tulo/lähtö |
| BACnet | Avoin standardoitu tiedonsiirtoprotokolla rakennusautomaatiossa (BACnet International 2020). |
| EC | EC on lyhennys sanoista Electronically Commutated. EC-puhallin muuttaa vaihtovirran tasavirraksi ja puhallinnopeutta ohjataan sää- tämällä moottorin virtaa. |
| IRR | IRR eli sisäinen korkokanta on investoinnin se laskentakorko, jolla investoinnin nettonykyarvo on nolla. Investointi on kannattava, jos sen sisäinen korkokanta on mahdollisimman suuri. |

1 JOHDANTO

1.1 Työn taustaa ja tavoite

Tämän tutkimustyön esimerkkikohteena oli kolmen kiinteistöosaakeyhtiön kokonaisuus Helsingin keskustassa. Kiinteistöt ovat valmistuneet 1800- ja 1900-luvun taitteessa. Niihin on vuosien mittaan tehty paljon peruskorjausta ja esimerkiksi talotekniikkaa on saneerattu laajasti. Kiinteistöihin ollaan tekemässä lähivuosina koko rakennusautomaatiojärjestelmän saneerausprojekti. Nyt tehdyllä tutkimus- ja kehitystyöllä oli tarkoitus kartoittaa, mitä muita muutoksia rakennusautomaatioon sekä taloteknisiin järjestelmiin suositellaan tehtäväksi saneerauksen yhteydessä. Toimenpiteiden tähtäimenä oli energiantehokkuuden parantaminen sekä hiilijalanjäljen pienentäminen. Toimenpiteet sekä ehdotetut ratkaisut pyrittiin tekemään siten, että sisäilmaolosuhteet kiinteistössä eivät heikkene.

Työn tutkimuskysymyksiä ovat:

1. Miten nykyinen rakennusautomaatiojärjestelmä palvelee kiinteistöä?
2. Mitä lisäyksiä ja muutoksia rakennusautomaatiojärjestelmään voidaan tehdä?
3. Ovatko ehdotetut muutokset kustannus- ja energiatehokkaita?
4. Pienentääkö ehdotetut muutokset rakennuksen hiilijalanjälkeä?

1.2 Insinööritoimisto Leo Maaskola Oy

Insinööritoimisto Leo Maaskola Oy on 15.5.1956 perustettu suunnittelu-, valvonta ja projektijohtotoimisto. Perustamisen aikaan suunnittelua siirrettiin asennusliikkeiltä suunnittelutoimistoille paremman tuloksen saavuttamiseksi. Yritys on johdon omistama. Henkilöstöä on tällä hetkellä 58. Yrityksen toimistot sijaitsevat Helsingissä ja Turussa. Yritys toimii talotekniikka-, sähkö-, energia- sekä rakennesuunnittelussa, projektinjohtamisessa ja valvontatehtävissä. Toimitusjohtajana toimii Kari Seitaniemi. (Insinööritoimisto Leo Maaskola Oy 2021.)

1.3 Rakennusautomaatio

Rakennusautomaatio on työkalu rakennuksien käyttöön. Rakennusautomaatiolla ohjataan sekä tarkkaillaan rakennuksen taloteknisiä prosesseja. Rakennusautomaatiolla pyritään luomaan rakennukselle mahdollisimman pitkä ja energiatehokas elinkaari. (Suomen Automaatioseura ry 2021.) Rakennusautomaatio jaetaan kolmeen tasoon. Tasoista ylimpänä on valvomotaso, johon kaikki järjestelmään liitetyt tiedot on keskitetty. Seuraavana tasona on alasemataso, johon kenttälaitteet liitetään I/O-liitynnöillä. Alimpana tasona on kenttälaitetaso. Kenttälaitteilla tarkoitetaan rakennusautomaatioon liitettäviä laitteita, joilta luetaan tai joita ohjataan järjestelmästä. Kenttälaitteita ovat esimerkiksi lämpötila-anturit, venttiilien sekä peltien toimilaitteet sekä paine-eromittaukset. Normaalisti rakennusautomaatiojärjestelmä koostuu yhdestä tai useammasta rakennusautomaation alakeskuksesta sekä yhdestä keskitetystä valvomosta. (Heikkinen 2018.)

Alakeskukset sijaitsevat useimmiten kiinteistöjen lämmönjakohuoneissa sekä ilmanvaihdon konehuoneissa. Alakeskukset ohjaavat kenttälaitteita sekä lukevat kentälle asetettavien antureiden mittaustietoa. Ohjattavat laitteet on liitetty alakeskukseen I/O-moduulien avulla. Järjestelmään liitettyjä laitteita ohjataan joko tiettyihin kellonaikoihin sidotuilla ohjauksilla tai tarpeen mukaisesti. (Liedes 2008, 12.) Aikaohjelmien avulla energiatehokkuutta parannetaan esimerkiksi pienentämällä ilmanvaihtokoneen ilmamäärää tai laskemalla sisälämpötilan asetusarvoa käyttöaikojen ulkopuolella. Tarpeenmukaisessa ohjauksessa tilan ilmanvaihtoa tehostetaan esimerkiksi huoneilman hiilidioksidipitoisuuden tai lämpötilan perusteella (Morén 2021.)

Kenttälaitteet toimivat järjestelmän tuntoeliminä ja keräävät tietoa taloteknisistä prosesseista joko mittaustietoina tai kosketintietona. Näiden perusteella ohjataan prosessin muita osia. (Liedes 2008, 12.)

Esimerkkinä kiinteistön säätöprosessista voidaan käyttää käyttöveden lämpötilansäätöä. Vesijärjestelmiin pääsee luonnonveden sekä vesilaitosten käsittelemän veden mukana mikrobeja, jotka huonontavat kasvaessaan veden laatua ja voivat aiheuttaa terveysriskin (Terveystieteiden tutkimuskeskus ja hyvinvoinnin laitos 2020). Käyttövesiverkostoon menevään veteen asennetun lämpötila-anturin mittaustuloksen perusteella avataan tai suljetaan kaukolämmön venttiiliä siten, että haluttu lämpötilan asetusarvo käyttövedessä säilytetään (Motiva 2018a).

Taloteknisistä prosesseista tallennetaan tietoja valvomon historiankeruuseen. Historiankeruu voi olla joko numeraalista listaamista taulukko-ohjelmaan tai graafista. Graafisessa historiankeruussa numeraaliset arvot piirretään graafisiin käyriin eli trendeihin. Historiankeruu on tärkeä työkalu taloteknisten prosessien toimivuuden seurantaan, analysointiin ja raportointiin. (Liedes 2008, 11.)

Valvomo on joko fyysinen tietokone kiinteistössä tai internetverkon yli käytettävä etävalvomo. Valvomoon luodut prosessikaaviot taloteknisistä laitteista toimivat käyttöliittymänä talotekniikkaan. Valvomosta käsin lähtevät myös jatkohälytykset. Jatkohälytykset lähetetään gsm-modeemilla käyttäjän määrittämiin puhelimiin tai sähköposteihin. (Liedes 2008, 11–13.)

Huolellisesti laadittujen valvomon prosessikaavioiden avulla saa hyvän käsityksen rakennuksen talotekniikasta jo pelkästään valvomoa tarkastelemalla. Valvomoon laaditut paikannus- sekä vaikutusaluepiirustukset auttavat lisäksi laitteiden paikantamisessa esimerkiksi vikatilanteissa. Teknologioiden kehittyessä valvomoiden toimintoja on alettu toteuttaa pilvipalveluissa. Pilvipalvelussa sijaitsevan valvomon hyötynä on, että sen käyttöikä ei ole sidottu fyysisen valvomokoneen komponentteihin tai tallennustilaan. Pilviteknologiassa mitaukset, tiedot järjestelmästä sekä ohjelmistot sijaitsevat yhdellä tai useammalla etäpalvelimellä. Käyttäjän ei tarvitse investoida laitteisiin, vaan valvomoa käytetään internetin yli internetselaimen kautta. (Fidelix Oy 2021.)

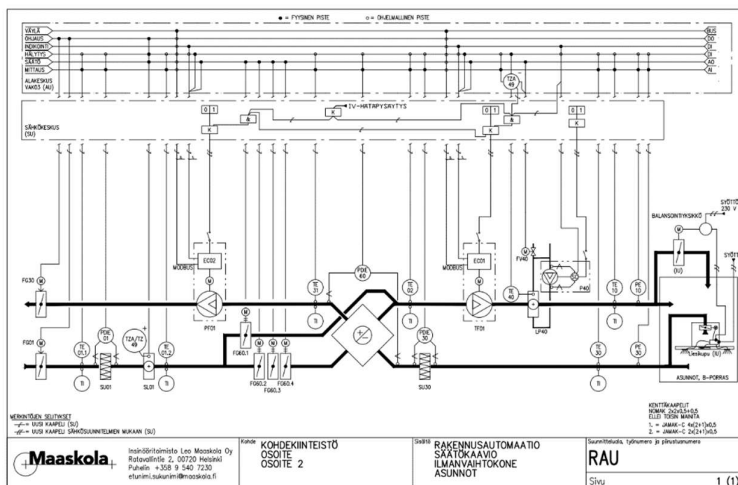
Rakennusautomaatiojärjestelmä ja sen valvomo eivät ole lyhyen tähtäimen hankintoja, vaan ne vaikuttavat rakennuksessa vuosia. Hankittaessa valvomon osuus on hankkeen kokonaishinnasta usein alle promillen, mutta käytössä se on oleellinen osa kiinteistön hallintaa. (Liedes 2008, 9.)

Tyypillinen rakennusautomaatiojärjestelmän elinkaari on 15–20 vuotta, jonka jälkeen on perusteltua uusia koko järjestelmä. Järjestelmän eri osilla on eri mittaiset tekniset käyttöiät. Valvomolaitteiston käyttöikä on viisi vuotta. Valvomon käyttöikä voidaan pidentää ohjelmiston päivityksillä. Alakeskuksilla tekninen käyttöikä on noin 15 vuotta. Pisin käyttöikä on kenttälaitteilla, joilla se on noin 20 vuotta. (Liedes 2008, 9.)

Rakennusautomaatioala on murroksessa. Tietoa siirretään enemmän pilvipalveluihin. Pilvipalvelussa tekoäly tekee automaattisesti taloteknisten prosessien säätöä, ennakointia sekä optimointia. Pilvipalveluiden avulla saadaan ennakkotietoa huollon tarpeista jo ennen laitteiden vikaantumista. (Aatsalo 2019.)

1.4 Rakennusautomaatiosuunnittelu

Opinnäytetyön kirjoittaja toimii suunnittelutoimiston LVIA-osastolla rakennusautomaatiosuunnitteluryhmässä projektipäällikkönä. Rakennusautomaatiosuunnittelu suunnittelee, miten LVI-suunnittelun valitsemia taloteknisiä laitteita ohjataan niin, että halutut olosuhteet kiinteistöissä saavutetaan mahdollisimman energiatehokkaasti. Rakennusautomaation tehtävänä on laatia ja suunnitella säätökaaviot ja toimintaselostukset kaikille rakennusautomaatiojärjestelmästä ohjattaville talotekniikan laitteille. Esimerkkikaaviossa (kuva 1) on esitetty mallikaavio kerrostalotasuntojen keskitettyyn ilmanvaihtoon suunnitellulle ilmanvaihtokoneelle.



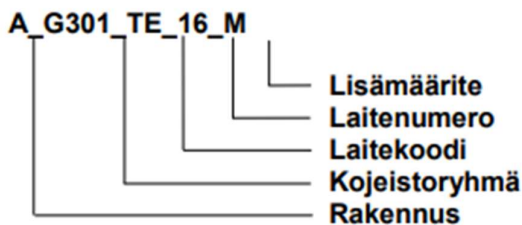
Kuva 1. Ilmanvaihtokoneen säätökaavio

Kaikki talotekniset laitteet nimetään joko asiakkaan omalla tai suunnittelutoimiston laitetunnusjärjestelmällä. Laitetunnusjärjestelmän avulla jokainen talotekninen laite järjestelmässä voidaan yksilöidä, jolloin esimerkiksi vikatilanteessa tiedetään, mikä laite antaa hälytyksen.

Laitetunnus koostuu:

1. Rakennustunnuksesta, joka kohdistaa laitteen tiettyyn rakennukseen.
2. Kojeistoryhmän tunnuksesta, joka yksilöi laitteen osaksi jotain kokonaisuutta, kuten ilmanvaihtokonetta.
3. Laitekoodista, joka kertoo, mikä järjestelmän piste on kyseessä tai missä kohtaa järjestelmää laite sijaitsee.
4. Laitenumeroista, joka on juokseva numerointi laitteiden perässä.
5. Sekä tarvittaessa lisämääritteestä, joka erittelee esimerkiksi saman tilan laitteet.

Esimerkkinä laitetunnuksesta kuvassa 2 esitetään ilmanvaihtokoneen G301 huonelämpötilamittaus rakennuksessa A.



Kuva 2. Laitetunnuksen rakenne

Vaikka rakennusautomaation osuus LVIA-suunnittelusta on usein paljon muuta suunnittelua pienempi, on sen merkitys kuitenkin suuri rakennuksen energiatehokkuuden näkökulmasta.

1.5 Energiasuunnittelu

Energiasuunnittelulla pyritään löytämään energiaratkaisuja, joiden avulla voidaan parantaa rakennuksien energiatehokkuutta. Energiatehokkuuden laskennallisena vertailuarvona käytetään E-lukua. Päätöksenteon tukena voidaan käyttää lukuisia menetelmiä, mutta kustannustehokkuus on keskeisimpiä kriteerejä, jolla energiatehokkuutta lähdetään kehittämään. (Morén 2021.)

Rakentamisessa lakisääteisen energiatodistuksen tarkoitus on esittää rakennuksen energiatekniset ominaisuudet käyttäen asetusten mukaista laskentatapaa. Energiatodistus koskee vain itse rakennusta eikä niinkään sitä, miten rakennusta käytetään. (Myyryläinen 2019, 36.)

Esimerkki energiatodistuksesta esitetään kuvassa 3. Energiatodistus toimii työkaluna vertailtaessa eri rakennuksien energiatehokkuutta. Energiatodistus on esitettävä uudisrakennuksen rakennuslupaa haettaessa sekä vanhan rakennuksen myynnin tai vuokrauksen yhteydessä. Vaatimus ei kuitenkaan koske kaikkia tilanteita. Esimerkiksi, jos rakennus on alle 50 m² tai on tarkoitettu loma-asumiseen, ei todistusta tarvita. Energiatodistuksen voimassaoloaika on 10 vuotta. (Motiva 2018b.)

ENERGIATODISTUS 2018

Rakennuksen nimi ja osoite:

Pyövyä rakennustunnus:
Rakennuksen valmistusvuosi:
Rakennuksen käyttötarkoitusluokka:

Todistusnumeros:

Energiatodistus on laadittu
 Uudelle rakennukselle rakennuslupaa haettaessa
 Uudelle rakennukselle käyttöönottoaiheessa
 Olemassa olevalle rakennukselle, havainnointikäynnin päivämäärä:

| | Energiatodistuskategoria |
|---|--------------------------|
| A | |
| B | |
| C | |
| D | |
| E | E 2018 |
| F | |
| G | |

Rakennuksen laskennallinen energiatehokkuuden vertailuluokka E-luokan uuden rakennuksen E-luokan vaatimustasoon

kWh_e /(m²vuosi)

s

Todistuksen laatija: Yritys:

Sähköinen allekirjoitus:

Todistuksen laatimispäivä: Viimeinen voimassaolopäivä:

Kuva 3. Energiatodistus (Raksystems Group 2018).

Erilaisiin rakennuskohteisiin soveltuvat eri energiaratkaisut. Elinkaarikustannuksilla voidaan vertailla eri investointivaihtoehtojen hyötyjä kannattavuusanalyysien sekä simulointien perusteella. (Morén 2021.)

Energiasimuloinneista saatavia tuloksia ovat mm.:

1. rakennuksen e-luku
2. sähkönkulutus
3. lämmitys- ja jäähdytystehot
4. rakennuksen vuosittain kuluttamat jäähdytys- ja lämmitysenergiat
5. huoneilman kosteustaso sekä hiilidioksidipitoisuus
6. rakennuksen hyödyntämät ilmaisenergiat. Ilmaisenergiaa ovat esim. käyttäjistä, laitteista, sekä auringosta syntyvä energia sekä niiden jakautuminen. (Morén 2021.)

Energiankulutuksen vähentäminen on Euroopan unionille tärkeä tavoite. Vuonna 2007 EU:n johtajat asettivat tavoitteeksi leikata vuosittaista energiankulutusta 20 prosentilla vuoteen 2020 mennessä. Vuonna 2018 asetettiin uusi tavoite vähentää energiankulutusta vähintään 32,5 prosentilla vuoteen 2030 mennessä. Energiatehokkuustoimilla varmistetaan kestävä energiahuolto, vähennetään kasvihuonekaasupäästöjä, lisätään energian toimitusvarmuutta ja vähennetään tuontikustannuksia sekä toisaalta parannetaan EU:n kilpailukykyä. Energiatehokkuus onkin energiaunionin strateginen painopiste. EU edistää energiategokkuus etusijalle -periaatetta. (Ciucci & Keravec 2021.) Euroopan unionin tavoitteiden vuoksi rakennusten hiilijalanjälkilaskenta on yleistynyt huomattavasti viime vuosina. Päästölaskenta ohjaa yhä enenevässä määrin, mitä energiaratkaisuja rakennuksiin tehdään. Energiasuunnittelun keskeisimpiä tavoitteita onkin löytää energiaratkaisut, jotka ovat sekä kustannustehokkaita, että ympäristöystävällisiä. (Morén 2021.)

Uudiskohteissa voidaan hyödyntää laajasti erilaisia energiaratkaisuja, kun suunnittelua voidaan ohjata alusta alkaen valitun energijärjestelmän mukaisesti. Olemassa olevan rakennuskannan säästöpotentiaali on kuitenkin suhteellisesti uudisrakentamista suurempi. Kaikkia energiategokkuustoimenpiteitä ei kuitenkaan voida käyttää olemassa olevissa rakennuksissa ilman suuria korjaustoimenpiteitä, koska rakennuksen nykyinen talotekniikka ei sovellu liitettäväksi uusiin energijärjestelmiin. Toisaalta vanhoissa rakennuksissa pienetkin energiategokkuustoimenpiteet voivat tuoda suuren hyödyn, niin hiilidioksidipäästöjen kuin kustannustehokkuudenkin kannalta. (Morén 2021.)

2 RAKENNUSTEN ENERGIA TEHOKKUUS

2.1 Yleistä

Tilastokeskuksen vuonna 2019 tekemässä asumisen energiakulutukseen liittyvässä selvityksessä todetaan, että asumisen energiankulutuksesta n. 68 % kuluu lämmitykseen, 15 % käyttöveden lämmitykseen ja viisi prosenttia saunojen lämmitykseen. Muiden asunnon sähkölaitteiden, kuten ruoan valmistukseen ja valaistukseen, kuluu n. 13 %. (Tilastokeskus 2019.) Ympäristöministeriön asetus 4/13 antaa erityyppisille rakennuksille energiankulutus- sekä E-luku-vaatimuksen. Asetus antaa kolme lähestymistapaa vaatimuksiin pääsemiseen. (Ympäristöministeriö 2020). Tässä työssä käytetään lähestymistapaa, jolla pienennetään rakennuksen standardikäytön energiankulutusta. Energiankulutuksen pienentäminen on tarkoitus toteuttaa rakennusautomaation avulla. Lisäksi tutkitaan muita mahdollisuuksia pienentää energiankulutusta työssä käsiteltävissä kiinteistöissä. Energiatehokkuutta parantamiseksi toimenpiteitä varten on haettava rakennus- tai toimenpidelupaa rakennusvalvonnasta. E-lukuun tai nykyisen energiankulutuksen pienentämiseen perustuvassa lähestymistavassa on laadittava erillinen suunnitelma siitä, miten vaaditulle energiankulutustasolle päästään kiinteistössä. (Ympäristöministeriö 2020).

2.2 Kiinteistöjen oikea käyttö

Kiinteistön elinkaaren sekä olosuhteiden kannalta paras tapa huolehtia kiinteistöstä on sen oikea käyttö. Tarpeenmukaisuus lämmityksessä ja ilmanvaihdossa ovat ensisijaisen tärkeitä mietittäessä käyttömukavuutta, sekä kiinteistön mahdollisimman pitkää elinkaarta. Kun tilat ovat tyhjillään, voidaan huonelämpötilojen antaa mennä mukavuusrajojen ulkopuolelle energian säästämiseksi. Lämmitysverkostojen lämpötilaa ohjataan yleisimmin ulkolämpötilan perusteella. Ulkolämpötilan vaikutus lämmitysverkoston menolämpötilaan kuvataan yleensä käyrällä, josta ilmenee kulloisenkin ulkolämpötilan mukainen menoveden asetusarvo.

Ilmanvaihdon tehokas käyttö ei tarkoita sitä, että ilmanvaihto pysäytetään esimerkiksi oppilaitoksissa kokonaan kesälomien ajaksi. Kun tilat ovat pitkään käyttämättöminä, pysäytyksen sijasta ilmanvaihdolle suositellaan huuhtelukäyttöä. Huuhtelukäytössä tilojen ilmanvaihdon

toa käytetään asetetun ajan vuorokaudessa. Sisäilmayhdistyksen Hyvä sisäilma -ohjeistuksen (Sisäilmayhdistys ry 2019) mukaan ilmanvaihto normaalin käytön ulkopuolella voidaan toteuttaa jaksottaisella tai jatkuvalla osateholla. Jaksottaisessa käytössä käytetään ilmanvaihtoa päällä asetellun ajan viimeisen tilojen käyttäjän poistuttua ja asetellun ajan ennen ensimmäisen käyttäjän saapumista. Osateholla taas ilmanvaihtoa käytetään jatkuvasti, mutta sen tehoa pienennetään aseteltuun osatehoon. Suositukset eivät koske asuintaloja, joissa ilmanvaihdon tulee olla jatkuvaa. Ilmanvaihdon käyttö on suunniteltava aina kiinteistökohtaisesti ja niin, että ilmavirtojen tasapaino tiloissa säilytetään joka tilanteessa. Erillispoistot ovat pelkästään tiloista poistavia ilmanvaihtokoneita. Mikäli rakennuksessa on erillispoistoja, on niiden korvausilma varmistettava myös käyttöaikojen ulkopuolella. Vaihtoehdoisesti myös erillispoistot on pysäytettävä muun ilmanvaihdon pysäytyksen ajaksi. Korvausilman puuttuessa erillispoistot saattavat aiheuttaa tiloihin alipaineen. Alipaine aiheuttaa tiloihin hallitsemattomia ilmapuotoja rakenteiden kautta. Tilojen painesuhteen heittely aiheuttaa pitkällä aikavälillä sisäilman laadun heikentymistä. (Sisäilmayhdistys ry 2019.)

2.3 Energiatehokkuus

Energiatehokkuudella tarkoitetaan kustannustehokasta tapaa käyttää tehokkaasti energiaa ja vähentää kasvihuonepäästöjä. Energiatehokas rakennus on omistajalle aina kannattava sijoitus. Energiatehokkaalla rakennuksella on edulliset ylläpito- ja huoltokustannukset ja pitkä käyttöikä. Energiatehokkaiden rakennusten tunnusmerkkinä voidaan pitää myös tilojen toimivuutta ja viihtyisyyttä. Lisäksi energiatehokkaalla rakennuksella on korkea jälleenmyyntiarvo. Ympäristövaikutukset energiatehokkaassa rakennuksessa ovat vähäiset. (Ympäristöministeriö 2020.)

Energiatehokkaan suunnittelun lähtökohtana on termodynamiikan ensimmäinen laki, jonka mukaan energiaa ei synny eikä häviä, vaan se muuttaa muotoaan. Aina kun rakennuksessa käytetään energiaa, syntyy sivutuotteena jotain muuta energiaa. Esimerkiksi jäähdyttäessä syntyy sivutuotteena lämpöä, useat sähkölaitteet tuottavat sähköenergiaa käyttäessään lämpöä jne. Näitä sivutuotteita ajatellaan usein "hukkaenergiana", vaikka sitä voitaisiin hyödyntää jonkun toisen suunnittelijan toimesta rakennuksen lämpöenergiana. (Caverion Suomi 2021.) Ympäristöministeriön laatiman rakentamismääräyskokoelman (Ympäristömi-

nisteriö 2021) mukaan energiatehokkuutta on parannettava rakennukseen tehtävän muutostyön yhteydessä. Suunnittelu- ja rakennusvaiheen ratkaisuilla voidaan vaikuttaa rakennuksen koko elinkaaren aikaisiin ympäristövaikutuksiin sekä kustannuksiin (Ympäristöministeriö 2020).

2.4 Hiilijalanjälki

Hiilijalanjäljellä tarkoitetaan rakennuksen koko elinkaaren päästöjä. Näitä päästöjä syntyy esimerkiksi lämmön- ja sähköntuotannosta sekä jätehuollosta. Hiilijalanjälkeä voidaan pienentää käyttämällä uusiutuvia energialähteitä. Paikallisella pientuotannolla, kuten aurinkoenergialla, vähennetään ostosähkön määrää ja siitä syntyviä kuluja. Uusiutuvan energian käyttö on osa tavoitetta nollaenergiarakentamisesta. Nollaenergiassa koko rakennuksen energiantarve katetaan paikan päällä tai lähellä tuotetusta uusiutuvasta energiasta. Rakentamisen sekä rakennusten käytönaikainen energiankulutus aiheuttaa yli kolmanneksen Suomen kasvihuonekaasupäästöistä. Rakentamisen energiatehokkuutta on pyritty lisäämään vaatimalla rakennuksilta esimerkiksi energiatodistuksia, ympäristölupia sekä kannustamalla vapaaehtoiseen energiasäästösopimukseen. Esimerkiksi ARA:lta tai kunnalta voi hakea avustuksia energiatalouden parantamiseen. (Ympäristöministeriö 2020). Tällainen hanke on esimerkiksi ”Hiilineutraali Helsinki 2035”. Hankkeella Helsingin kaupunki pyrkii siihen, että vuoden 2035 jälkeen Helsingissä tapahtuva toiminta ei lämmittäisi ilmastoa (Helsingin kaupunki 2021).

3 TUTKIMUSOSA

3.1 Työssä käytetty tutkimusmenetelmä

Tutkimus suoritettiin tapaustutkimuksena, jossa tutkittiin kohdekiinteistöjen energiankulutusta vertailemalla nykyisiä sekä simulointien tuloksena saatuja energiakulutuskilpailuja. Energiasimuloinneissa ennustettiin matemaattisesti energian kulutustiedot, jotka perustuvat tilastollisiin sääolosuhteisiin. Tässä työssä käytettiin tilastollisesti koottua mallivuotta 2012. Mallivuosi ei vastaa todellista vuoden 2012 säätä, vaan vuosiluku kertoo minä vuonna mallivuosi on koottu.

Kvantitatiivisena aineistona työssä käytettiin kiinteistöjen todellisia energiakulutuskilpailuja sekä käytettyjen energiamuotojen hintatietoja. Aineistojen perusteella pyrittiin vastaamaan kysymyksiin: Mitä ominaisuuksia rakennusautomaatiojärjestelmään kannattaa tehdä saneerausyhteydessä, mikä on toimenpiteisiin tarvittavan lisäinvestoinnin suuruus sekä takaisinmaksuaika ja saadaanko toimenpiteiden avulla vähennettyä myös hiilidioksidipäästöjä?

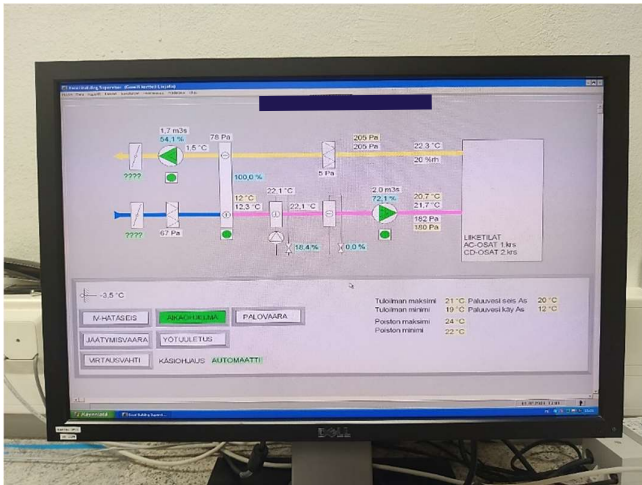
3.2 Lähtötilanteen kartoitus

Tarkat lähtötiedot ovat tärkeitä tuloksien oikeellisuutta mietittäessä. Tilaajalle kerättiin lista työhön tarvittavista lähtötiedoista (Liite 1). Lisäksi kohteen käyttöhenkilökuntaa haastateltiin sekä kartoitettiin kiinteistöjen eri tilojen käyttötarpeet. Kaikkia arkkitehtipohjia ja julkisivukuuvia ei tilaajalta ollut saatavilla, joten ikkunoiden ja muiden rakenteiden mallinnus jouduttiin osaksi tekemään valokuvien avulla sekä silmämääräisesti.

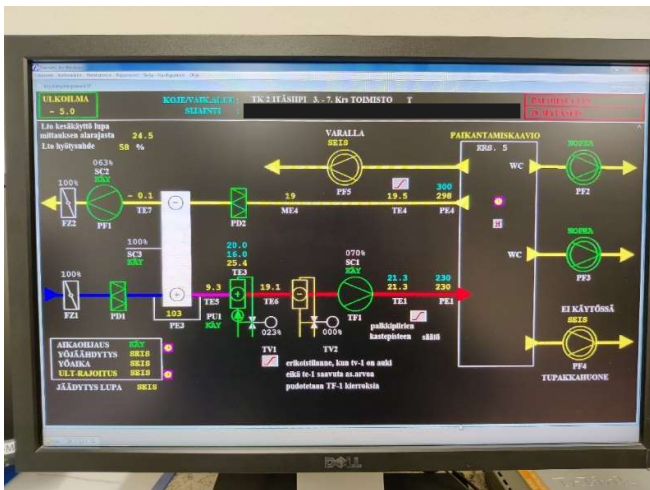
3.2.1 Valvomo

Valvomossa kartoitettiin nykyinen rakennusautomaatiojärjestelmä käymällä läpi kaikki prosessikuvat. Kiinteistöjen ohjaukset on jaettu kolmeen eri valvomojärjestelmään. Kiinteistöissä käytetyt järjestelmät ovat Stenfors Stematic, Honeywell XBS sekä Fidelix webVision. Esimerkkikuvat eri järjestelmien ulkonäöstä on esitettynä kuvissa 4 - 6. Valvomon sivuilta kerättiin järjestelmään liitettyjen laitteiden aikaohjelmat, asetusrivit sekä ohjaustavat. Kiinteistössä on myös laitteita, joita ei ole liitetty automaatiojärjestelmään. Lisäksi huoltoyhtiön

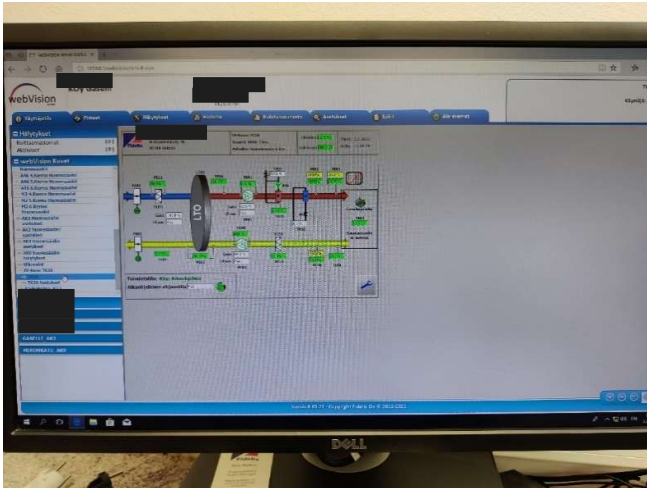
mukaan osa järjestelmään liitetyistä koneista on jo otettu pois käytöstä. Joidenkin poistettujen koneiden pisteet ovat edelleen näkyvillä valvomossa. Jokainen valvomon prosessikaavio valokuvattiin. Epäselvät kaaviot ja prosessit tarkennettiin kohteen huoltoyhtiöltä. Viimeisimpänä muutoksena järjestelmään on lisätty Fidelixin valvomojärjestelmässä olevat huonesäätimet sekä saunatilojen ilmanvaihtokoneen valvonta.



Kuva 4. Esimerkkikaavio Honeywell Excel5000



Kuva 5. Esimerkkikaavio Stematic



Kuva 6. Esimerkkikaavio Fidelix

3.2.2 Alakeskukset

Rakennusautomaatiojärjestelmän alakeskukset on sijoitettu pääosin kiinteistöjen ilmanvaihdon konehuoneisiin. Lisäksi alakeskuksia on lämmönjakuhuoneissa sekä yksi valvomossa. Varsinaista rakennusautomaation saneerausta ei vuosien saatossa ole kiinteistöissä tehty, vaan lisäyksiä järjestelmään on tehty rakentamalla uudet, eri laitevalmistajan alakeskukset, vanhojen viereen. Automaation alakeskusten sijainneista ei ole olemassa paikannuskaavioita. Paikannuskaavioissa esitetään alakeskusten tarkka lukumäärä sekä sijainnit, jolloin niiden paikantaminen esimerkiksi vikatilanteissa helpottuu. Valvomon prosessikaavioissa ei ole rakennusautomaation järjestelmäkaaviota, josta näkisi kaikki kohteen alakeskukset sekä niiden väliset tietoliikenneyhteydet. Kuvassa 7 on vanha alakeskus, jonka viereen on asennettu uusi alakeskus.



Kuva 7. Alakeskukset

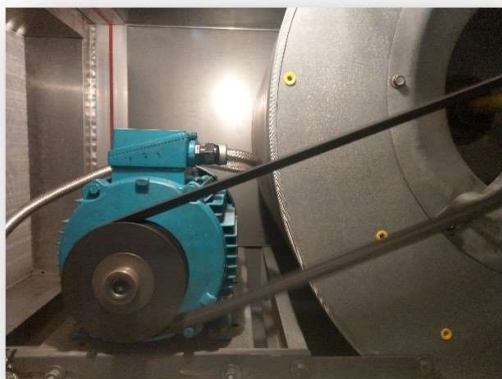
3.2.3 Ilmanvaihto

Kiinteistön jokaisen ilmanvaihtokoneen toiminta kartoitettiin ilmanvaihdon konehuoneissa. Koneiden ohjaustapa saatiin selville tutkimalla prosessikaaviota. Ilmanvaihtokoneiden ilmamäärät saatiin selville koneiden kyljessä olevasta laitekilvestä. Kilvessä on myös ilmanvaihtokoneen vaikutusalue sekä kanavan paine-ero, jolla mitoitettu ilmamäärä saavutetaan. Kuvassa 8 on esitetty esimerkki ilmanvaihtokoneen laitekilvestä.



Kuva 8. Ilmanvaihtokoneen laitekilpi

Puhaltimien moottorien sähkötehot saatiin koneita ohjaavien taajuusmuuttajien parametreista. Taajuusmuuttajilta saadut tiedot varmistettiin konekortteista. Konekorttien ja taajuusmuuttajille asetettujen arvojen välillä oli jonkin verran poikkeamia, näiden koneiden osalta laskelmissa päädyttiin käyttämään konekortteissa esitettyjä sähkötehoja. Kaikkia kohteen ilmanvaihtokoneita ohjataan taajuusmuuttajilla. Koneet ovat suora- tai hihnavetoisia. Kuvassa 9 on esitetty esimerkki hihnavetoisesta puhaltimesta. Osassa nykyisistä taajuusmuuttajista on käyttönotossa jäänyt asettelematta oikeat parametrit moottorin tietojen osalta. Taajuusmuuttaja muuttaa vaihtosähköverkon taajuutta, jonka avulla säädetään puhaltimen tai muun moottorin pyörimisnopeutta (Danfoss Oy 2021).



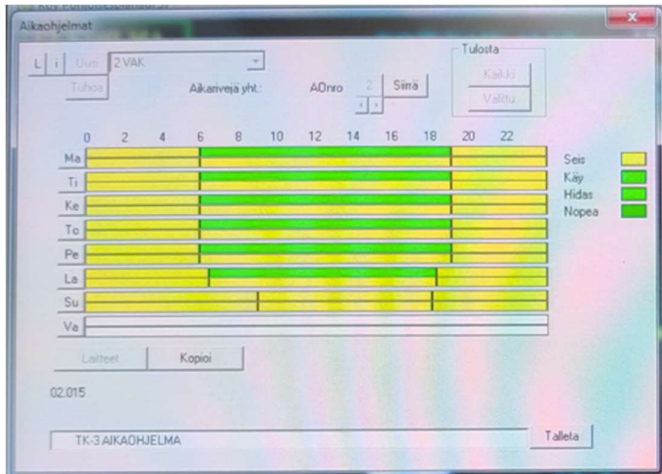
Kuva 9. Hihnavetoinen moottori

Taajuusmuuttaja muuttaa puhaltimen kierrosnopeutta rakennusautomaation säätöarvon mukaan. Säätöarvo taajuusmuuttajille vaihtelee nollan ja kymmenen voltin välillä. Säätöarvon ollessa nolla voltia, pyörii puhallin taajuusmuuttajalle asetetun minimikierrosnopeuden mukaan. Säätöarvon ollessa kymmenen voltia, pyörii puhallin taajuusmuuttajalle asetetulla maksimiarvolla. Kuvassa 10 on kiinteistöissä käytettyjä taajuusmuuttajia. Säätöarvoa muutetaan kanavassa olevan painemittauksen mukaan. Painemittaukselle on annettu käyntitehon mukainen asetusarvo ilmamäärämittausten perusteella. Kanavan painemittauksen laskeessa alle asetusarvon kasvatetaan säätöarvoa. Kanavapaineen noustessa yli asetusarvon toiminta on päinvastainen. Puhaltimia on jo uusittu ja hihnavetoisia puhaltimia vaihdettu suoravetoisiin.



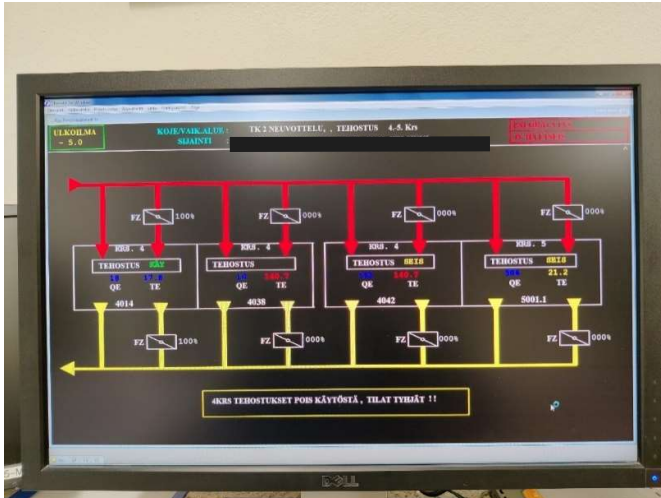
Kuva 10. Taajuusmuuttajat

Koneita ohjataan aika- ja tapahtumaohjelmilla. Käyttöaikojen ulkopuolella koneet on määritetty pysäytettäviksi. Tyypillisestä ilmanvaihtokoneen aikaohjelmasta on esimerkki kuvassa 11.



Kuva 11. Ilmanvaihtokoneen aikaohjelma

Kiinteistöissä joidenkin toimistokerroksien ilmanvaihtoa tehostetaan vyöhykepelleillä. Vyöhykepelleille on mekaanisesti asetettu minimi- ja tehostusasennot. Normaalisti vyöhykepelti on minimiasennossa. Kun vyöhykepelin vaikutusalueen hiilidioksidi- tai lämpötilamittaus ylittää asetellun asetusarvon, käynnistetään tehostus ohjaamalla automaatiojärjestelmästä vyöhykepelti tehostusasentoon. Kun vyöhykepelti avautuu, kanavan painehäviö pienenee, jolloin ilmanvaihtokoneiden kanavapaine laskee. Taajuusmuuttajien on nostettava ilmanvaihtokoneiden puhaltimien kierrosnopeutta, että haluttu kanavapaineen asetusarvo sekä ilmamäärät tiloissa saavutetaan. Nykyisin vyöhykepelleistä ei tule takaisinkytkentätietoa valvomoon. Käyttäjän mukaan kiinteistöissä on tästä syystä esiintynyt tilanteita, joissa ohjauksesta huolimatta on pelti jäänyt minimiasentoon. Tehostus ei näissä tilanteissa todellisuudessa ole toteutunut, vaikka valvomon näytöllä kaikki näyttäisi toimivan. Kuvassa 12 on vyöhykepeltien prosessikaavio.

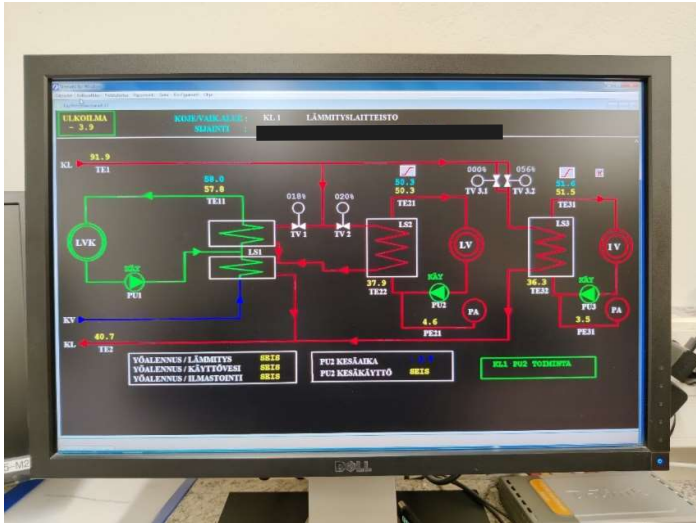


Kuva 12. Ilmanvaihtokoneen vyöhykepeltien prosessikaavio

Kanavistossa on palopeltejä, jotka sulkeutuvat, mikäli niiden lämpösulake sulaa palotilanteessa ja peltiin asennettu jousi sulkee pellin. Palopellit voivat sulkeutua myös vikaantumisen johdosta. Tällä hetkellä pelleiltä ei ole tilatietoja, joten palopelti voi olla kiinni pitkiäkin aikoja, ennen kuin se huomataan. Hallitsemattomasti sulkeutuneet palo- ja vyöhykepellit voivat pitkällä aikavälillä vaikuttaa tilojen painesuhteisiin.

3.2.4 Lämmönjako

Kiinteistöjen lämmönjako on toteutettu kahdesta erillisestä liittymästä. Yhdellä kiinteistöllä on oma ja kahden muun kiinteistön lämmönjako on jaettu toisesta liittymästä. Lämmitysverkoston menolämpötilojen asetusarvot muuttuvat ainoastaan ulkolämpötilan mukaan. Asetusarvon määrittämisessä ei hyödynnetä huonelämpötiloja tai muita tietoja kiinteistöstä. Kun tiloissa on ollut viileää, lämmönjaon asetusarvoja on nostettu käyttäjän toimesta. Tämän vuoksi nykyiset lämmönjakoverkostojen asetusarvot eivät vastaa alkuperäisiä mitoitusarvoja. Esimerkki lämmönjaon prosessikaaviosta on kuvassa 13.



Kuva 13. Lämmönjaon prosessikaavio

3.2.5 Jäähdytys

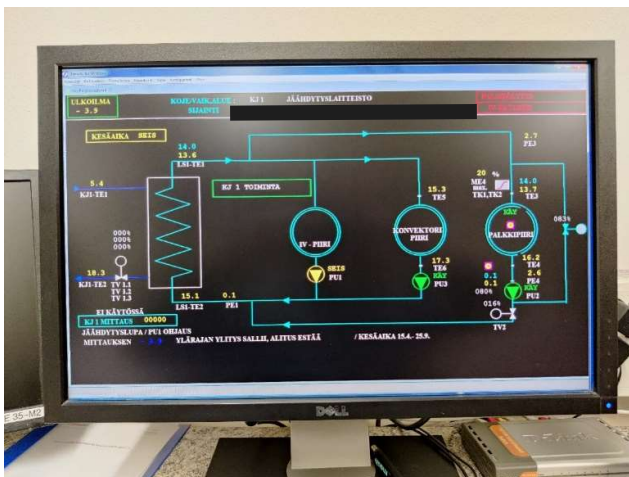
Kiinteistössä käytetään kaukojäähdytystä. Tilojen jäähdytys on toteutettu ilmastoinnin jäähdytyspalkkeilla, jäähdyttävillä puhallinkonvektoreilla sekä ilmastointikoneen jäähdytyspattereilla. Jäähdytyspalkit sekä puhallinkonvektorit sijoitetaan tilan kattoon. Puhallinkonekto-reista on saatavilla myös seinälle tai lattialle asennettavia malleja.

Jäähdytyspalkkeja on aktiivisia sekä passiivisia. Aktiivipalkeissa ilma kulkee huoneeseen palkin läpi, jolloin ilma jäähtyy. Passiivisien palkkien läpi ei ohjata ilmaa, vaan niiden jäähdytysteho perustuu säteilyyn.

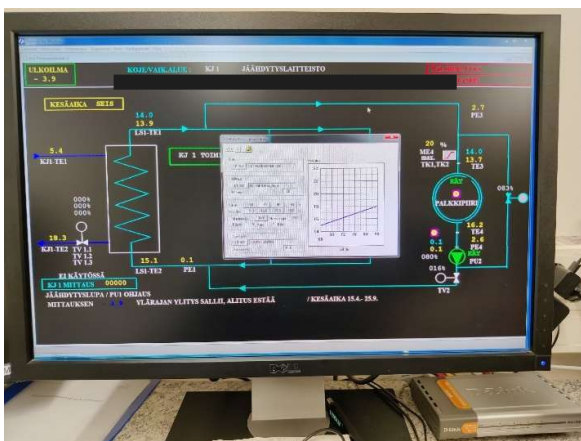
Puhallinkonvektorissa oma puhallinmoottori kierrättää huoneilmaa oman jäähdytyspatterinsa läpi takaisin huonetilaan. Ilmanvaihtokoneen jäähdytyspatterit on sijoitettu ilmanvaihdon kanavaan. Ne toimivat normaalin ilmanvaihdon patterin tapaan ja ovat sarjasäädössä lämmityspatterin ja lämmöntalteenottolaitteen kanssa.

Ilmanvaihtojärjestelmissä jäähdytyspatteria käytetään myös ilman kuivaamiseen. Jäähdytyspatterin pintalämpötila lasketaan alle tuloilman kastepisteen, jolloin ylimääräinen tuloilman kosteus tiivistyy patterin pintaan. Kuivatuksen jälkeen lämpötila nostetaan takaisin tuloilman asetusravoon jälkilämmityspatterilla. Jäähdytyksen käyttöajat on sidottu kalenteriohjelmaan. Verkostojen menolämpötilan asetusravoa muutetaan ulkolämpötilan mukaan.

Jäähdytyspalkkiverkostossa asetusarvoa kuitenkin poikkeutetaan huoneiden olosuhdemittauksien perusteella lasketun kastepistelaskennan perusteella. Kastepiste on lämpötila, jossa ilman sisältämä vesihöyry alkaa tiivistymään (Ilmatieteen laitos 2021). Kastepistelaskennalla estetään putkien pintalämpötilan laskemasta alle huoneilman kastepisteen. Mikäli putken pinnan lämpötila on alle huoneilman kastepisteen, huoneilman kosteus tiivistyy jäähdytysputken pintaan ja tippuu pisaroina huonetilaan tai valuu putken pintaa pitkin rakenteisiin. Jäähdytyksen prosessikaavion esimerkkikuva on esitetty kuvassa 14. Kuvassa 15 on jäähdytyspiirin menoveden asetusarvoikkunan esimerkkikaavio.



Kuva 14. Kaukojäähdytyksen prosessikaavio



Kuva 15. Palkkijäähdytyksen asetusarvon käyrän prosessikaavio

3.2.6 Energian kierrätys

Lämmöntalteenotto on toteutettu ilmanvaihtokoneiden poistoilmasta koneisiin asennettujen lämmöntalteenottolaitteiden avulla. Lämmöntalteenottolaitteisto on toteutettu sekä pyörivällä, levylämmönsiirtimellä ja nestekiertoisena. Kohteessa talteenotto on toteutettu kaikissa ilmanvaihtokoneissa, missä se on ollut mahdollista. Lämmöntalteenottoon on lisätty ohjelmallinen hyötysuhdelaskenta, josta generoidaan hälytys, mikäli käynnin aikana hyötysuhdelaskennan arvo laskee alle asetellun hälytysrajan. Yöjäähdytys on ohjelmoitu valtaosalle iv-koneista. Yöjäähdytyksen tarkempi toiminta on kerrottu jäljempänä suositeltavissa muutostoimenpiteissä.

3.2.7 Sähkö ja valaistus

Sisävalaistuksia ohjataan paikallisilla painikkeilla. Ulkovalaistuksia ohjataan aikaohjelman lisäksi ulkovaloisuusmittauksella. Auringon laskettua ulkovaloisuusmittauksen arvo laskee. Kun arvo on alle käyttäjän asetteleman asetusarvon, ohjaa järjestelmä ulkovalot päälle. Kun aurinko nousee ja valoisuus kasvaa yli käynnistysrajan, toiminta on päinvastainen.

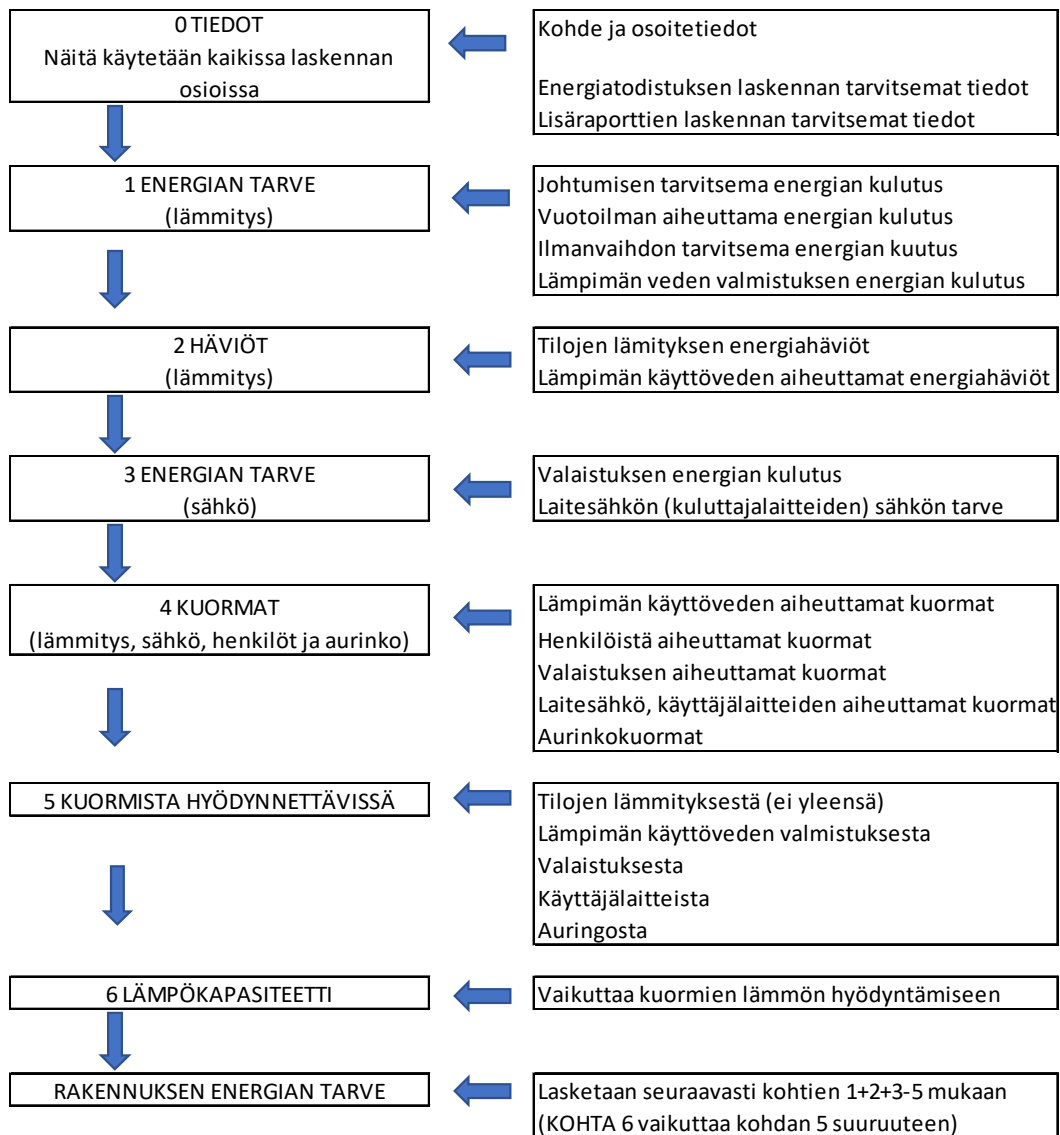
3.3 Energialaskelmat ja simuloinnit

Energian parannuslaskelmien lähtökohtana oli nykyiset rakennuksessa toteutuneet energiakulutuksen tiedot. Todellisia kulutustietoja on hyvä tarkastella laskennallista sekä toteutunutta kulutusta vertailtaessa. Energiakulutuskalkulat ovat monivaiheinen prosessi, joka tehdään laskentaohjelmalla. Laskentaohjelmaan syötettävien lähtötietojen on oltava oikeita tarkkojen laskentatulosten saamiseksi (Myyryläinen 2019, 37). Saatujen tietojen perusteella rakennuksesta laadittiin 3D-energiamalli. Energiamalliin syötetään rakennuksen tiedot, kuten käytetyt rakenne-elementit, ikkunat sekä kaikki lämpöä varaavat rakenteet.

Energiasimulointien lähtökohtana on energiatehokkuuden parantaminen ilman, että sisäilmaolosuhteita heikennetään. Siksi myös olosuhteita heikentävät toimenpiteet simuloitiin. Tuloksia tarkastellessa tulee huomioida, että jotkin ehdotetuista toimenpiteistä voivat nostaa energiakulutusta, mutta parantaa sisäilmaolosuhteita. Ehdotetut rakennuksen säästötoimenpiteet simuloitiin ensin erikseen ja tulosten perusteella arvioitiin, mitkä toimenpiteet ovat

toteutuskelpoisia. Lopuksi kaikki toteutuskelpoisimmat toimenpiteet simuloitiin yhdessä laskelmassa. Energiatarpeen laskentataulukko on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Energiatarpeen laskentataulukko (Myyryläinen 2019, 39).



Taulukko esittää energiantarpeen laskentaprosessin vaihan, vuotoilman, ilmanvaihdon, käyttöveden ja häviöiden osalta sekä kuormien ja rakennuksen massiivisuuden vaikutuksen rakennuksen energian

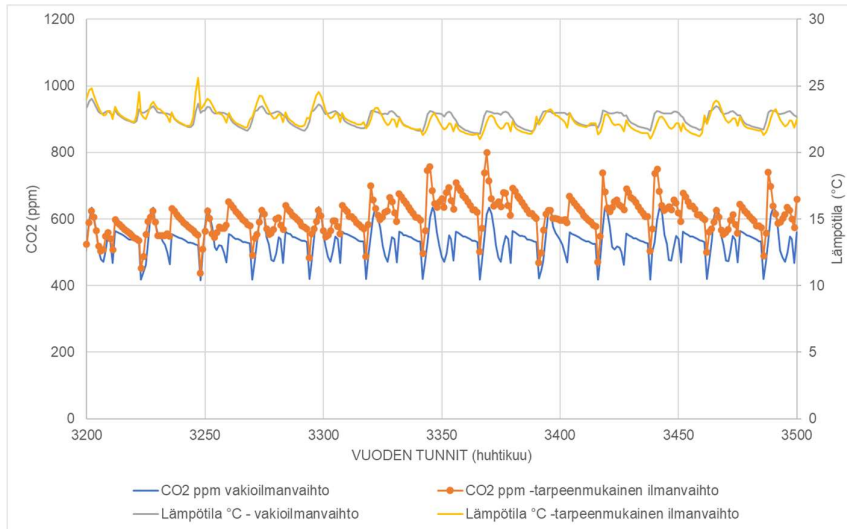
3.3.1 Simuloinnissa käytetyt ohjelmat

Kohteiden simuloinnit toteutettiin Riuska- sekä IDA ICE -ohjelmilla. Riuska-ohjelma on dynaaminen simulaatiotyökalu, jolla lasketaan rakennuksen energian vuosikulutusta. Dynaamisella ohjelmalla pystytään laskemaan kulutukset tuntitasolla. Energiamallin avulla havainnollistetaan myös viereisistä tiloista siirtyvä energia. (Morén 2021.) Riuska-ohjelman energiamalli on esitettyä kuvassa 16.



Kuva 16. Energiamalli

Olosuhteita heikentävät toimenpiteet simuloitiin IDA ICEn-ohjelmalla. IDA ICE (Indoor Climate and Energy) on dynaaminen simulointiohjelma, jolla voidaan mallintaa koko rakennuksen järjestelmät sekä säätölaitteet (EQUA Simulation AB 2020). Sisäilmaolosuhdesimuloinnissa tutkitaan tilan lämpötilan sekä hiilidioksidipitoisuuden nousua vuoden jokaisena tunnina (Morén 2021). Tuloksissa nähdään olosuhteiden muutos vakioilmanvaihdoilla ja ehdotetulla tarpeenmukaisella ohjauksella. Sisäolosuhdesimuloinnin tuloksia on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Sisäilmaolosuhteet

Kaikki ehdotetut toimenpiteet syötettiin MOBO-ohjelmaan. MOBO on VTT:n ja Aalto-yliopiston yhdessä kehittänyt monitavoiteoptimointiohjelma. Monitavoiteohjelmassa optimoidaan toisiensa kanssa ristiriidassa olevia muuttujia, kuten investointikustannukset ja energian kulutus. Ohjelma etsii optimointilogaritmillä parhaat vaihtoehdot muuttujista. MOBO-ohjelmaa käytetään yhdessä IDA ICE -ohjelman kanssa. (Heikkilä, [viitattu 20.12.2021].)

3.4 Laskelmien tulokset

Neljän kannattavimman toimenpiteen investointien kustannusarvioksi tuli 50 300 €. Kannattavuuslaskelmien tuloksia on esitetty kuvassa 18. Investointikustannukseen ei ole sisällytetty itse rakennusautomaation saneerauksen kustannuksia. Rahallisesti ensimmäisenä vuotena säästöä tulee 26 500 €. Laskennallinen takaisinmaksuaika on 2 vuotta. Laskelmien perusteella investoinnin kannattavuus on erinomainen. Kumulatiivinen kassavista sijoitukselle on esitetty kuvassa 19. Simulointien sekä laskelmien tulokset ovat tilaajan omaisuutta. Laskelmien tuloksia on esitelty yksityiskohtaisemmin sekä kiinteistökohtaisesti liitteessä 2.

INVESTOINNIN KANNATTAVUUS

Energiahankkeen investointi ALV 0 %

Suora takaisinmaksuaika

Nettonykarvoistettu takaisinmaksuaika

Investoinnin sisäinen korkokanta (IRR)

Sijoitetun pääoman tuotto (ROI)

Investoinnin nettonykarvo (NPV) (5,0%)

Investoinnin nettonykarvoistettu kassavirta (tuotto)

GASELLI-KORTTELI
YHT.

50 300 €

2,0 vuotta

2,0 vuotta

97,6 %

129,2 %

1 574 100 €

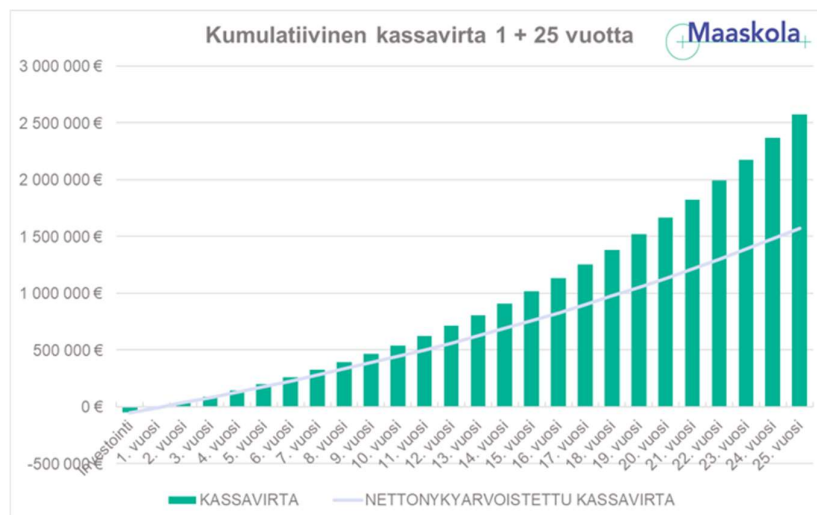
1 574 100 € / 25 vuotta

| | |
|----------|--------------------|
| X | ERINOMAINEN |
| | HYVÄ |
| | TYYYDYTTÄVÄ |
| | VÄLTTÄVÄ |
| | HEIKKO |

Sijoitetun pääoman tuotto (ROI): Erinomainen yli 15%;
Hyvä 10-15%; Tyydyttävä 6-10%; Välttävä 3-6%;
Heikko alle 3%

inflaatio 1,8 %, investoinnin tuottovaatimus 5 %, reaalkorko 3,14 %, huoltokustannukset €/vuosi, jäännösarvo €, lainoitettava osuus 0 %

Kuva 18. Investoinnin kannattavuus



Kuva 19. Kumulatiivinen kassavirta

Kaukolämmössä säästöä tulee vuosittain n. 574 MWh sekä kaukojäähdytyksessä säästöä tulee arviolta 160 MWh. Sähkössä säästetään laskelmien mukaan 45 MWh. Energiasäästöä yhteensä saadaan 7,6 %. Hiilidioksidipäästöjä toimenpiteet vähentävät 108 936 kg / vuosi.

Sisäilmaolosuhteita tarkasteltiin kahdessa suurimmassa liiketilassa, joissa ilmanvaihto ehdotetaan toteutettavaksi tarpeenmukaisena. Simulaation tulosten perusteella voidaan todeta, että CO²-pitoisuuden nousu tiloissa on maltillista tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla.

4 TULOKSET

4.1 Ehdotetut toimenpiteet

Järjestelmään ehdotettiin toimenpiteitä energiatehokkuuden parantamiseen. Ehdotettuja ratkaisuja tarkastellaan energiasimulointien avulla. Lopputuloksia vertaillaan lähtötilanteen energiakulutuksiin sekä hiilidioksidipäästöihin. Ehdotettujen muutoksien kustannusarvioiden perusteella tehdään investointien kannattavuuslaskelmat. Työn tuloksien tarkoituksena on toimia päätöksenteon tukena talotekniikan korjausta sekä energiatehokkuuden parantamisen jatkotoimia pohdittaessa. Ehdotetut toimenpiteet ovat yleisesti rakennusautomaatiossa käytettyjä toimenpiteitä. Kun toimenpiteitä ehdotetaan energiatehokkuuden näkökulmasta, ne simuloidaan. Simulointien tulosten perusteella tutkitaan mitkä toimenpiteet ovat taloudellisesti kannattavia. Kannattavimmat toimenpiteet parantavat energiatehokkuutta sekä ympäristökuormaa, ilman liian suuria investointikustannuksia.

4.1.1 Aikaohjelmat

Aikaohjelmat käydään läpi tilojen käyttäjien kanssa. Saatujen käyttötietojen perusteella voidaan aikaohjelmat asetella tilojen käyttöä vastaaviksi. Käyttöaikojen ulkopuolella ilmanvaihdon tehoa lasketaan energian säästämiseksi. Tilojen käyttäjät veloitetaan aina ilmoittamaan tilojen käytön muutoksesta. Aina vuokralaisen tai tilojen käyttäjän vaihtuessa käyttöajat tarkastetaan uudelleen vastaamaan tilojen todellista käyttöä.

4.1.2 Ehdotetut rakennusautomaatiojärjestelmän muutokset

Kaikki rakennusautomaatio keskitetään yhteen järjestelmään. Kun kaikki talotekniset prosessit on keskitetty samaan järjestelmään, on niiden käyttö selkeämpää sekä tehokkaampaa. Lisäksi prosessien yhteensovitus sekä käyttötilannekohtaiset riippuvuudet ovat helpommin toteutettavissa. Rakennusautomaatiojärjestelmän saneerauksen yhteydessä koestetaan kaikki kenttälaitteet. Koestamalla varmistetaan, että laitteet seuraavat järjestelmän ohjauksia. Samalla varmistetaan, ettei kenttälaitteita ole kytketty ristiin ja ohjattava laiteositepiste vastaa kentällä oikeaa laitetta.

Älykkäämmässä lämmitysverkostojen ohjauksessa hyödynnetään sääennustuksia sekä tilojen lämpötilamittauksia. Näiden perusteella poikkeutetaan mm. lämmitysverkostojen menoveden asetusarvoa. Huonemittauksien käyttö lämmitysverkoston säädössä hyödyntää jo tiloissa olevien laitteiden tuottamaa lämpöä, ihmisten tuottamaa lämpöä sekä rakenteisiin varastoitunutta energiaa. Näin verkostoihin ei ajeta tarpeettomasti liian lämmintä vettä. Olosuhteet tiloissa paranevat, kun sisälämpötilaa seurataan aktiivisesti. Aktiivisella seurannalla muutoksiin voidaan reagoida ajoissa sekä ennakoivasti, jo ennen kuin tilojen käyttäjät havaitsevat muutosta. Rakennuksen pohjois- sekä eteläosille asetetaan lämmitysverkoston nousulinjoihin omat vyöhykesäätöventtiilit. Rakennusosilla voi olla hyvinkin eri olosuhteet, kun aurinko paistaa. Rakennusosakohtainen lämmitysverkoston säätö säätää rakennusosalle menevää lämmitysverkoston menolämpötilaa huonelämpötilamittauksien perusteella.

Erillispoistoille ohjelmoidaan yöaikainen käyntitehon puolitus. Ilmamäärien tasapainon varmistaminen on tässä avainasemassa siten, että sisäilmaolosuhteita ei heikennetä ilmamäärien tasapainottomuudella. Tasapainosta voidaan huolehtia mm. lukitsemalla ohjelmallisesti poistoilmakoneiden käyntitieto korvausilmaa tuottavan ilmanvaihtokoneen ohjaukseen. Tällöin poistoilmakoneen ohjaus seuraa tuloilmakoneen tilatietoa. Tässä lähtökohtana on, että kaikki kiinteistön ilmanvaihtolaitteet ja erillispoistot on liitetty osaksi rakennusautomaatiojärjestelmää.

Rakennuksen jäähdytyksessä hyödynnetään jo kesäaikaan yöllä viileämpää ulkoilmaa yötuuletuksella. Yötuuletuksessa viileämpää ulkoilmaa puhalletaan tiloihin, kunnes sisälämpötilassa on saavutettu haluttu mukavuusalue. Yötuuletuksen aikana ilmanvaihtokoneen omat lämmitys- ja jäähdytyssäädöt sekä lämmöntalteenotto on suljettu. Yöjäähdytys säästää jäähdytykseen käytettävää energiaa, mutta käyttää enemmän puhallinenergiaa (sähköä). Yötuuletuksessa on otettava huomioon myös ulkoilman absoluuttinen kosteus eli ns. vesisisältö. Vesisisällön ollessa yli aseteltavan raja-arvon, ei kosteaa ulkoilmaa kannata puhaltaa sisätiloihin. Yötuuletuksella suositellaan ohjelmoitavaksi kaikille iv-koneille.

Liiketilojen ilmanvaihtokoneille ohjelmoidaan tarpeenmukaisuusohjaus poistoilmakanavaan asennettavat yhdistetyn lämpötila- ja hiilidioksidianturin mittaustuloksen perusteella. Tarpeenmukainen ohjaus tarkoittaa, että koneita ohjataan niiden palvelualueiden käytön mu-

kaisesti: Kun tilat ovat tyhjänä, ei ole syytä käyttää ilmanvaihtokoneita täydellä teholla. Palvelualue on ilmanvaihtokoneen tai jonkin muun taloteknisen prosessin vaikutusalue. Konetta ohjataan mitoitettulla minimi-ilmamäärällä. Kun tiloissa on enemmän käyttäjiä, tilojen poistoilmakanavan lämpötila- sekä hiilidioksidimittauksien arvo nousee ja tilojen ilmanvaihto tehostetaan mitoitusilmamäärälle. Molemmille kanavamittauksille asetetaan tehostuksen asetusarvo, jonka ylityksestä tehostus käynnistetään. Tehostukselle asetetaan myös hystereesi sekä ajallinen jälkikäynti. Hystereesi on mittausarvolle asetettava numeraalinen eroalue. Hystereesi kertoo vaadittavan erotuksen mittausarvon ja asetusarvon välillä. Ohjaus asetellaan tottelemaan aina mittausuuretta, joka antaa hetkellisesti suurempaa tehostuksen pyyntiarvoa. Mittauksiin perustuva tarpeenmukaisuus on tarkempi kuin aikaohjelmaan sidottu tarpeenmukaisuus, sillä aikaohjelma voi ohjata koneen mitoitus-teholle myös silloin kun tilat ovat tyhjänä.

Toimistotilojen huonesäätimiin asetellaan lämpötilaohjaukseen läsnäolo- tai aikaohjelmaohjaus. Käyttöaikojen ulkopuolella huonelämpötilan annetaan vaihdella laajennetulla mukavuusalueella. Kun tila on käytössä, kavennetaan lämpötilan vapaa liikkuminen suppeammalle mukavuusalueelle. Mukavuusalueen rajojen sisään jää ns. nollaenergia-alue, jolla huonelämpötilan annetaan vapaasti liikkua ilman että sen hallitsemiseen käytetään lämmitystä tai jäähdytystä. Laajennetulla mukavuusalueella nollaenergia-alue on laajempi.

Palopellit liitetään osaksi valvomojärjestelmää. Tällöin tiedetään, mikäli jokin palopelti on sulkeutunut ja estää suunnitellun ilmanvaihdon tiloissa. Palopeltejä voidaan uusina kokonaisuudessaan tai asentamalla erillinen mikrokytkin, joka sulkee potentiaalivapaan kärkitiedon, mikäli pelti sulkeutuu. Myös vyöhykpelteihin lisätään takaisinkytkentätieto. Tällöin saadaan ohjelmoitua ristiriitahälytys, joka kertoo, mikäli pellin asentotieto poikkeaa automaatiojärjestelmän antamasta ohjaustiedosta. Ristiriitahälytys ilmaisee myös sen, mikäli pelti on jumittunut tehostusasentoon.

Valaistuksen ohjauksessa hyödynnetään liiketunnistimia paikoissa, joissa ei oleskella jatkuvasti. Tällaisia paikkoja ovat esimerkiksi rappukäytävät sekä sosiaalitalat. Tiloissa, joissa oleskellaan, valaistuksen ohjauksessa hyödynnetään tilaan tulevaa päivänvaloa. Valaisimiin on saatavilla integroituna valoisuuden tunnistin, joka automaattisesti himmentää ja tehostaa valaistusta tarpeen mukaan.

Ilmanvaihtokoneille ohjelmoidaan jäähdytyksen talteenotto. Kun ulkoilman lämpötila nousee yli huoneilman lämpötilan, ohjataan lämmöntalteenotto täydelle teholle. Jäähdytyksen talteenotossa hyödynnetään viileämpää sisäilmaa ulkoilman jäähdytyksessä.

Järjestelmään pidetään käyttöhenkilökunnalle perusteellinen käytönopastus. Oikealla ja tehokkaalla valvomon käytöllä on tärkeä rooli rakennuksen energiatehokkuudessa ja toimivuudessa (Liedes 2008, 9). Kiinteistön vakituiselle huoltohenkilölle on perehdytettävä sijainen, joka toimii kiinteistön huollossa varsinaisen huoltohenkilön ollessa eksynyt. Näin oikean käytön jatkuvuus varmistetaan.

Kaikki talotekniset prosessit liitetään kulutuksien seurantaan eli trendeihin. Näiden aktiivinen seuranta sekä poikkeuksien havaitsemisella voidaan kiinteistön prosessien muutoksiin puuttua hyvissä ajoin. Tällöin poikkeukset tai pysyvät muutokset eivät ole ehtineet aiheuttaa vielä suuria energiatehokkuuden muutoksia. Lisäksi hyvillä poikkeuksien syiden selvityksillä voidaan jo ehkäistä mahdollisia tulevia muutoksia. Kaikki käyttäjän itse tekemät muutokset (esim. asetusravot, aikaohjelmat) kirjataan valvomopäiväkirjaan. Käsikäytölle asetetuista pisteistä valvomossa asetetaan valvomonäytölle hälytys. Merkinnoilla pyritään estämään väliaikaisten ratkaisujen päätyminen pysyviksi. Käsikäytölle asetetut pisteet eivät välitä järjestelmän omista ohjauksista vaan tottelevat vain käsin aseteltua arvoa. Pahimmassa tapauksessa käsin päälle ohjattu ilmanvaihtokone ei pysähdy varotoimenpiteen, kuten jäätymissuojan laukeamisesta, vaan jatkaa toimintaa täydellä teholla. Tämä voi aiheuttaa vesiputkien halkeamisen myötä vesivahingon.

Rakennusautomaatiojärjestelmään liitettyjen laitteiden nimeäminen eli positiointi yhtenäistetään. Näin voidaan jo pisteen position perusteella nähdä, minkä järjestelmän osan mittauksesta on kysymys. Positiointi auttaa myös laitteiden paikantamista kiinteistössä. Positiointit tulee myös esittää kaikissa prosessikaavioissa.

4.1.3 Muita suositeltuja toimenpiteitä

Kiinteistössä suoritetaan ilma- sekä vesimäärämittaukset. Ilmamäärämittaukset suoritetaan jokaiselle eri käyttötilanteelle. Ilmamäärämittausten mukaiset kanavapaineen asetusravot kirjoitetaan ylös ja laitetaan näkyviin valvomossa. Asetusravojen muuttaminen valvomossa

estetään käyttöjätunnuksiin liitettyjen oikeuksien avulla. Kanavapaineen ja sen asetusarvon poikkeamasta ohjelmoidaan raja-arvohälytykset. Kiinteistössä on myös käytöstä poistettuja erillispoistoja. Ilmamäärät on syytä tasapainottaa poistettujen koneiden osalta ja tarvittaessa tulpata käytöstä poistettuja kanavointeja. Puhaltimien moottorit tulee tarkastaa, että ne vastaavat nykyisiä sähkömoottoreiden ekologista suunnittelua koskevia asetuksia.

Taajuusmuuttajien parametrien tarkastus voi parhaassa tapauksessa pidentää laitteen käyttöikä sekä auttaa saamaan taajuusmuuttajasta kaiken mahdollisen hyödyn. Oikein asetellun parametrin esimerkiksi suojaavat moottoria vikaantumiselta ja väärin asetellut parametrit voivat pilata hyvän suunnittelun tuomat hyödyt (ST 98.17 2018). Mikäli parametri on aseteltu väärin taajuusmuuttajalle, eivät taajuusmuuttajan omat energialaskurit pidä paikkaansa. Ohjattavan moottorin tiedot tulee ottaa aina moottorin kilpitiedoista. Vanhat hihnavetoiset ilmanvaihtokoneiden moottorit vaihdetaan suoravetoisiksi ja taajuusohjatuiksi. Taajuusohjauksella tarkoitetaan joko taajuusmuuttajan tai EC-nopeussäätimen avulla ohjattavia puhaltimia. Suoravetoiset puhaltimet ovat hyötysuhteeltaan paremmat. Parempi hyötysuhde tarkoittaa sitä, että vähemmällä sähköllä saadaan enemmän tehoa ilmavirran liikuttamiseen. Lisäksi taajuusohjatut puhaltimet vähentävät puhaltimien moottoreiden virrankulutusta.

Tiloissa, joissa on käytössä tilakohtaiset huonesäätimet, voi käyttäjä halutessaan poikkeuttaa huonelämpötilan asetusarvoa. Huonesäätimien huonelämpötilan poikkeutuksiin ohjelmoidaan poikkeutuksen vuorokautinen nollaus.

Pdf-muotoisista arkkitehtikuvista sekä talotekniikan tasokuvista suositellaan koostettavan ajantasapiirustukset .dwg-tiedostoina. Tulevaisuuden muutossuunnittelussa näiden koontikuvien olemassaolo helpottaa merkittävästi kokonaisuuden hahmottamista sekä helpottaa suunnittelijoiden työtä.

4.2 Toimenpiteiden vertailujen tulokset

Kaikista kannattavammiksi toimenpiteiksi kaikkien kiinteistöjen kokonaisuutta ajatellen nousivat laskelmien mukaan älykkäämpi lämmityksen ohjauksen säätö, erillispoistojen yöaikainen käyntitehon puolitus, tilojen yötuuletus sekä liiketilojen tarpeenmukainen ilmanvaihdon ohjaus. Suurin säästöpotentiaali toimenpiteissä on tarpeenmukaisessa ilmanvaihdossa.

Pienet automaatiojärjestelmään tehdyt toimenpiteet eivät itsessään ole kannattavia, mutta kun ne tehdään koko järjestelmän saneerauksen yhteydessä, voidaan hyötyä pitää kuitenkin kohtuullisena.

Valaistuksen muuttaminen sekä valaisimien uusinta eivät ole taloudellisesti kannattavia toimenpiteitä. Kiinteistön ilmanvaihtokanavat toimistokerroksissa eivät järjestelmänä mahdollista taloudellisesti kannattavaa vyöhykepeltien asennusta. Ilmanvaihto on tuotu kerroksiin monta eri runkokanavaa pitkin, joten vyöhykepeltejä tulisi asentaa monia jokaiseen kerrokseen. Näissä tapauksissa investointien takaisinmaksuajat karkaisivat tuplasti yli laitteiden teknisen käyttöiän

5 YHTEENVETO

Työstä saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että kohdekiinteistöjen automaatiojärjestelmät ovat nykyisellään jo toteutettu energiatehokkaasti. Tästä kertoo simulointien ja laskelmien tuloksissa se, että itse rakennusautomaatiojärjestelmään ei suuria muutoksia ole tarpeellista tehdä. Säästöjä kiinteistöissä saadaan tehokkaammalla kiinteistöjen käytöllä sekä selkeämmällä järjestelmän rakenteella. Ehdotetuilla muutoksilla on laskelmien perusteella lyhyet takaisinmaksuajat, joten laskennallisesti ne ovat erinomaisia investointeja. Lisäksi ehdotetuilla muutoksilla saadaan pienennettyä kiinteistöjen hiilidioksidipäästöjä yli 100000 kg vuosittain, nykyisiin päästölukemiin vertailtaessa.

Laitteistojen sekä ohjelmistojen päivityksillä varmistetaan käyttövarmuus sekä varaosien saatavuus. Nykyiset järjestelmät ovat jo yli teknisen käyttöikänsä eikä vanhoihin järjestelmiin ei ole enää saatavilla varaosia.

Työ oli mielenkiintoinen ja tulokset tekijälle yllättäviä. Monet alkutietojen perusteella ajatellut muutostyöt rakennusautomaatiojärjestelmään eivät tuoneetkaan laskentojen perusteella odotettuja säästöjä. Ilmanvaihdon sekä lämmityksen tarpeenmukainen ohjaus on investointikustannuksiltaan pieniä investointeja, mutta tuovat nopeita säästöjä. Tässä työssä tehdyt laskelmat säästävät myös mahdollisilta turhilta kustannuksilta, mikäli muutostöitä olisi lähdetty tekemään ilman energiatehokkuuden laskelmia. Laskelmia voidaan käyttää hyväksi myös haettaessa avustuksia tuleviin energiatehokkuuden saneerauksiin.

Rakennusautomaatiosaneerauksen yhteydessä päivitettävät talotekniset suunnitelmat auttavat kiinteistön ylläpidossa sekä tulevissa muutoksissa.

Insinööritoimisto Leo Maaskolalle työ toimii hyvänä referenssinä markkinoitaessa kokonaisvaltaisia talotekniikan palveluita. Työ osoittaa, että insinööritoimisto ei ole vain monta erillisiä osastoa vaan toimii yhteistyöllä osastojen välillä, jolloin saadaan parhaat ja kokonaisvaltaisimmat tulokset tilaajalle.

LÄHTEET

- Aatsalo, J. 2019. Yllättävällä ratkaisulla roima säästövaikutus rakennuksen energiatehokkuuteen. [Verkkolehtiartikkeli]. Rakennuslehti. [Viitattu 26.2.2021]. Saatavana: <https://www.rakennuslehti.fi/2019/06/yllattavalla-ratkaisulla-roima-saastovaikutus-rakennuksen-energiatehokkuuteen/>. Vaatii käyttöoikeuden.
- BACnet International. 2020. Connecting the Dots in Building Automation. [Verkkosivusto]. Marietta, GA: BACnet International. [Viitattu 12.2.2021]. Saatavana: https://www.bacnetinternational.org/page/about_bacnet_intl
- Caverion Suomi. 2021. Kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa. [Podcast]. Caverion Suomi, 13.1.2021. [Viitattu 10.2.2021]. Saatavana: <https://open.spotify.com/episode/4k962XXFZxgf3rRwc5umZ3?si=Bn4bLaTUT7OgQRdL0supxA>
- Ciucci M. & Keravec. A. 2021. Energiatehokkuus. [Verkkojulkaisu]. Helsinki: Euroopan parlamentti. [Viitattu 17.11.2021]. Saatavana: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/fi/sheet/69/energiatehokkuus>
- Danfoss Oy. 2021. Mikä on taajuusmuuttaja? [Verkkojulkaisu]. Helsinki: Danfoss Oy. [Viitattu 9.2.2021]. Saatavana: <https://www.danfoss.com/fi-fi/about-danfoss/our-business/drives/what-is-a-variable-frequency-drive/>
- EQUA Simulation AB. 2020. IDA Indoor Climate and Energy. [Verkkojulkaisu]. Solna: EQUA Simulation AB . [Viitattu 29.11.2021]. Saatavana: <https://www.equa.se/fi/ida-ice#>
- Fidelix Oy. 2021. Turvallista pilviteknologiaa rakennusautomaation hallintaan. [Verkkosivusto]. Vantaa: Fidelix Oy. [Viitattu 4.6.2021]. Saatavana: <https://www.fidelix.fi/fidelix-pilvivalvomo/>
- Heikkilä, A. Ei päiväystä. Monitavoiteoptimointi. [Verkkojulkaisu]. Helsinki: Helsingin kaupunki. [Viitattu 20.12.2021]. Saatavana: https://figbc.fi/wp-content/uploads/sites/4/2020/11/IVTY_monitavoiteoptimointi.pdf
- Heikkinen, L. 2018. Rakennusautomaation hyödyntäminen kiinteistöjen käytössä. [Verkkojulkaisu]. Helsinki: Helsingin Insinöörit HI ry. [Viitattu 2.11.2021]. Saatavana: <https://www.slideshare.net/SointuHgstrm/rakennusautomaation-hyodyntminen-kiinteistjen-kytss>
- Helsingin kaupunki. 2021 Helsinki hiilineutraaliksi. [Verkkojulkaisu]. Helsinki: Helsingin kaupunki. [Viitattu 11.2.2021]. Saatavana: <https://www.myhelsinki.fi/fi/valitse-vastuullisemmin/helsinki-hiilineutraaliksi>

- Ilmatieteen laitos. 2021. Mitä tarkoittaa kastepiste?. [Verkkosivusto]. Helsinki: Ilmatieteen laitos. [Viitattu 11.6.2021]. Saatavana: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/lampotila-ja-kosteus#18>
- Insinööritoimisto Leo Maaskola Oy. 2021. [Verkkosivusto]. Helsinki: Insinööritoimisto Leo Maaskola Oy. [Viitattu 10.2.2021]. Saatavana: <https://maaskola.fi/>
- Liedes, R. 2008. Kiinteistöjen valvomojärjestelmät. Espoo: Sähkötieto ry.
- Morén, O. 1.3.2021. Energiasuunnittelun kuvaus. [Henkilökohtainen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Mikko Hakanen. [Viitattu 1.3.2021].
- Motiva Oy. 2018a. Lämmityksen säätökäyrä ja lämpimän käyttöveden oikea lämpötila. [Verkkosivusto]. Helsinki: Motiva Oy. [Viitattu 7.9.2021]. Saatavana: https://www.motiva.fi/koti_ ja_ asuminen/taloyhtiot/energiaeksperttitoiminta/lahtotilanteeseen_tutustumisen/lammityksen_saatokayra_ ja_ lampiman_kayttoveden_oikea_lampotila
- Motiva Oy. 2018b. Mikä on energiatodistus?. [Verkkosivusto]. Helsinki: Motiva Oy. [Viitattu 17.11.2021]. Saatavana: https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiatodistusneuvonta/mika_on_energiatodistus
- Myyryläinen, L. 2019. Rakennusten elinkaari, energia ja kunto. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- Raksystems Group. 2018. Energiatodistuksesta apua energiaremontteihin. [Verkkosivusto]. Vantaa: Raksystems Group. [Viitattu 2.11.2021]. Saatavana: <https://raksystems.fi/talotohtori/energiatodistuksesta-apura-energiaremontteihin/>
- Sisäilmayhdistys ry. 2019. Julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohje ja Julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohjeen perustelumuuisto. [Verkkosivusto]. Espoo, Helsinki, Jyväskylä, Kuopio, Lahti, Oulu, Tampere, Turku, Vantaa: Kuntien sisäilmaverkosto. [Viitattu 7.9.2021]. Saatavana: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Julkaisut/Hyva-sisailma-suositukset>
- ST 98.17. 2018. Rakennusautomaatiojärjestelmän kuntotutkimusohje. Espoo: Sähkötieto ry.
- Suomen Automaatioseura ry. 2021. [Verkkosivusto]. Helsinki: Rakennusautomaatiojaos - BAFF. [Viitattu 10.2.2021]. Saatavana: <https://www.automaatioseura.fi/sas/jaostot/rakennusautomaatio/>
- Terveyden ja hyvinvoinnin laitos. 2020. Legionellabakteerit vesijärjestelmissä. [Verkkosivusto]. Helsinki: Terveyden ja hyvinvoinnin laitos. [Viitattu 4.6.2021]. Saatavana: <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/vesi/legionellabakteerit-vesijarjestelmissa>

Tilastokeskus. 2019. Asumisen energiankulutus laski edelleen vuonna 2018. [Verkojulkaisu]. Helsinki: Tilastokeskus. [Viitattu 9.2.2021]. Saatavana https://www.stat.fi/til/asen/2018/asen_2018_2019-11-21_tie_001_fi.html

Ympäristöministeriö. 2020. Rakennuksen energia- ja ekotehokkuus. [Verkojulkaisu]. Helsinki: Ympäristöministeriö. [Viitattu 11.2.2021]. Saatavana: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennuksen_energia_ja_ekotehokkuus

Ympäristöministeriö. 2021. Rakentamismääräyskokoelma. [Verkkosivusto]. Helsinki: Ympäristöministeriö. [Viitattu 19.2.2021]. Saatavana: <https://ym.fi/rakentamismaaraykset>

LIITTEET

Liite 1. Lähtötietotarpeet tilaajalle

Liite 2. Tulosten esitysmateriaali

Liite 1. Lähtötietotarpeet tilaajalle

Liite 2. Tulosten esitysmateriaali