



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

RAKENNUSAUTOMAATION ETÄSEURANTA ENERGIA- TEHOKKUUDEN TYÖKALUNA

TEKIJÄ: Teemu Jäntti

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Ympäristötekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Teemu Jäntti	
Työn nimi Rakennusautomaation etäseuranta energiatehokkuuden työkaluna	
Päiväys 11.12.2018	Sivumäärä/Liitteet 36/12
Ohjaaja(t) lehtori Teemu Räsänen, asiantuntija Janne Jokinen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Caverion Suomi Oy, yksikönpäällikkö Ville Posti	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Rakennusten lämmitykseen kuuluu 40 % Suomen kokonaisenergiankulutuksesta. Kiinteistöhuollolla on rajallinen aika ja ymmärrys LVI- ja RAU-prosesseista sekä toimenpiteiden vaikutuksista olosuhteisiin ja energiankulutukseen. Energiankulutus on haaste ympäristölle ja suuri kuluerä kiinteistöjen omistajille. Etäseuranta ja rakennusautomaation optimointi on edullinen työkalu kulutuksen vähentämiseen. Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä perehdytysmateriaalia yrityksen uusille työntekijöille, joilla ei ole riittävästi tietoa LVI- ja RAU-järjestelmistä. Järjestelmien keskeisimmät alueet, joilla on vaikutusta rakennuksen energiatehokkuuteen, on selostettu lyhyesti: automaatio, lämmitys, ilmanvaihto ja ilmastointi. Perusteiden ymmärtäminen on tärkeää jokaiselle kiinteistöalalla toimivalle.</p> <p>Opinnäytetyössä luotiin materiaalia perustuen asiakasrajapinnassa tehtyihin havaintoihin LVISA-prosesseihin liittyen. Käytössä olevasta etäseurannan prosessitarkistuksesta on luotu kirjoitettu malli subjektiiviseen kokeemukseen perustuen. Havaintojen vaikutuksia energiankulutukseen on arvioitu sekä laskennallisesti että mitatuista arvoista. Kehityillä python-algoritmeilla voidaan helposti ja nopeasti todentaa ulkolämpötilasta riippuvien prosessien energiankulutusta.</p> <p>Työn tuloksena luotiin materiaalia, jota voidaan hyödyntää Caverion Suomi Oy:n asiantuntijapalveluiden laadun kehittämisessä. Perehdyttämällä uusi henkilö materiaalin avulla etäseuranta yhdenmukaistuu etäseurannan eri tekijöiden välillä. Palvelun piirin liitetyssä uudessa kohteessa on yleensä ainakin yksi työn ongelmista. Materiaalin avulla uuden henkilön huomio kiinnittyy helpommin LVISA-prosessien oleellisiin vaiheisiin. Etäseurannalla ja prosessien viritysparametrien tarkastuksella rakennuksen energiankulutus voi vähentyä merkittävästi.</p>	
Avainsanat ilmastointi, lämmitys, automaatio, energiatehokkuus, etäseuranta	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology			
Author(s) Teemu Jäntti			
Title of Thesis Energy Efficiency of the Buildings: Remote Management of HVAC Systems			
Date	11 December 2018	Pages/Appendices	36/12
Supervisor(s) Mr Teemu Räsänen, Senior Lecturer Mr Janne Jokinen, Specialist			
Client Organisation /Partners Caverion Suomi Oy Mr Ville Posti, Unit Manager			
<p>Abstract</p> <p>Heating of buildings takes up to 40 % of total energy consumption in Finland. On-site property management has limited time and knowledge of HVAC processes and how different measures affect indoor air quality and energy consumption. Energy consumption is a challenge for the environment and builds costs to property owners. Remote management of HVAC systems and process optimization is a cheap tool to decrease consumption. The objective of thesis was to produce material for a new employee who has limited knowledge of HVAC systems. The areas which have an effect on energy efficiency are described shortly: automation, heating, ventilation and air condition. Understanding the key principles is important to everyone working with buildings and properties.</p> <p>Material based on observations of HVAC processes in real world situations was produced in this thesis. The remote management process is described based on subjective experience of the task. The effects of observations on energy consumption were estimated on theory and with measured values. The developed python-algorithms can be used to easily and quickly define the effects on energy efficiency on processes which are connected to outdoor temperature.</p> <p>The result of the thesis is material to improve the work quality of the business unit. By familiarizing a new employee by using this material the process of remote management can be standardized. The material helps new employee to focus on common problems. In conclusion, a typical building has at least one of the listed problems. By remote inspections and adjustment of the process parameters the energy consumption of a building can be decreased significantly.</p>			
Keywords HVAC, BMS, energy, efficiency, remote, management			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
2	KIINTEISTÖAUTOMAATIO	7
2.1	Taajuusmuuttajat	9
2.2	Sähkömoottorit	10
2.3	Säätömenetelmiä	11
2.3.1	Kaksipiste	11
2.3.2	P-säätö	11
2.3.3	PI-säätö	12
2.3.4	PID-säätö	13
3	LÄMMITYSJÄRJESTELMÄT	14
3.1	Lämmönsiirtimet	15
3.1.1	Konvektio	16
3.1.2	Konduktio	17
3.2	Pumput	18
3.3	Venttiilit	18
4	JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄT	20
4.1	Kompressiojäähdytin	20
5	ILMANVAIHTO	22
5.1	Säätö ja sulkulaitteet	22
5.2	Ilmansuodattimet	22
5.3	Lämmön talteenotto	23
5.4	Puhaltimet	23
6	ENERGIATEHOKKUUS	24
6.1	Olosuhteet	24
6.2	Toimivuustarkastukset	25
6.2.1	Lämmin käyttövesi	25
6.2.2	Aikaohjelmien optimointi	26
6.2.3	Yöjäähdytys	27
6.2.4	Vialliset mittapisteet	28
6.2.5	Toimilaitteiden ohjaus	29
6.2.6	Käsiasetukset	29

6.2.7	Oikeat asetusarvot.....	30
6.2.8	Lämmön talteenotto.....	31
7	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	33
8	LÄHDELUETTELO.....	35
	LIITE 1: LAINSÄÄDÄNTÖ.....	37
	LIITE 2: LÄMPIMÄN KÄYTTÖVEDEN ENERGIANKULUTUS.....	39
	LIITE 3: SAATTOLÄMMITYKSEN KÄYTTÖTUNNIT.....	41

1 JOHDANTO

Vietämme suurimman osan ajastamme sisällä rakennetussa ympäristössä kotona, työpaikalla sekä vapaa-aikana. Tieto sisäilmaston olosuhteiden vaikutuksista kotona viihtymiseen ja työssä jaksamiseen kasvaa jatkuvasti. Uudet rakennukset varustetaan lähes poikkeuksetta koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla, jolloin tekniikka antaa mahdollisuudet olosuhteiden hallintaan. Tekniikan lisääntyessä ennakoivan huollon sekä prosessien toimivuustarkastuksien merkitys kasvaa. Huolimattomalla käytöllä olosuhteita ja rakennuksien energiatehokkuutta parantavasta tekniikasta saattaakin tulla terveydelle haitallinen energiasyöppö. Tulevaisuudessa järjestelmien asettamat vaatimukset kasvavat IoT-tekniologioiden mukana. Samaan aikaan ilmastonmuutoksen seurauksena ympäristöolosuhteet vaihtuvat ja sään ääri-ilmiöt yleistyvät.

Vallitsevassa toimintaympäristössä kiinteistön rakennuttajan, tilaajan, teknisen isännöinnin ja kiinteistöhuollon välissä on talotekniikan osalta harmaata aluetta. Tyypillisesti urakoitsijan vastuu taloteknisten järjestelmien toimivuudesta rajoittuu muutaman vuoden takuuajkaan. Toiminnan osalta rakennuttaja vastaa lähinnä määräystenmukaisuudesta. Tilaajan ja isännöitsijän rooli on tyypillisesti hallinnollisempi. Heillä ei välttämättä ole riittävää teknistä taustaa taloteknisten LVISA-järjestelmien toimivuuden varmentamiseksi. Järjestelmien toimivuuden varmentaminen kyllä yleensä kuuluu kiinteistöhuoltosopimukseen, mutta käytännössä varmentaminen vaatii laajaa LVISA-tekniikan ymmärtämistä sekä aikaa seurata järjestelmien toimintaa.

Caverion Suomi Oy suunnittelee, urakoi ja ylläpitää kiinteistöjen taloteknisiä järjestelmiä. Työskentelemme yrityksen asiantuntijapalveluissa, jossa toimenkuvani liittyy kiinteistöjen etäseurantaan. Toimimme kiinteistöhuollon tukena ja seuraamme energian kulutusta sekä taloteknisten järjestelmien toimivuutta. Varmistamme talotekniikan energiatehokkaan toiminnan ja viihtyisän sekä turvallisen sisäilman. Etähallinnan palveluiden liiketoimintaa on harjoitettu alkaen vuosituhaten vaihteesta. Kuitenkin kiinteistöjen omistajien ja isännöitsijöiden tietoisuus palvelun tarpeesta on lisääntynyt erityisesti viime vuosina. Opinnäytetyn tavoite on kuvata oleellisten LVISA-järjestelmien tekniset toimintaperiaatteet ja niiden vaikutus kiinteistön energiatehokkaaseen toimintaan. Työtä tullaan käyttämään Asiantuntijapalveluiden perehdytysmateriaalina sekä Etäseuranta-palvelun kehittämiseen.

2 KIINTEISTÖAUTOMAATIO

Kiinteistöjen talotekniset järjestelmät ovat kehittyneet nopeasti. 1980-luvulla analogista talotekniikkaa hallitsi talonmies paikallisilla säätimillä. Elektroniikan, tietotekniikan ja teknologian murroksen seurauksena elämme informaatioyhteiskunnassa, jossa on nopeasti siirrytty kiinteistökohtaisista valvontakeskuksista moderneihin keskusvalvomoihin.

Tänään yksittäinen valvomo-operaattori pystyy hallitsemaan tuhansien kiinteistöjen alakeskuksia sekä olosuhteita kun kiinteistön automaatiojärjestelmään on muodostettu etäyhteys käyttäen hyväksi internettiä. Tulevaisuudessa IoT-teknologian mahdollistamat dynaamiset ja älykkäät järjestelmät vaativat käyttäjältään yhä laajempaa asiantuntemusta rakennusfysiikasta, LVI- ja automaatiojärjestelmistä sekä tekoälyn ohjaamisesta.

Kasvavana trendinä tulee olemaan esineiden internet, IoT eli *Internet-of-Things*. Kuluttajamarkkinoilla on jo tuotteita, joiden avulla voidaan hallinnoida lämmitystä, ilmanvaihtoa, turvajärjestelmiä ja valaistusta älypuhelimella mistä tahansa koska tahansa. Älykkäät patteritermostaatit pystyvät tasoitamaan lämmitysenergian kulutuspiikkejä arvioimalla kulutushistoriaa ja sääennustetta. Vastaavat tuotteet ovat olleet yleisiä suuremmissa kiinteistöissä jo vuosikausia, joskin aluksi hallinnointi on tehty keskitetysti aluevalvomoista ja yhteys rakennusautomaatioon on muodostettu parikaapelin avulla.

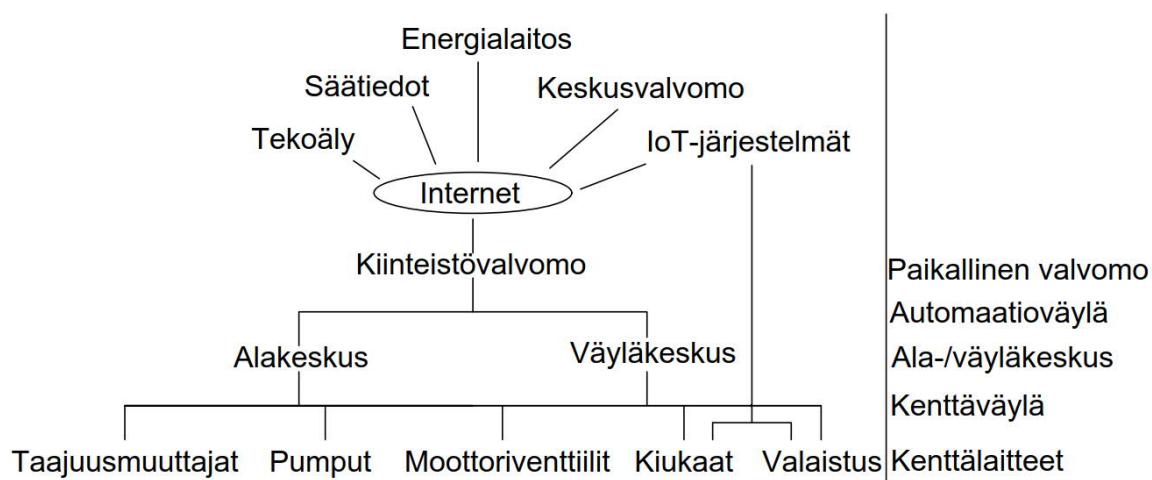
Suuri osa rakennusautomaatiojärjestelmistä on yhdistetty julkiseen internettiin eikä niiden tietoturva tule laiminlyödä. Järjestelmät on suojattu tunnus-salasana-parilla, mutta useissa järjestelmissä on olemassa ylläpitäjän tunnuksia, jotka toimivat aina ja ne ovat yleisesti tiedossa. Järjestelmien tietoturvan kannalta on tärkeää suojata itse yhteys. Perinteisen palomuurin lisäksi markkinoilla on helppokäyttöisiä reitittimiä, jotka luovat salatun VPN-yhteyden laitteiden välille. Tällöin yhteyden muodostaminen rakennusautomaatiojärjestelmään ei ole mahdollista muilta kuin ennalta määrätyillä laitteilla.

Automaation keskeiset tavoitteet ovat käytännöllinen talotekniikan hallinta, mukavat ja miellyttävät sisäilmastot sekä rakennuksien energiatehokkuuden parantaminen. Automaatiolla pystytään optimoimaan prosesseja energiatehokkaiksi, luomaan valvonta ja hälytysominaisuudet, jolloin virhe- ja korjausajat ja niistä aiheutuva energiahukka minimoituu sekä tuottamaan informaatiota, jonka avulla rakennuksen toimintaa voidaan paremmin ymmärtää, verrata ja kehittää. (Sähkötieto Ry, 2012 s. 51).

Monimuotoisuus konkretisoituu yksinkertaisessa huonelämpötilan hallinnassa. Aikaisemmin asiakkaan ilmoitettua rakennuksen yllämmöstä, huoltomies on työtehtävän saatuaan mennyt kohteeseen ja paikallisesti laskenut patteriverkoston säätökäyrää. Analogisten säätölaitteiden aikaan tämä on yleisesti tarkoittanut säätökäyrän suuntaissiirtoa, jonka vaikutuksena sisälämpötila muuttuu kaikilla ulkolämpötiloilla aiheuttaen tyytymättömyyttä lämpöoloihin toisena aikana. Nyt operaattori saa ilmoituksen asiakkaalta, ottaa etäyhteyden kohteeseen, pystyy tarkistamaan prosessin toimivuuden ja

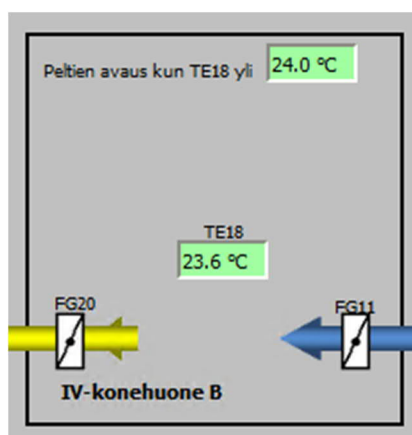
nostamaan yksittäistä säätöpistettä muutamissa minuuteissa. Näin säästyä paitsi aikaa niin myös energiaa.

Automaatiojärjestelmät sisältävät kolme tasoa: kenttä, automaatio ja hallinto (kuva 1). Tasot viestivät jatkuvasti toisilleen erilaisten väyläteknikoiden avulla. Kenttälaitteisiin kuuluu antureita (esim. lämpötilan ja paine-eron mittaus), toimilaitteita (esim. venttiilejä, sähkömoottoreita, releitä) sekä itsenäisiä säätimiä. Integroituja säätimiä lukuun ottamatta ne eivät yleensä sisällä älyä tai logiikkaa vaan toimivat automaatiotasolta saatujen säätöviestien mukaan. Kenttälaitteilla tuotetaan automaatiolle toimilaitteiden tilatietoja sekä mittaustietoa prosessin tilasta. (Merz;ym., 2009 ss. 8-11) (Sähkötieto Ry, 2012 ss. 93-95).



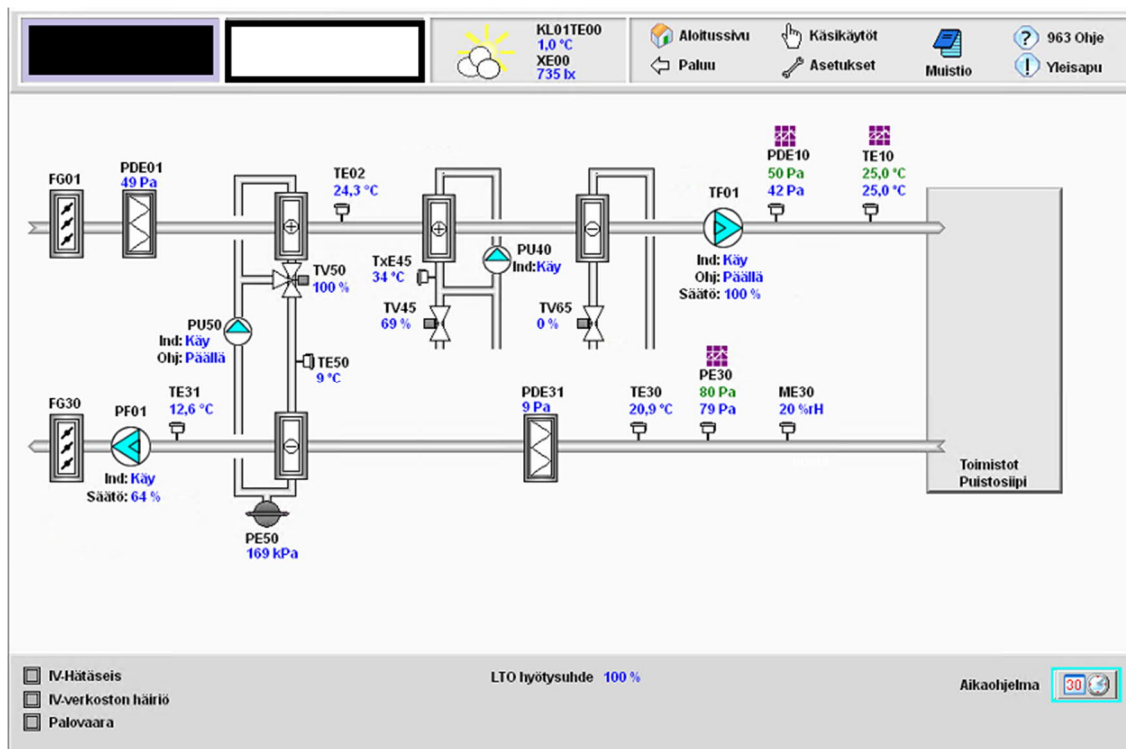
Kuva 1. Rakennusautomaation hierarkia (Jäntti, 2018)

Kenttälaitteiden yläpuolisella tasolla automaatio hallitsee mittausta, kontrollointia sekä säätöä alakeskuksilla sekä I/O-moduuleilla. Automaatiolaitteisiin on integroitu prosessori signaalien käsittelyä varten, jonka vuoksi automaatiolaitteelta lähtevän säätöviestin tarkkuus paranee virheen pienentyessä ja näin lisäävät säädön luotettavuutta (Morris, 1993 ss. 204, 222). Yksinkertaisimpia automaatiolaitteita kutsutaan DDC-laitteiksi, eli välittömiksi digitaalisäätimiksi. Niihin on sisäohjelmoitu toimintamallit kuinka toimia kenttälaitteilta saatujen viestien perusteella (kuva 2). (Merz;ym., 2009 s. 3) (Sähkötieto Ry, 2012 s. 94).



Kuva 2. Esimerkki DDC-ohjauksesta (Jäntti, 2018)

Automaatiotason yläpuolella on hallintotaso, joka nykyään tarkoittaa kiinteistökohtaisia PC-valvomoita ja suuria keskitettyjä keskusvalvomoita. Valvomon grafiikkaan (kuva 3) tuodaan haluttu määrä kenttä- sekä automaatiolaitteita, joiden välityksellä voidaan seurata ja hallita prosessia. Grafiikalla on myös yleisesti hälytyspisteet prosessissa esiintyvän vian paikallistamiseksi.



Kuva 3. Kuvakaappaus Trentecin valmistamasta 963 valvomo-ohjelmistosta (Jäntti, 2018)

Automaatiojärjestelmän kahden alemman tason ohjaus- ja säätöprosessit toimivat yleensä ilman hallintotasoakin, mutta tällöin kaikki ohjelmalliset muutokset täytyy käydä tekemässä paikallisesti säätimiin. Hallinnointitaso on siis käytännössä tietokoneohjelmisto, josta pystytään lukemaan prosessin tilaa ja syöttämään ohjaussuureita toimilaitteille kuten tuloilman lämpötila tai aikaohjelma. Hallintotaso puolestaan mahdollistaa monipuolisia raportoinnin ja kunnossapidon työkaluja. (Merz;ym., 2009 s. 28) (Sähkötieto Ry, 2012 s. 93).

2.1 Taajuusmuuttajat

Taajuusmuuttajat ovat yleistyneet nopeasti oikosulkumoottoreiden ohjauksessa (kuva 4). Taajuusmuuntimella tarkoitetaan laitetta, jolla pystytään muuttamaan ja hallitsemaan tulevan verkkovirran taajuutta taajuusmuuntimen moottorilähdössä. Moottorilähdön taajuus vaikuttaa syöttökaapelin tehoon kaavojen 1 - 3 kautta:



Kuva 4. ABB valmistama ACS355 taajuusmuuttaja (ABB, 2018)

$$\omega = 2\pi f \quad (1)$$

jossa ω = kulmataajuus, 1/s
 f = taajuus, 1/s

$$I = I_p \sin \omega t \quad (2)$$

jossa I = virta, A
 I_p = huippuvirta, A
 t = aika, s

$$P = UI \quad (3)$$

jossa P = teho, W
 U = jännite, V
 I = teho, A

Taajuusmuuntimella voidaan siis suoraan vaikuttaa ohjattavien laitteiden esimerkiksi puhaltimien ja pumppujen sähkönkulutukseen. Pumpuilla ja puhaltimilla on olemassa mallille tyypilliset puhallinkäyrät, jolloin toimittaessa optimialueen ulkopuolella hyötysuhde heikkenee.

Taajuusmuuntimen ja rakennusautomaatiojärjestelmän välisestä suhteesta on syytä huomioida automaation jänniteviestin ja taajuusmuuntajan moottorilähdön taajuuden suhde. Automaatio lähettää aina eteenpäin 0-10 V viestiä, mutta automaatio ei lue taajuusmuuntajalta moottorilähdön tajuutta. Taajuusaluetta muuttamalla vaikutetaan puhallinohjaukseen, mutta muuttuneista asetuksista tieto on ainoastaan taajuusmuuntajassa.

2.2 Sähkömoottorit

Talotekniikassa käytetään voimanlähteenä perinteisiä oikosulkumoottoreita tai uudempia EC-moottoreita. Oikosulkumoottorit ovat investoinnilta halvempia, mutta ominaisuuksiltaan karsittuja. EC-moottoreihin on integroitu ohjauselektroniikkaa, jonka puolesta sillä on enemmän ominaisuuksia,

mutta pienemmät huipputehot. Sähkömoottoreiden tyypillinen teho talotekniikassa on asuinkerrosta-loissa 1 kW, toimistorakennuksien lämmitysverkostoissa 4 kW ja jäähdytyksessä 20 - 50 kW (Tähtinen, 2018).

2.3 Säätömenetelmiä

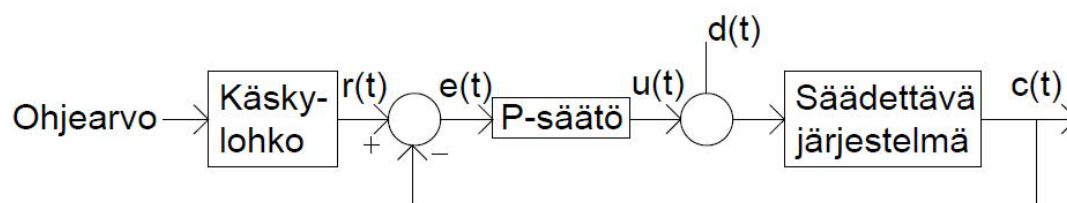
Säätimen päätehtävä on pitää säädettävä suure (esim. lämpötila, virtaus) hyväksyttävän lähellä ohjausarvoa ulkoisista häiriötekijöistä (säälöt; auringonpaiste, tuuli, sisäisen kuormituksen vaihtelu, kulutusmuutokset) riippumatta (Värjä;ym., 1999 s. 58). Huonosti viritetty säätö lisää energian kulu-tusta ja lyhentää toimilaitteiden käyttöikä (Sähkötieto Ry, 2012 s. 231). Seuraavaksi käyn läpi ylei-simmät säätömenetelmät.

2.3.1 Kaksipiste

Yksinkertaisin säätötapa on kaksipistesäätö, joka voidaan toteuttaa erittäin yksinkertaisesti yhden ohjausreleen avulla. Ohjausarvo voi saada vain kaksi toisensa pois sulkevaa arvoa kuten käy-seis. Kiinteistöautomaatiossa ohjaustapaa voidaan käyttää esimerkiksi yksinopeuksisten poistopuhaltimien ja vesipumppujen ohjauksessa tai sähkökäyttöisiin jälkilämmityspattereihin. Säätötavasta johtuen ohjattu suure sahaa ohjausarvojen väliä. (Savolainen;ym., 2007 s. 29).

2.3.2 P-säätö

P-säädin on toimintaperiaatteeltaan elektroninen vahvistin, jossa toimilaitteelle menevä ohjausviesti on suoraan verrannollinen erosuureen arvoon. Säätöpiirin lohkokaavio on esitetty kuvassa 5. Säätö pyrkii pitämään toimilaitteelta lähtevän standardiviestin $c(t)$ ohjearvon $r(t)$ mukaisessa arvossa. Säätöpiirin toiminnan kannalta standardiviestin mittapisteen on oltava edustava tai koko säädön toimi-vuus kärsii. Eroelin muodostaa ohjearvon $r(t)$ ja säätösuureen $c(t)$ erotuksen eli erosuureen $e(t)$. Au-tomaatiosta lähtevään ohjausviestiin summautuvat häiriöviestit $d(t)$ ovat harvinaisia eivätkä juuri vaikuta säädön toimintaan ja ne voidaan tarvittaessa siirtää ohjaussuureeseen lohkokaavioalgebran avulla. P-säädön ohjausviesti $u(t)$ saa arvonsa kaavan 4 mukaan. (Savolainen;ym., 2007 ss. 30-33) (Sähkötieto Ry, 2012 ss. 55-58).

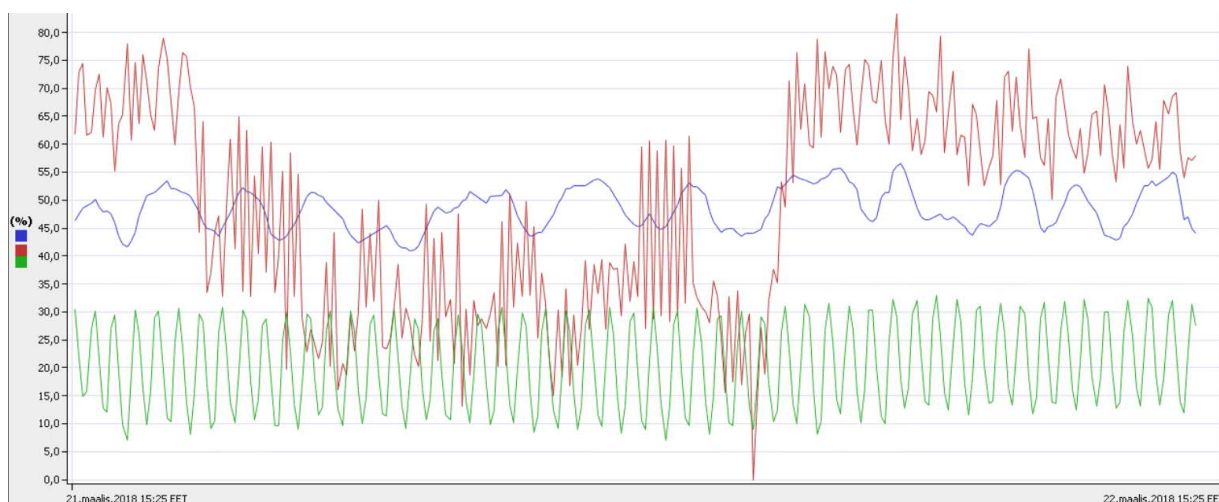


Kuva 5. P-säädön toimintaperiaate (Savolainen;ym., 2007 s. 30)

$$u(t) = K_p e(t), K_p \neq 0, K_p \in R \quad (4)$$

jossa $u(t)$ = P-säädön ohjausviesti
 K_p = vahvistuskertoimen
 $e(t)$ = erosuure

Automaatiojärjestelmissä käytetään vahvistuskertoimen K_p sijaan yleisesti suhdealuetta X_p , joka on vahvistuksen käänteisarvo. Suhdealue määrää standardiviestin $c(t)$ muutokselle raja-arvot, joka saa säätimen ohjausviestin $u(t)$ muuttumaan ääriarvosta toiseen. Suhdealueen ollessa pieni, ohjauksen muutos on voimakkaampaa ja nopeampaa, mutta voi saada aikaan liiallista huojuntaa tai epästabiilisuutta, jolloin ohjausviestin arvo vaihtelee jatkuvasti laidasta laitaan (kuva 6). Huojunta ja epästabiilisuus lyhentävät toimilaitteiden käyttöikä. Liian suuri suhdealue puolestaan ei reagoi standardiviestin $c(t)$ muutokseen riittävän nopeasti, joka aiheuttaa voimakasta huojuntaa säädettävässä prosessissa. (Savolainen;ym., 2007 s. 32) (Sähkötieto Ry, 2012 s. 58)



Kuva 6. Trendihistoria säätöventtiilin tilatiedosta: vihreällä lämmin käyttovesi, punaisella lämmityspiiri ja sinisellä IV-piiri. Lämmin käyttovesi sekä lämmityspiiri huojuvat tarpeettomasti ja niiden viritysparametrit tulisi tarkistaa (Jäntti, 2018)

2.3.3 PI-säätö

Mikäli säädettävässä prosessissa ei voida hyväksyä säätöpoikkeamaa, säätöjärjestelmään lisätään aikaintegraali, joka saa nollasta poikkeavan arvon äärellisessä ajassa. Kun erosuure $e(t)$ saa nollasta poikkeavan arvon algoritmi alkaa laskemaan erosuureen ja aika-akselin väliin jäävää pinta-alaa kumulatiivisesti yhteen. Näin integroivan tekijän sisältämä säätöalgoritmi mahdollistaa ohjauksen $u(t)$ nettolisäyksen, vaikka erosuure olisi nolla. Integrointitermi ilmoitetaan usein integrointiaikavakion T_I (kaava 6) avulla, joka ilmaisee karkeasti ajan, jonka kuluessa säätöpoikkeama poistetaan. Lyhyt integrointiaika vaikuttaa säätöpiirin toimintaan samoin kuin pieni suhdealue. PI-säätimestä voidaan tehdä myös P-säädin asettamalla suuri integrointiaika, jolloin kerroin K_I pienenee merkityksettömäksi (kaava 5). Säätöpiirin kannalta mahdollisimman pieni integrointiaikavakio T_I on suotuisa. (Savolainen;ym., 2007 ss. 34-35) (Sähkötieto Ry, 2012 s. 59).

$$K_I \int_0^t e(t) dt, K_I \geq 0, K_I \in R \quad (5)$$

jossa K_I = integrointikerroin
 t = aika

PI-algoritmissa ohjausviestin yhtälö on siis muotoa

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt, \quad K_p \neq 0, K_I \geq 0, K_I, K_p \in R \text{ tai}$$

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt \right), \quad K_p \neq 0, K_I \geq 0, K_I, K_p \in R$$

jossa $T_I = \frac{K_p}{K_I}$ (6)

2.3.4 PID-säätö

PID-säätöä käytetään, kun säätöpoikkeamaan vaaditaan voimakasta ja välitöntä reagointia. Säätö ottaa voimakkaasti ennakkoa ja siten ohjaa järjestelmää oikeaan suuntaan. Tämä ennako toteutetaan derivointitermillä K_D , joka muuttaa ohjausviestiä $u(t)$ suhteessa erosuureen $e(t)$ aikaderivaataan eli muutosnopeuteen (kaava 7). PID-algoritmi reagoi nopeasti ja poistaa säätöpoikkeaman kokonaan. Savolasen mukaan: "derivointiaikavakio T_D (kaava 8) ilmaisee karkeasti ajan, jonka kuluessa säätö saa eräänlaisen lisävahvistuksen nopean erosuuremuutoksen tapahduttua; jos erosuuremuutokset ovat hitaita on derivointitermin vaikutus vähäistä". Säätöalgoritmin D-osa voidaan eliminoida asettamalla aikavakio T_D nollassi. (Savolainen; ym., 2007 ss. 36-37).

$$K_D \frac{d}{dt} e(t), K_D \geq 0, K_D \in R \quad (7)$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{d}{dt} e(t), \quad K_p \neq 0, K_I, K_D \geq 0, K_I, K_p, K_D \in R \text{ tai}$$

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{d}{dt} e(t) \right), \quad K_p \neq 0, T_I > 0, T_D \geq 0$$

jossa $T_D = \frac{K_D}{K_p}$ (8)

3 LÄMMITYSJÄRJESTELMÄT

Keskityn luvussa kaukolämpöön, joka on Suomessa yleisin lämmitysmuoto (Energiateollisuus Ry). Kaukolämmöllä tuotettiin 46 % Suomen lämmitysenergiasta vuonna 2012 (Motiva, 2017). Kaukolämpöön kuulumattomat kiinteistöt tuottavat lämpöenergian joko polttamalla, lämpöpumpuilla tai suoralla sähkölämmityksellä. Muissa lämmitystavoissa tekniikka on samanlaista, mutta ensiöpiirin lämmönlähde tuotetaan kiinteistössä.

Lämmönjakopakettiin kuuluu lämmönsiirrin, venttiilit toimilaitteineen, pumput sekä toimintaa ohjaava kiinteistöautomaatio. Lämmönjakopaketin tehtävä on siirtää ensiöpiirin veteen sitoutunut lämpö toisiopiiriin. Kiinteistön lämmönjakopaketti koostuu kahdesta tai useammasta lämmönsiirtimestä, joilla on omat putkiverkostot: lämmin käyttövesi sekä erilaiset lämmityspiirit.

Lämmityspiirit on yleensä jaettu käyttötarkoituksen mukaan. Asuin- ja toimikiinteistöjen tyypilliset piirit ovat ilmastointi- ja lämmityspiiri. Lämmityspiirejä voi olla useampia käyttötarkoituksen mukaan esimerkiksi patteri- ja lattialämmityspiiri, joilla voi vielä olla omia alapiirejä kiinteistön tarpeiden mukaan esimerkiksi etelä- ja pohjoisosalle. Erilaisten piirien putkiverkostojen rakentaminen kasvattaa investointikustannuksia, mutta parantavat eliniän aikana energiatehokkuutta sekä rakennuksen lämpökuorman hallintaa parempien säätömahdollisuuksien vuoksi.

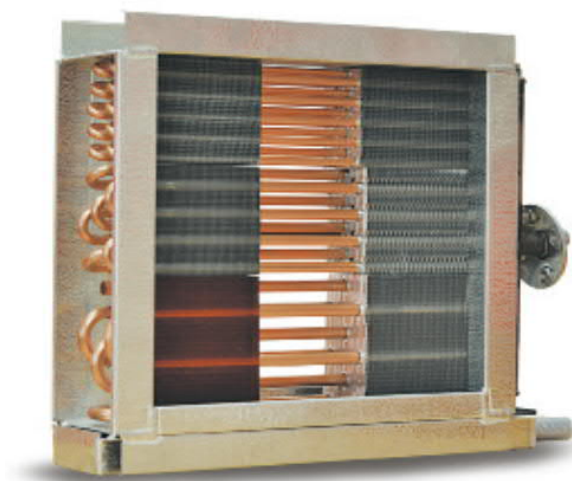
Kaukolämpöenergian kulutusta mitataan lämmönjakopaketin läpi virtaavan vesivirran ja lämpötilan muutoksen eli tehon perusteella (kaava 9). Lämpöenergian määrä on kiinteistön lämmitystehon, ilmanvaihtotehon, käyttövesipiiriin liitettyjen lämmityslaitteiden tehon ja käyttöveden tuntisen lämmitystehon summa (Energiateollisuus Ry, 2014). Lämpötilan jäähtymän perusteella voidaan arvioida prosessin toimivuutta. Laitteiden toimiessa oikein jäähtymä on 25 - 60 °C (Vantaan Energia).

$$\Phi = V * c * \rho * \Delta t \quad (9)$$

jossa

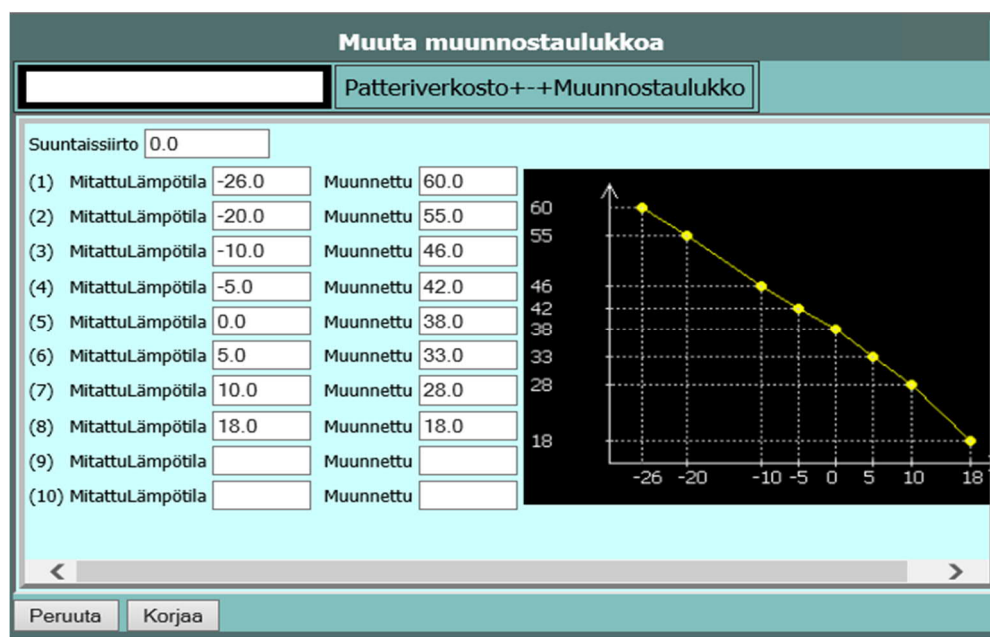
- Φ = teho, kW
- V = tilausvesivirta, dm³/s
- c = veden ominaislämpö, kJ/kg°C
- ρ = veden tiheys, kg/dm³
- Δt = veden jäähtymä, °C

Lämmityspiirien toiminta perustuu piirissä oleviin lämmönsiirtimiin. Perinteisessä patteriverkostossa lämpö siirtyy radiaattoreista säteilemällä huoneilmaan. Uusissa kiinteistöissä suositaan lattialämmitystä, joka mahdollistaa miellyttävämmän lämmön jakaantumisen sekä poistaa huoneista tilaa vievät radiaattorit. Tuloilman lämmittämiseksi kanavaan on asennettu lämmityspatteri (kuva 7), jossa veteen sitoutunut lämpöenergia siirtyy patterin läpi virtaavaan ilmaan.



Kuva 7. Ekocoilin valmistama lamellipatteri tuloilman lämmittämiseksi (Ekocoil, 2018)

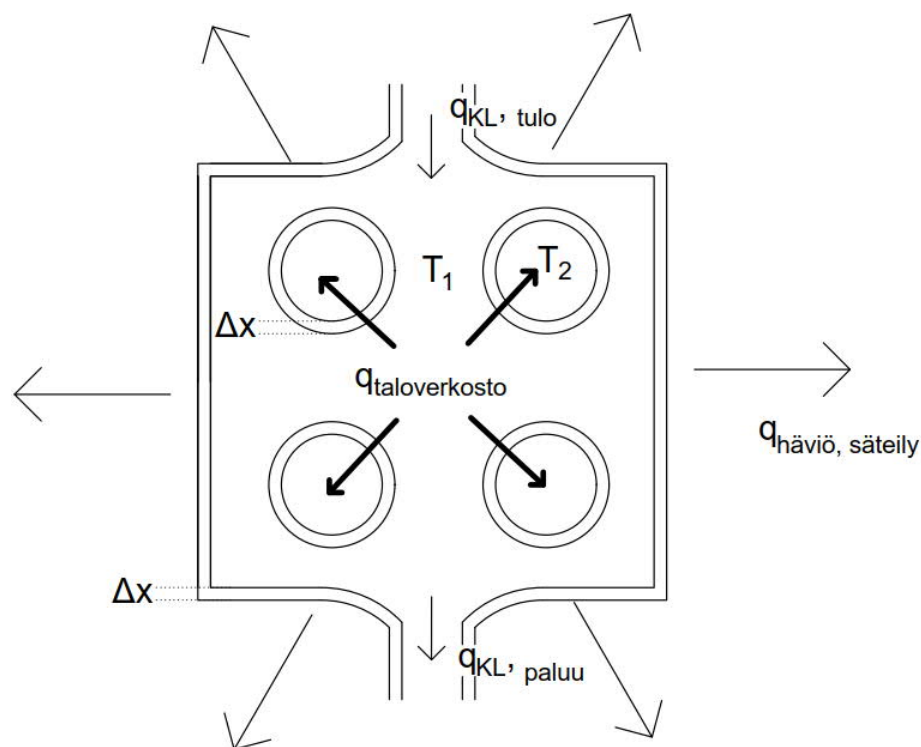
Automaatiojärjestelmä hallitsee lämmitysverkostojen veden lämpötilaa. Veden lämpötilan on seurattava ympäristön olosuhteita, jotta sisäilman lämpötila pysyy kiinteistön käyttötarkoitukseen nähden miellyttävänä. Automaatio saa ohjausarvonsa tyypillisesti ulkolämpötilan mukaan säätökäyrältä (kuva 8).



Kuva 8. Patteriverkoston säätökäyrä Fidelixin järjestelmästä. X-akselilla ulkolämpötila, Y-akselilla pii- rin menolämpötila (Jäntti, 2018)

3.1 Lämmönsiirtimet

Lämmönsiirtimellä tarkoitetaan laitetta, jossa kaksi toisistaan eristettyä materiaalivirtaa kohtaa ja lämpöenergiaa siirtyy viileämmälle virralle (kuva 9). Lämmönsiirtimiä käytetään laajasti teollisuuden ja tekniikan eri aloilla prosessien lämmittämiseen ja jäähdyttämiseen. Lämmönsiirtimen toiminta perustuu termodynamiikkaan ja energian siirtymiseen lämpötilaerosta johtuen (Incropera:ym., 2007 s. 2).



Kuva 9. Lämmönsiirtimen energiavirrat (Jäntti, 2018)

Lämmön siirtymismekanismit ovat konduktio, konvektio ja säteily. Lämmönsiirtimessä lämpöä siirtyy konduktiolla ja konvektiolla, jotka voidaan järjestää tehokkuuden mukaan seuraavasti: konduktio < luonnollinen konvektio < laminaarinen pakotettu konvektio < turbulenttinen pakotettu konvektio. Lämmönjohtavuuden kannalta turbulenttinen virtaus on suotavaa, jolloin lämpöteho siirtyy nesteen sisällä tehokkaasti ja on kokoluokaltaan noin kaksinkertainen molekyyliseen johtumiseen verrattuna. Lämmönsiirtimen hyötysuhdetta on mahdollista parantaa ensiö- ja toisiopuolen virtausten risteävyydellä. (Serth;ym., 2014 s. 31).

3.1.1 Konvektio

Lämpöenergiaa siirtyy konvektiolla, kun kaasu tai neste kohtaa kiinteän aineen ja näiden välillä on lämpötilaero. Konvektio on määrävä voima lämmönvaihtimen läpi virtaavien nesteiden lämmönvaihdossa, tuloilman lämmityksessä sekä jäähdytysjärjestelmien lauhduttimissa. Nämä ovat myös esimerkkejä ns. pakotetusta konvektiosta, jolloin virtaavan aineen liike-energian tuottamiseen on käytetty ulkoista lähdettä kuten pumppua tai puhallinta. Vapaata ja luonnollista konvektiota tapahtuu lämpötila- ja tiheyserojen voimasta. Lämmönjohtavuuden kannalta pakotettu turbulenttinen konvektio on edullisin, jolloin lämpöenergia siirtyy nesteen sisällä tehokkaasti. Ero pelkkään konduktioon verrattuna on noin kaksinkertainen. Kiinteän pinnan ja nesteen välistä lämpötehoa kuvaa kaava 10. Kaava tunnetaan Newtonin jäähtymislakina ja näyttää Fourierin lämmönjohtumislailta. (Serth;ym., 2014 s. 31).

$$q = hA\Delta T \quad (10)$$

jossa q = lämpöteho nesteen ja pinnan välillä
 h = lämmönsiirtokerroin
 A = pinta-ala
 ΔT = lämpötilan muutos

3.1.2 Konduktio

Konduktio on lämpöenergia siirtymistä väliaineen kautta johtumalla. Lämmönsiirtimessä konduktiota tapahtuu kiinteän materiaalin ja nesteen rajapinnassa. Lämmönsiirtimen valmistukseen on käytettävissä rajattu määrä materiaaleja, koska konduktion voimakkuus on suoraan verrannollinen jokaiselle materiaalille ominaiseen lämmönjohtavuuteen λ (kaava 11). Lämmönjohtumiseen vaikuttaa olennaisesti aineen vapaat elektronit. Metalliseokset ovat yleensä huonoja lämmönjohtimia, koska niiden vapaat elektronit on käytetty sidosaineen sitomiseen. Lämpötehon siirtyminen on suoraan verrannollinen käytettävissä olevaan pinta-alaan. Lämmönjohtavuuden arvot ovat lähtökohtaisesti pieniä (taulukko 1). Johtavan aineen pinta-alaa voidaan kasvattaa erilaisten siivekkeiden avulla, kuitenkin pitäen siivekkeiden koko mahdollisimman pienenä. Aineiden kykyä vastustaa lämpötilan muutosta kuvaa ominaislämpökapasiteetti. (Serth;ym., 2014 ss. 2-4, 33-34).

$$q_x = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{\Delta T}{R} \quad (11)$$

jossa q_x = lämpöteho
 λ = lämmönjohtavuus (thermal conductivity)
 A = pinta-ala
 ΔT = lämpötilan muutos
 Δx = pituuden muutos
 R = lämmönjohtavuus

Taulukko 1. Talotekniikassa käytettyjen aineiden ominaisuuksia (MAOL-taulukot, 2005).

Aineiden ominaisuuksia		
Aine	Lämmönjohtavuus W/(K*m)	Ominaislämpökapasiteetti kJ/(kg*K)
Hopea	429	0,235
Kupari	400	0,39
Alumiini	237	0,9
Rauta	80	0,45
Teräs	45	0,46
Lasi	0,9	0,84
Vesi	0,6	4,19
Glykoli (VP-cool)	0,27	2,33
Kumi	0,16	2

Kuva 9 on havainnollistettu lämmönsiirtimen rakennetta ja energivirtoja. Tehokkaassa ja oikein mitoitettussa lämmönsiirtimessä tulevan ja palaavan vesivirran lämpötilaero on suuri, jolloin lämpöenergia on siirtynyt verkostosta toiseen. Verkostojen välillä pyritään lämmönsiirtimen tehon ja elinikänsä kannalta optimaalisen pieneen seinämäpaksuuteen sekä käyttämään materiaalina mahdollisimman kustannustehokasta ja hyvän lämmönjohtavuuden omaavaa materiaalia. Lämmönsiirrin ja kuumen vesivirran putkisto puolestaan pyritään eristämään ympäristöstä kustannustehokkaalla ja pienen lämmönjohtavuuden materiaalilla tarpeettomien lämpöhäviöiden estämiseksi.

3.2 Pumput

Pumppujen osuus on jopa 50 % teollisuuslaitoksen energiankulutuksesta ja arviolta 20 % koko maailman energiankulutuksesta (Hydraulic Institute; Europump; US Department of Energy's Office of Industrial Technologies, 2001 s. 1). Pumppujen energiankulutus on merkittävä osa myös talotekniikan parissa. Tyhjää pyörittävä pumppu kuluttaa noin 50 % täyden kuorman tehosta (Bloch;ym., 2014 s. 3). Pumpun elinkaaren kustannuksista investointi on vain noin 10 % (Bloch;ym., 2014 s. 2). Huollolla ja oikealla käytöllä on merkittävä vaikutus kustannuksien muodostumiseen.

Talotekniikassa käytetään yleisesti pieniä keskipakopumppuja, joilla on matala äänenvoimakkuus sekä täriinä. Niiden toiminta perustuu akselin ympärillä pyörivään magneettikenttään, joka saa propellin pyörimään. Pumput on tyypillisesti valmistettu toimimaan määrättyllä teholla, mutta yleensä varustettu kaksi- tai kolminopeusmoottorilla virtauksen ja putkiston äänimelun hallitsemiseksi. Tehon ohjaukseen voidaan käyttää myös taajuusmuuntimia. (Nesbitt, 2006 ss. 4-5).

3.3 Venttiilit

Venttiileillä kontrolloidaan prosessissa vaikuttavaa painetta, virtausnopeutta tai -suuntaa ja lämpötilaa. Teollisuuden kehittymisen myötä markkinoilla on tuhansia erilaisia venttiilejä joiden koko, toimintaperiaate, materiaali ja käyttökohde vaihtelevat. Venttiilien tulee olla toimintavarmoja ja mahdollisimman huoltovapaita. Useasti venttiilin viottumisen seurauksena koko prosessin tuotanto kärsii ja pahimmassa tapauksessa seisahtuu. Talotekniikassa venttiilien vikojen seuraukset vaihtelevat harmittomasta yllämmöstä vakaviin vesivahinkoihin. (Nesbitt, 2007).

Venttiilin läpi kulkeva materiaalivirta voi koostua vedestä, öljystä, nesteestä ja kiinteään aineeseen seoksesta, nesteestä ja kaasun seoksesta tai kaasuista. Venttiilien tärkein tehtävä on virtauksen hallinta. Niillä voidaan joko katkaista, säätää tai estää materiaalivirran kulkua. Katkaistaessa virtaus linjan osa eristetään muusta putkistosta, joka mahdollistaa esimerkiksi pumpun huoltotoimet tai varmistaa asentajien turvallisuuden (Nesbitt, 2007).

Säätöventtiileillä hallitaan virtauksen suuruutta tai suuntaa. Staattisessa tilanteessa linjassa voidaan käyttää takaisinkytkentää, jolloin virtaus kiertää kehää. Verkoston käyttäytyminen kuitenkin harvoin on staattista ja olosuhteiden hallitsemiseksi venttiilejä ohjataan esimerkiksi PID-säädön avulla. Kont-

rolloimalla virtausominaisuuksia jatkuvasti verkostoon pyritään tuomaan staattiset olosuhteet. Venttiileiden avulla estetään toimilaitteille haitallisia paine-iskuja tai vaarallisen paineen kehittyminen. Virtaus venttiilien kohdalla tulisi olla mahdollisimman laminaarista käyttöiän pidentämiseksi. (Nesbitt, 2007).

4 JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄT

Jäähdytyspiirit ovat tekniseltä toteutukseltaan hyvin samankaltaisia verrattuna lämmityspiireihin. Yleisimpiä jäähdytystekniikoita on kompressio- ja adsorptiojäähdyttimet sekä lämpöpumput. Kaukokylmää tuotetaan näillä samoilla tekniikoilla, mutta isossa keskitetyssä yksikössä käyttäen hyväksi suurien vesistöjen vettä (Rakennustieto Oy, 2010 ss. 2-4).

Lämpö on energian siirtymistä lämpötilaeron vuoksi. Termodynamiikan nollannen pääsäännön mukaan eristetty systeemi etenee luonnostaan kohti tasapainoa eli lämpö siirtyy lämpimämmästä aineesta kylmempään (Serwey;ym., 2004 s. 582). Jäähdytyksessä tehdään työtä tätä fysiikan peruslakia vastaan termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan: systeemin sisäenergian muutos on lämpömäärän ja tehdyn työn summa (kaava 12) (Serwey;ym., 2004 s. 618).

$$\Delta U = Q + W_u \quad (12)$$

jossa ΔU = sisäenergian muutos
 Q = tuotu lämpöenergia
 W_u = tuotu tilavuudenmuutostyö

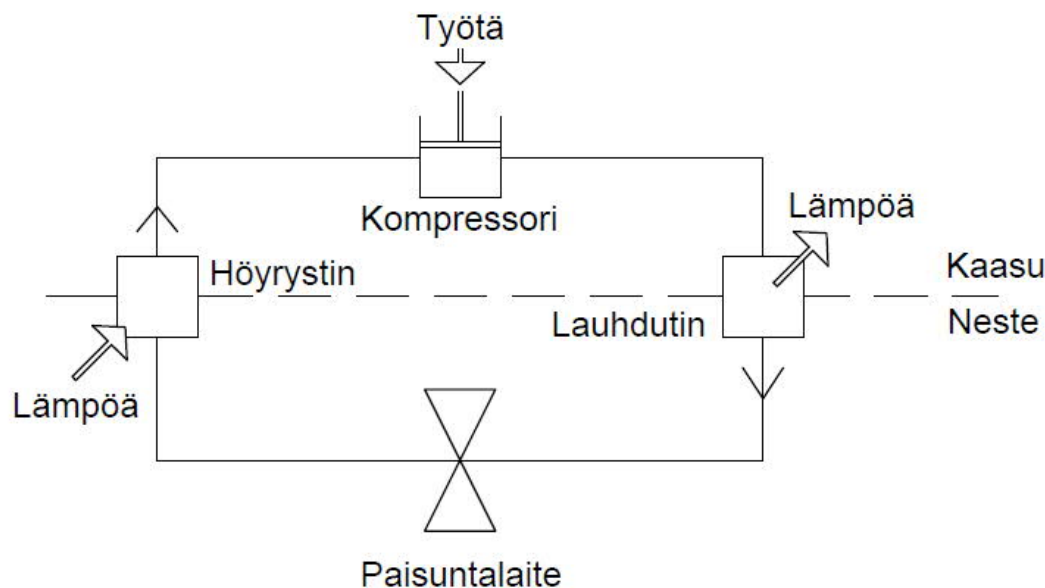
Jäähdytyskoneen tai lämpöpumpun tehokkuutta kuvaa kylmäkerroin, joka on poistetun lämpöenergian ja koneen tekemän työn suhdeluku (kaava 13). Nykyaikaisen järjestelmän tyyppillinen arvo on luokkaa 3 - 3,5 (Svahn, 2015 s. 10)

$$\varepsilon_k = \frac{Q}{W} \quad (13)$$

jossa ε_k = kylmäkerroin
 Q = lämpimään siirretty energia
 W = koneen tekemä työ

4.1 Kompressiojäähdytin

Kompressiojäähdyttimien toiminta perustuu kylmäaineen höyrystykseen ja lauhtumiseen (kuva 10). Kylmäaineina on aiemmin käytetty erilaisia halogenisoituja fluori, hiili, kloori ja vety-yhdisteitä. Nykyään ainoastaan kloorittomat sekä halogeenittomat kylmäaineet ovat sallittuja. (Hakala;ym., 2013 s. 23).



Kuva 10. Kompressio-lauhdutinjärjestelmän prosessikaavio (Jäntti, 2018)

Kylmäkoneen pääkomponentit ovat höyrystin, kompressorin, lauhdutin ja paisuntalaite. Kylmäprosessissa veden alhainen lämpötila (10 - 20 °C) ja höyrystimessä vallitsevan paine saa kylmäainetta höyrystymään. Aineen olomuodon muuttaminen vaatii energiaa, jolloin höyrystyminen sitoo lämpöä ympäristöstä. Höyrystynyttä kylmäainetta paineistetaan kompressorilla, jonka voimanlähteenä on sähkömoottori. Kylmäaine poistuu kompressorista ylipaineistettuna höyrnä lauhdutinkammioon, jossa se tiivistyy takaisin nesteeksi ja luovuttaa lämpöä lauhdutinpiirissä kiertävään veteen. Kylmäkoneen toiminnan kannalta onkin välttämätöntä, että kompressorilta poistuva kylmäaine on lauhdutinpiiristä palaavaa vettä lämpimämpää. Nesteytynyt kylmäaine palaa paisuntalaitteen kautta höyrystimelle. Höyrystimessä olevan kylmäainetta määrä vaikuttaa koneen toimintaan ja kylmäkertoimen suuruuteen (Santamouris;ym., 1997 ss. 3-4). (Serth;ym., 2014 s. 540).

Kylmäainetta kierron lisäksi järjestelmässä on kaksi vesipiiriä: jäädytetyn veden kierto rakennukseen sekä lämmentyneen veden lauhdutus. Höyrystimessä ja lauhduttimessa on lämmönsiirrin energian siirtämiseksi näiden piirien sekä kylmäkoneen välillä. Lauhdutuspiirin prosessiveden jäädyttämiseksi sitä pumpataan siivellisissä putkistoissa ja lämmönsiirron tehostamiseksi putkistojen lomitse siirretään ilmaa alhaalta ylöspäin puhaltimien avulla (Serth;ym., 2014 s. 509). Puhaltimien sähkömoottorien teho on tyypillisesti alle 37 kW (Serth;ym., 2014 s. 513). Kylmissä ilmastoissa putkistojen jäätyminen voi aiheuttaa ongelmia, jota voidaan ehkäistä lämmittämällä jäädyttävää ilmaa (Serth;ym., 2014 s. 514)

5 ILMANVAIHTO

Ilmanvaihtojärjestelmän tavoitteena on tuoda puhdasta ja miellyttävää ilmaa sisälle samalla poistaen vanhaa ilmaa palvelualueelta pitäen kiinteistön paine-ero ulkoilmaan nähden mahdollisimman neutraalina. Ilmanvaihtoon kuluva energiamäärä on enemmän riippuvainen henkilöiden määrästä ja käytöstä kuin palvelualueen tilavuudesta (Lappalainen, 2010 s. 28).

5.1 Sääto ja sulkulaitteet

Sääto- ja sulkulaitteet ovat ammattikielessä erilaisia peltejä (kuva 11). Ne ovat yksinkertaisia laitteita, joiden tehtävä on hallita ilmavirtauksia ilmanvaihtokanavassa. Peltejä ohjataan sähkömoottorilla rakennusautomaatiojärjestelmästä. Rikkinäisen ohjauksen seurauksena avonaiseksi jäänyt pelti voi saada kanavassa sijaitsevan lämpöpatterin jäätymään ja kuluttaa vuotoilman mukana tarpeettomasti energiaa (Seppänen, 1988 s. 109). Ilmanvaihdon kiertoilma on toteutettu kanavien väliin asennetulla säätöpellillä.



Kuva 11. Erilaisia säätöpeltejä (FläktGroup Finland Oy, 2018)

5.2 Ilmansuodattimet

Ulkoilmassa on erilaisia hiukkasmaisia epäpuhtauksia, jotka on tarpeen suodattaa ennen pääsyä sisäilmaan. Seppäsen mukaan (Seppänen, 1988 s. 264) ”suodatuksen vaatimustaso määräytyy terveyden, turvallisuuden, siisteyden, laitteiden toiminnan, kulumisen tai tuotteiden pilaantumisen mukaan”. Ilmansuodattimet luokitellaan kansainvälisen standardin SFS-EN ISO 16890 hiukkaskoon erotusasteen mukaan ePM1-, ePM2,5-, ePM10- sekä ISO Coarse -luokkiin. Ulkoilmassa yleisesti esiintyvät ja terveydelle haitalliset PM25 hiukkaset vaativat hienosuodattimen (Seppänen, 1988 s. 260).

Ihmisten terveyden lisäksi suodattimien tärkeä tehtävä on suojata ilmastointikonetta ja laitteita. Lämpöpatteri voi tukkeutua puutteellisen suodattimen vuoksi kaupunkialueella vuodessa (Seppänen, 1988 s. 265). Lika heikentää aineiden lämmönjohtokykyä.

5.3 Lämmön talteenotto

Lämmön talteenotossa (LTO) lämmintä poistoilmaa käytetään tuloilman lämmittämiseen. Suomessa rakennusten energiatehokkuutta on pyritty parantamaan LTO-järjestelmillä vuodesta 1987 (Ympäristöministeriö, 1987 s. 11). Uusimmassa asetuksessa poistoilmasta on otettava talteen 45 % ilmanvaihdon lämmitykseen tarvitsemasta lämpömäärästä (Ympäristöministeriö, 2012 s. 15). Teknisesti järjestelmä on lämmönsiirrin, jotka voidaan jakaa kolmeen tyyppiin: nestekiertoinen, levy- ja pyörivä.

Nestekiertoisessa järjestelmässä poistoilman lämpöenergia siirretään lamellipatterilla verkostossa kiertävään väliaineeseen joka on vesi-alkoholiseos. Nestekiertoisessa järjestelmässä ilmavirrat eivät voi sekoittua. Se soveltuu kohteisiin, joissa on erityisiä vaatimuksia ilman puhtaudelle, poistoilma on likaista tai tulo- ja poistokanavan välinen etäisyys on pitkä. Tulo- ja poistoilmavirtojen suhteen ollessa 1 lämmönsiirtimen hyötysuhde on 40 - 60 % (Ympäristöministeriö, 2003 s. 9).

Levylämmönsiirtimessä tulo- ja poistoilmavirrat kulkevat omissa kanavissa toistensa lomitse, jolloin lämpöenergiaa siirtyy konvektiolla. Kanavat ovat periaatteessa tiiviitä, mutta paine-suhteiden johdosta ilma voi kulkeutua korkeapaineisemmalta puolelta matalampaan paineeseen. Tulo- ja poistoilmavirtojen suhteen ollessa 1 lämmönsiirtimen hyötysuhde on 50 - 80 % (Ympäristöministeriö, 2003 s. 9).

Pyörivässä lämmönsiirtimessä tulo- ja poistoilmakanavien välissä on pyörivä kiekko. Osa poistoilman lämmöstä ja kosteudesta sitoutuu siirtimen ja kulkeutuu kiekon mukana takaisin tuloilmaan (Refrigeration and Air-Condition, Hundy G). Tulo- ja poistoilmavirtojen suhteen ollessa 1 lämmönsiirtimen hyötysuhde on 60 - 80 % (Ympäristöministeriö, 2003 s. 9).

5.4 Puhaltimet

Ilman siirtämiseksi rakennukseen ja vanhan ilman poistamiseksi tarvitaan puhaltimia. Puhaltimien voimanlähteenä on sähkömoottori. Puhaltimet voivat olla yksi- tai kaksi-nopeuksisia tai taajuusmuuntaja-ohjattuja. Ilma siirtyy puhaltimen lapojen aiheuttaman liikkeen voimasta.

Talotekniikassa käytetyt puhaltimet ovat tyypillisesti kanavapuhaltimia tai keskipakoispuhaltimia. Puhaltimen tyypistä riippuen sen ominaisuudet materiaalien, paineen korotuksen, ilmamäärän, energiatehokkuuden, tehon ja ominaissuorituskäyrän suhteen vaihtelevat.

6 ENERGIATEHOKKUUS

Rakennukset ovat kokonaisuutena merkittävä energian loppukäyttäjä Suomessa. Energian loppukäytöstä kului vuonna 2016 rakennusten lämmittämiseen 79 TWh eli 26 % (Tilastokeskus, 2018). Sähköä koti- ja maataloudet, palvelut ja julkinen kulutus käytti yhteensä 42 TWh eli 50 % (Tilastokeskus, 2018). Rakennuksen käytönaikainen energiankulutus on 80 - 90 % rakennuksen elinkaaren energiankulutuksesta, kun mukaan huomioidaan myös materiaalien valmistus sekä kuljetukset (RIL 2016-2001).

Ilmastovyöhykkeillä I ja II sijaitsee 75 % Suomen rakennuskannasta, joissa myös ilmastonmuutoksesta seuraava jäädytystarpeen kasvu on myös suurinta. Vuosisadan loppuun mennessä mallit näyttävät talven lämpötilojen kasvavan enemmän kuin kesäajan. Jäädytystarve kasvaa 20 – 75 %, kun pyritään pysymään Rakennusmääräyskokoelman D3 2012 ohjearvoissa. Ilman koneellista jäädytystä asuinrakennuksissa yli 27 astetta ja toimistoissa yli 25 astetta ylittävien astetuntien määrä kasvaa huomattavasti. (Vinha, 2013 ss. 291-292,295,309).

Suurimmat lämpöhäviöt aiheutuvat ilmanvaihdosta, ikkunoista ja ulkoseinistä. Poistoilman lämmön tehokkaalla talteenotolla ja ilmanvaihdon tarpeenmukaisella käytöllä voidaan ilmanvaihdon lämpöhäviöitä pienentää 70 % koneelliseen poistoilmanvaihtoon verrattuna (RIL 2016-2001, s. 93). Rakennuksen energiatehokkaalla suunnittelulla ja talotekniikan tarkoituksenmukaisella käytöllä voidaan siis vaikuttaa huomattavasti elinkaaren energiankulutukseen. Seuraavissa kappaleissa tarkastelen yleisiä etäseurannan mahdollistamia toimenpiteitä energiankulutuksen hallitsemiseen.

6.1 Olosuhteet

Rakennuksen perimmäisenä tarkoituksena on tarjota suojaa ympäristöolosuhteilta. Modernissa yhteiskunnassa vietämme suurimman osan ajastamme sisällä rakennetussa ympäristössä. On siis tärkeää, että ympäröivät olosuhteet pysyvät miellyttävinä sekä turvallisina.

Etäseurannan työlle raamit asettavat lait, määräykset sekä ohjeet. On syytä ottaa huomioon, että vaaditut olosuhteet vaihtelevat kiinteistön iän ja käyttötarkoituksen mukaan. Esimerkiksi lakien soveltamisessa otetaan huomioon kiinteistön luovuttamishetkellä voimassa ollut lainsäädäntö tai merkittävien saneerausten aikainen lainsäädäntö.

Merkittävimmät tekijät energiatehokkuuden sekä olosuhteiden kannalta ovat lämpöolot sekä ilmanlaatu. Huonelämpötilan tulee olla 17 - 25 °C tilan käyttötarkoituksesta ja vuodenajasta riippuen (Ympäristöministeriö, 2003 s. 5). Ilmanlaadusta rakennusmääräyskokoelma määrittää pitoisuuksia useille haitta-aineille, joista hiilidioksidia huoneilmasta ja häkää autohalleista mitataan yleisesti rakennusautomaatiojärjestelmissä (Ympäristöministeriö, 2003 s. 6). Rakennustietosäätiön tuottama Sisäilmaluokitus 2018 antaa viranomaismääräyksiä tarkempia ohjearvoja olosuhteille (Rakennustieto Oy, 2018).

6.2 Toimivuustarkastukset

Toimivuustarkastuksessa käydään läpi rakennusautomaatiojärjestelmään liitetyt talotekniikan prosessit. Tarkastuksen tavoitteena on varmistaa prosessien toimivuus ottaen huomioon energiatehokkuus sekä sisäilman olosuhteet.

Asuinkiinteistöissä käyttötarkoitus harvoin muuttuu ajan myötä. Toimitilojen osalta käyttötarkoitus voi muuttua useasti kiinteistön eliniän aikana. Käyttötarkoituksen muuttuessa tarpeenmukaiset olosuhteet sekä sisäiset kuormitukset voivat vaihdella suuresti, jonka vuoksi talotekniikan asetusarvoja tulee optimoida useasti kiinteistön käyttöiän aikana. Tekniikka ei ole ikuista ja ajan myötä kanaviin ja putkistoihin kertyvät epäpuhtaudet vaikuttavat niiden toimintaan.

6.2.1 Lämmin käyttövesi

Lämminvesikalusteesta lähtevän lämpimän käyttöveden lämpötilan tulee olla 55 °C (liite 1). Veden lämmittämiseen kuluva energia voidaan laskea kaavan 14 mukaan:

$$Q = \frac{\rho \cdot c_p \cdot V \cdot \Delta t}{3600} \quad (14)$$

jossa

- Q = veden lämmittämiseen kuluva energia, kWh
- ρ = veden tiheys, kg/m³
- c_p = veden ominaislämpökapasiteetti, kJ/kg°C
- V = vedenkulutus, m³
- Δt = lämpötilan muutos,
- 3600 = yksikkömuunnoskerroin, kJ -> kWh

Asteen muutos kuutiolle vettä ihanteellisella lämmönvaihtimella ($\eta = 100\%$) vaatii noin 45 kWh energiaa. Liitteessä 2 on esitetty python-funktio, joka laskee veden lämmittämiseen kuluvan energian, kun $\Delta t = 1 - 65\text{ °C}$ ja energiankulutuksen muutoksen. Talousveden lämpötila runkoverkossa vaihtelee vuodenajan mukaan ja on 5 - 17 astetta (Lappalainen, 2010 s. 43). Tällöin lämpimällä käyttövedellä kaavan 14 lämpötilan muutos on 38 - 50 astetta.

Kuvasta 12 nähdään, että tällä alueella lämpöhäviöt huomioiden yhden asteen muutos lämpimän käyttöveden asetusarvossa tarkoittaa 1,9 – 2,5 % muutosta energiankulutukseen. Kesällä 2018 tehty koe osoittaa samankaltaisia tuloksia.

Index	Type	Size	Value
38	float64	1	2.503...
39	float64	1	2.443...
40	float64	1	2.385...
41	float64	1	2.330...
42	float64	1	2.278...
43	float64	1	2.228...
44	float64	1	2.180...
45	float64	1	2.134...
46	float64	1	2.090...
47	float64	1	2.048...
48	float64	1	2.008...
49	float64	1	1.969...
50	float64	1	1.932...

Kuva 12. 38 - 50 asteen lämpötilanmuutoksen (Index = Δt) vaikutus energiankulutukseen (Value = muutos %)(Jäntti, 2018).

6.2.2 Aikaohjelmien optimointi

Aikaohjelmalla tarkoitetaan yksinkertaista vuorokaudenaikaan sidottua, lähtösignaalin tilatiedon muuttavaa ohjelmaa. Aikaohjelmaa voi pitää eräänlaisena kellokytkimenä. Talotekniikassa aikaohjelmilla määritetään tyypillisesti ilmastoinnin ja valaistuksen käyntiajat.

Uudessa kiinteistössä ensimmäisenä käyttövuotena ilmanvaihto asetetaan käymään jatkuvasti rakenteiden kuivattamiseksi ja uusista kalusteista sekä rakennusmateriaaleista syntyvien kemiallisten päästöjen tuulettamiseksi (Rakennustieto Oy, 2018 s. 20). Aikaohjelmien muuttaminen vastaamaan kiinteistön todellista käyttöä jää kiinteistön omistajan ja kiinteistöhuollon vastuulle. Kiinteistön käyttöiän ollessa 50 – 100 vuotta kiinteistön käyttö voi muuttua useasti ja rakennusautomaation aikaohjauksia tulisi tarkastella säännöllisesti vastaamaan kiinteistön todellista käyttöä.

Ilmanvaihdon tyypillinen ominaissähköteho vaihtelee välillä 1,0 - 2,5 kW/(m³/s). Alempi raja-arvo on yleinen poistoilmajärjestelmän teho ja ylempi yleinen tulo- ja poistoilmavaihdon teho, joista voidaan poiketa sisäilmaston hallitsemiseksi (Ympäristöministeriö, 2003 s. 17). Vaadittu ulkoilmavirta vaihtelee välillä 0,2 - 20 (dm³/s)/m² riippuen tilan käyttötarkoituksesta (Ympäristöministeriö, 2003 ss. 21-27).

Normaalin käyttöajan ulkopuolella muussa kuin asuinrakennuksessa on oltava perusilmanvaihto 0,15 (dm³/s)/m², jonka avulla poistetaan materiaaleista peräisin olevia epäpuhtauksia. Käyttöajan ulkopuolella voidaan ilmanvaihto toteuttaa pitämällä hygieniatilojen ilmanvaihtoa jatkuvasti käynnissä tai ilmanvaihdon jaksottaisella käytöllä. Perusilmanvaihtoa saa käyttää vain, kun kiinteistössä ei ole ihmisiä. Perusilmanvaihtojakson jälkeen ilmanvaihtoa on käytettävä normaaliteholla 2 tuntia ennen käyttäjien tuloa kiinteistöön. (Ympäristöministeriö, 2012 ss. 10-11) (Lappalainen, 2010 s. 42) (Rakennustieto Oy, 2018 ss. 15-16).

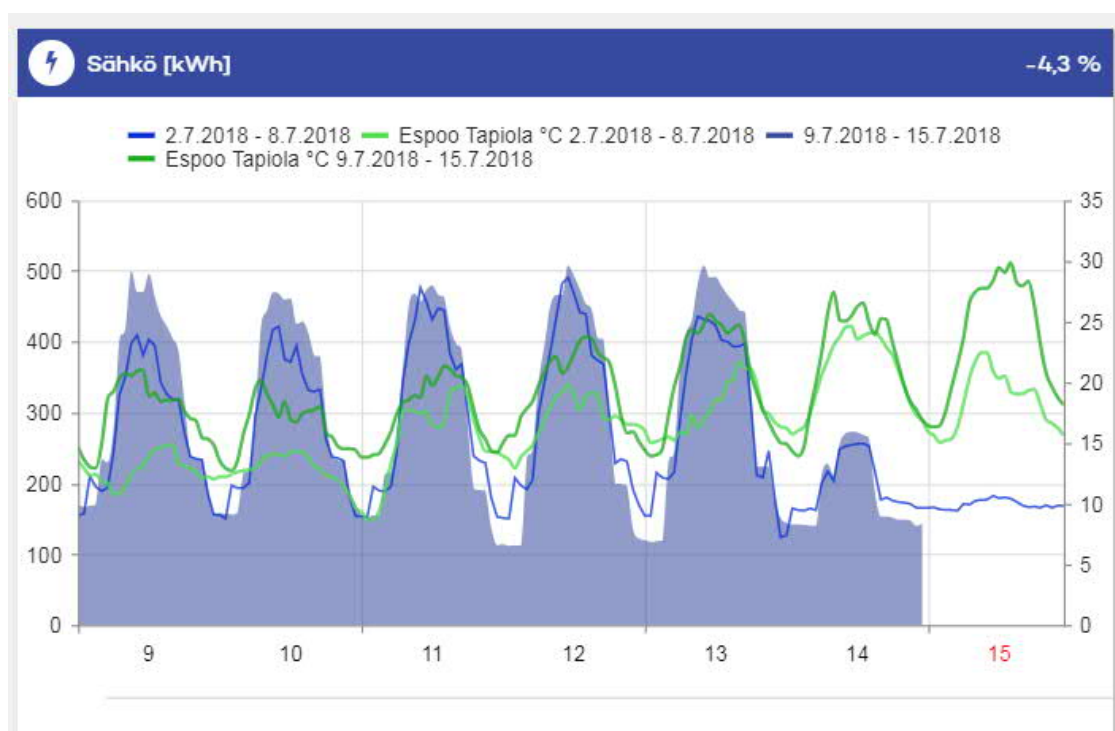
Sammuttamalla ilmanvaihtokoje tunniksi vähenee kojeen sähköenergian käyttö noin 4 % (1/24) ja tuloilman lämmittämiseen kuluva energiaa yli 4 % seisahdusajan ollessa yleisesti yöaikaan, jolloin lämmityskaudella ulkoilman lämpötila on matalimmillaan ja tuloilman lämmitystarve suurin (kuva 13).

	Ilmanvaihdon käyttötunnit																								Muutos	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	%	
Harkitsematon																										100
Tietoinen																										-25
Optimoitu																										-50

Kuva 13. Aikaohjelman vaikutus koneen käyttötunteihin (Jäntti, 2018)

Energiatohokkuuden kannalta yksi merkittävä ryhmä aikaohjelmille on valaistus. Valaistus kuluttaa käyttötarkoituksesta riippuen 10 - 30 % kiinteistön sähkönkulutuksesta (Motiva, 2017). Yksi ulkova- laistuksen tehtävistä on luoda turvallisuuden tunnetta. Osa ulkovaloista on syytä pitää päällä kun on pimeää. Sisävalojen puolestaan tulee vastata aina kiinteistön käyttöastetta.

Vedenjäähdytyskojeita ohjataan tyypillisesti ulkolämpötilan ja aikaohjelman avulla. Rajaamalla jääh- dytyskoneen käynti kiinteistön käyttöasteeseen voidaan yksinkertaisella toimenpiteellä saada 4 % lasku sähkönkulutukseen (kuva 14) vaikuttamatta kiinteistön lämpöolosuhteisiin.



Kuva 14. Etäseurannan yhteydessä vedenjäähdytyskojeen aikaohjelma on rajattu kiinteistön käytön ajalle, jolla on saavutettu 4 % muutos kiinteistön sähkönkulutukseen (Jäntti, 2018)

6.2.3 Yöjäähdytys

Yöjäähdytyksellä tarkoitetaan automaatiojärjestelmän ohjelmaa kiinteistön termisen massan viilen- tämiseksi aamuyön tunteina käyttäen hyväksi huoneilmaa viileämpää ulkoilmaa. Yötuuletuksen oh-

jelma estää jäähdytysyksiköiden käytön tuloilman viilentämiseksi. Ohjelman avulla saadaan viilennettyä myös tiloja, joissa ei ole varsinaista jäähdytystä. Ohjelmassa on asetettu käyntiehtoja ulko- ja huonelämpötilalle sekä näiden erotukselle.

Vinhan mukaan (Vinha, 2013 s. 306) yötuuletuksen hyödyt ovat tapauskohtaisia eikä ehdottomasti tarkoita energiankulutuksen vähentymistä. Energiankulutukseen vaikuttaa olennaisesti kiinteistön terminen massa sekä muut lämpökuormat ja häviöt. Yötuuletukselle suotuisa rakenne on esimerkiksi oltelolaatoista tehty välipohja (Lappalainen, 2010 s. 43). Raskasrakenteisessa toimikiinteistössä puolestaan tehostettu yötuuletus voi puhaltimien käyttämän sähköenergiankulutuksen vuoksi kasvattaa kokonaisostoenergiankulutusta verrattuna koneellisen jäähdytyksen käyttöön (Vinha, 2013 s. 306). Koneellista jäähdytystä käytettäessä suuri lämpökapasiteetti pienentää lämmitysenergian kulutusta. Jokaisella materiaalilla on ns. tehollinen paksuus, jonka jälkeen sillä ei ole vaikutusta lämpökapasiteettiin (Lappalainen, 2010 s. 30).

6.2.4 Vialliset mittapisteet

Automaatiojärjestelmän mittapiste voi näyttää väärää arvoa vian, huolimattoman asennuksen tai käyttäjän toimenpiteen seurauksena. Virheellisen arvon seurauksena kaikki kojeiden virhetoiminnot ovat mahdollisia. Harmittomassa tapauksessa, esimerkiksi tuloilman lämpötilan mittausta ennen lämmön talteenottoa, häiriö kohdistuu ainoastaan automaation hyötysuhteen laskentaan. Energiankulutukseen ja sisäilman olosuhteisiin merkittävästi vaikuttava mittausvirhe/vika voi olla ulkolämpötilan mittausta.

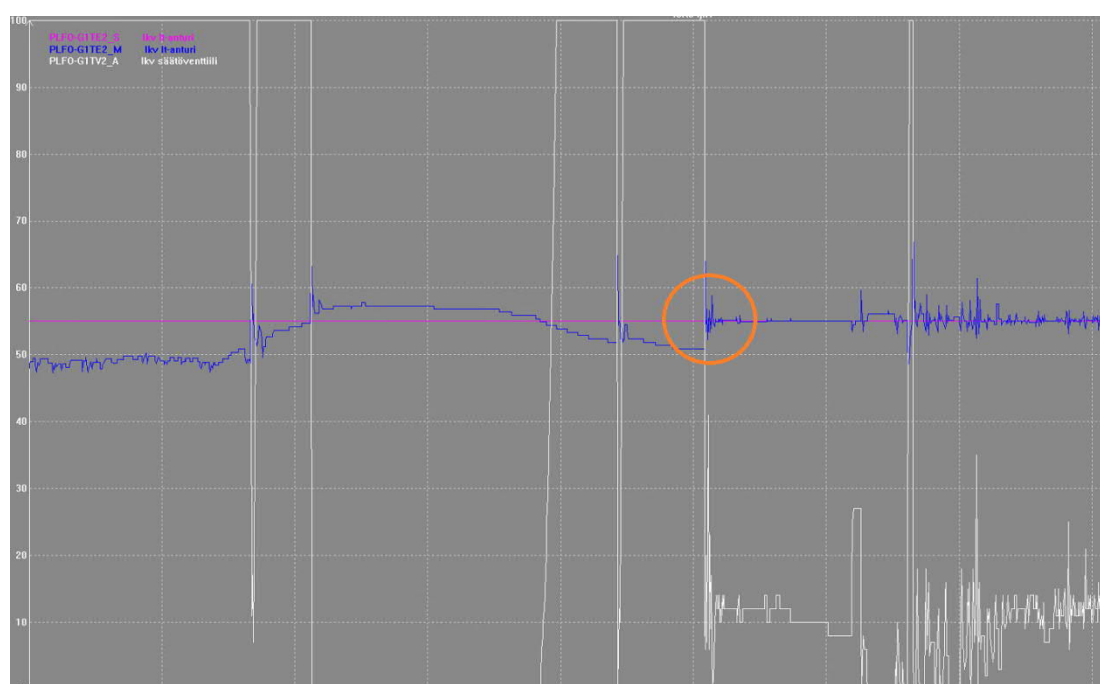
Kesän 2018 aikana saimme ilmoituksen toimikiinteistön korkeista lämpötiloista. Asiakas pyysi yötuuletuksen käynnistämistä, joka ei laajoillakaan aikaohjelmilla tuonut muutosta olosuhteisiin. Syyksi paljastui ulkolämpötilan mittausta, joka näytti todellisuudesta huomattavasti matalampaa arvoa. Automaatio luuli, että kyseessä on lämmityskausi jäähdytyskauden sijaan, jolloin lämmitys- ja jäähdytysventtiilien eston sijaan tuloilmaa lämmitettiin huomattavasti (kuva 15).



Kuva 15. Viallisen mittapisteen vaikutus automaatiojärjestelmään (Jäntti, 2018)

6.2.5 Toimilaitteiden ohjaus

Automaatiojärjestelmiin on ohjelmoitu laajasti erilaisia hälytyksiä järjestelmän vikatilanteista. Teknologia ei kuitenkaan ole aukotonta ja kaikki vikatilanteet ei ole automaation mielestä häiriöitä. Etäseurannan yhteydessä huomio kiinnittyi lämpimän käyttöveden menolämpötilaan, joka oli noin 5 °C alle asetusarvon. Tilanne ei automaatioissa ole vika, koska veden käyttöpiikkien aikana säätöpiiri reagoi muutokseen hieman viiveellä ja lämpötila on normaalin vaihteluvälin sisällä. Historiatrendistä pystyy havaitsemaan, että sama tilanne on ollut pidemmän aikaa (kuva 16). Automaatio siis havaitsee että mittausarvo poikkeaa asetusarvosta ja ohjaa moottoriventtiin täysin auki. Todellisuudessa venttiili on kuitenkin jumiutunut. Tekemällä käsiohjauksella muutos ohjausviestiin (korostus oranssilla) venttiilin toiminta normalisoituu.

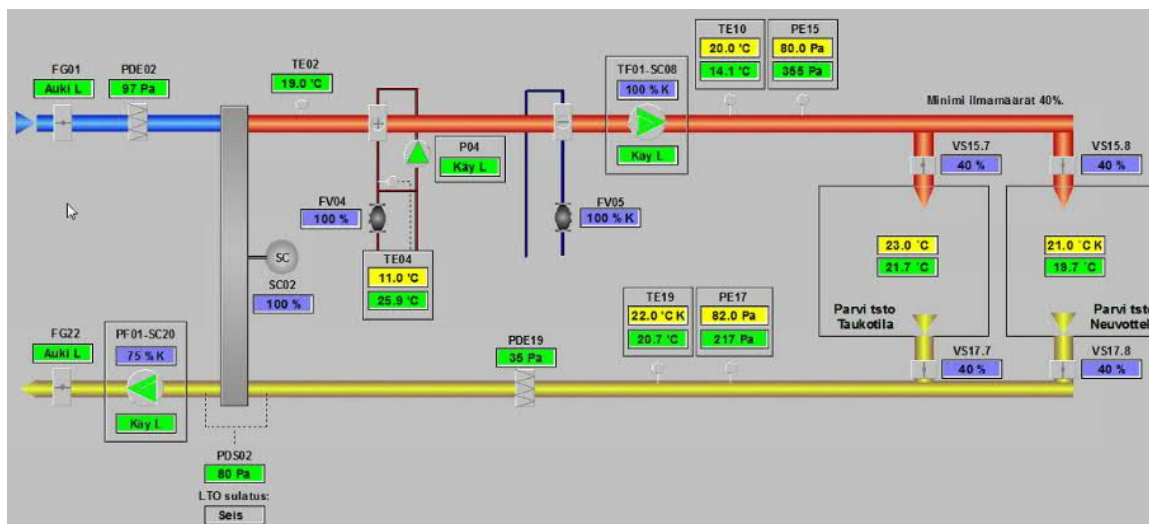


Kuva 16. Jumiutuneen toimilaitteen aiheuttama säätövikahäiriö. Purppuralla on käyttöveden asetusarvo, sinisellä mittausarvo ja valkoisella toimilaitteen ohjausviestin tila (Jäntti, 2018).

6.2.6 Käsiäsetukset

Käsiäsetuksilla tarkoitetaan automaation ohjauspisteen hallinnan ottamista pois automaatiojärjestelmästä jolloin käyttäjä määrittää manuaalisesti ohjauspisteelle arvon. Ohjauspisteen arvo pysyy muuttumattomana, kunnes käyttäjä määrittää arvon uudelleen tai palauttaa ohjauksen automaatiolle. Käsiäsetuksia tulee käyttää vain väliaikaisesti yllättäviin tilanteisiin, kunnes vika saadaan korjattua. Käsiäsetuksen unohduksella voi olla merkittäviä vaikutuksia energiankulutukseen ja olosuhteisiin.

Syksyllä 2018 havaitsimme toimivuustarkastuksen yhteydessä, kun jäähdytysyksikön venttiilin ohjaus oli asetettu käsin täysin auki (kuva 17). Ohjauksen seurauksena tuloilman lämpötila on alle asetusarvon, joka puolestaan saa lämmityspatterin venttiilin täysin avautumaan. Automaatio-ohjauksella kohteessa ei olisi ollut lämmitys- tai jäähdytysenergian tarvetta.

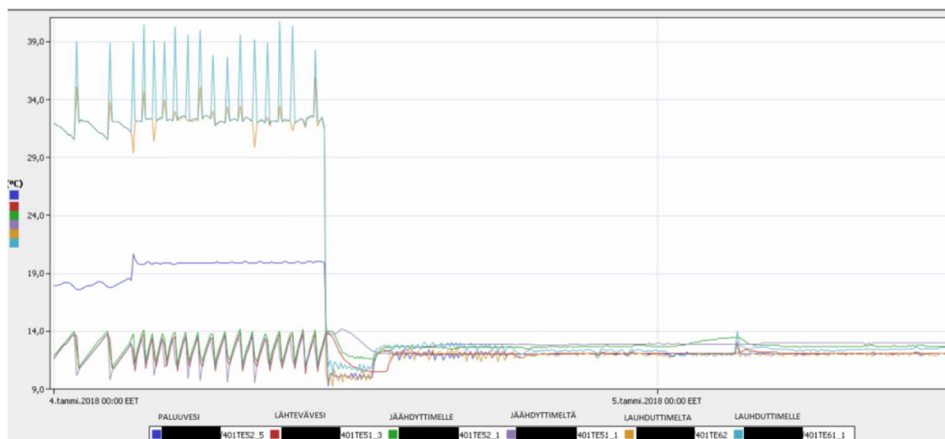


Kuva 17. Unohtuneen käsiohjauksen seurauksena tuloilmaa lämmitetään ja jäähdytetään tarpeettomasti (Tähtinen, 2018)

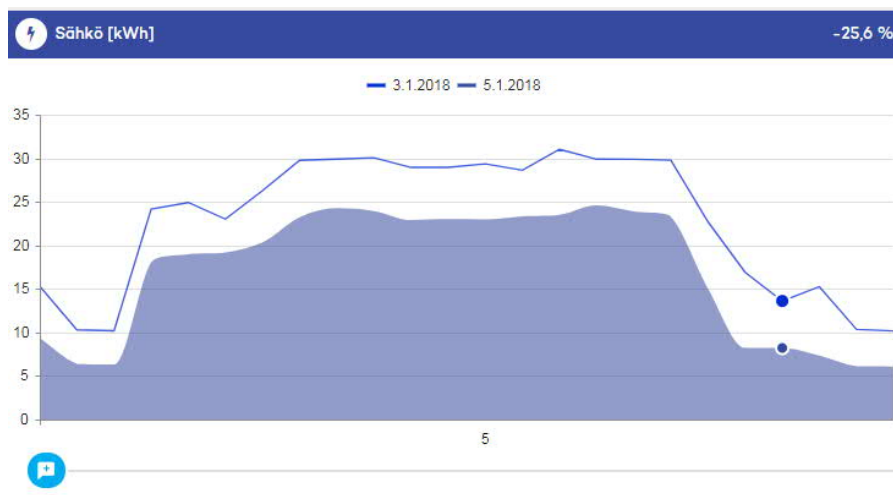
6.2.7 Oikeat asetusarvot

Moderni talotekniikka asettaa vaatimuksia myös käyttäjälleen. Laitteistot voivat näennäisesti toimia oikein ja suorittaa niille asetettua tehtävää hyvin, mutta oikeilla asetusarvoilla säästetään energiaa ja kasvatetaan laitteistojen käyttöikä. Ikävimmässä tapauksessa tuloilmaa lämmitetään ja jäähdytetään samanaikaisesti vaikka todellisuudessa kummallekkaan ei olisi tarvetta (kuva 17).

Etäseurannan yhteydessä havaittiin vedenjäähdytyskoneen olevan käynnissä tammikuussa, jolloin jäähdytystarvetta on lähinnä kiinteistössä sijaitsevilla palvelintiloilla. Vapaajäähdytyksen käyntirajaksi oli asetettu 4 °C ulkolämpötila. Käyntirajan nosto 12 °C kasvatti vapaajäähdytyksen käyntilupaa noin 2300 tuntia. Laskennassa on käytetty hyväksi liitteen 3 funktiota, johon on muutettu ylaraja1 = 4 ja ylaraja2 = 12 ja otettu näiden lukujen erotus. Lisäksi paluuveden lämpötilaraja oli tarpeettoman matala 10 °C, kun jäähdytysverkostossa kiertävän veden lämpötila on tyypillisesti 12 astetta. Asetusarvojen muutoksilla säätöpiirin toiminta parani (kuva 18) ja sähkön päiväkulutus väheni 15–25 % (kuva 19).

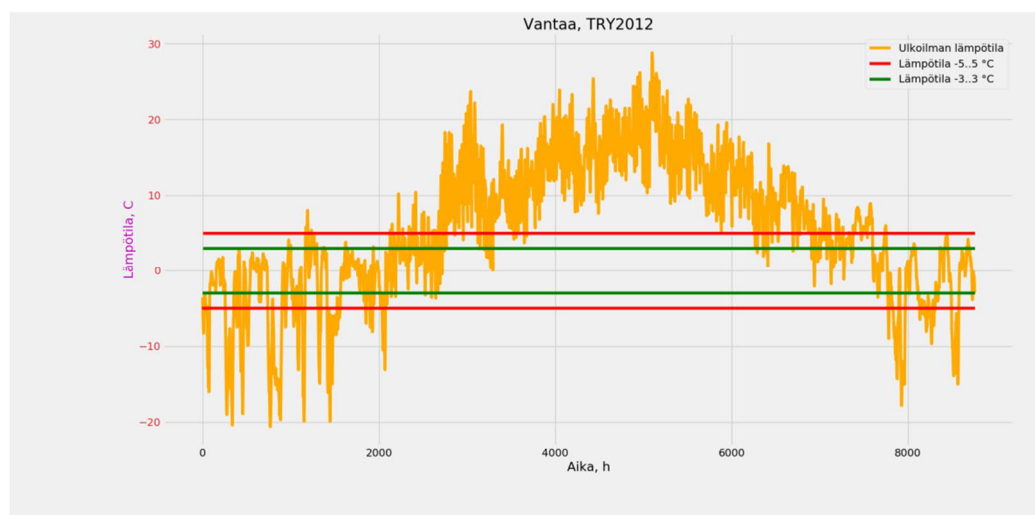


Kuva 18. Asetusarvojen muutosten vaikutus säätöpiirin toimintaan (Jäntti, 2018).



Kuva 19. Asetusarvojen muutos sähkön kulutusprofiiliin (Jäntti, 2018).

Saattolämmityksillä varmistetaan rakennusten syöksytörvien sulana pysyminen. Saattolämmitykset ovat yleisesti toteutettu putkeen syötetyllä lämmityskaapelilla, jota ohjataan ulkolämpötilan mukaan. Saattolämmityksen vanhempina ohjausarvoina on yleisesti käytetty $-5..5$ asteen ulkolämpötilaa, josta on kokemuksen perusteella siirretty käyttämään $-3..3$ asteen ulkolämpötilaa (kuva 20). Asetusarvon muutoksella saadaan vähennettyä vuosittaisia käyttötunteja noin 46 % (liite 3). Saattolämmityksen osuus kiinteistösähköstä ei ole merkittävä, mutta säätömuutoksena toimenpiteen takaisinmaksuaika on välitön.



Kuva 20. Saattolämmityksen käyntirajat Vantaan testivuotena (Jäntti, 2018)

6.2.8 Lämmön talteenotto

Lämmön talteenoton toiminnan seurannalla on merkittävimmät vaikutukset energiankulutukseen. Automaatiossa tulisi olla hälytys matalasta hyötysuhteesta, mutta hyötysuhteen laskentaa ei ole tehty kaikkiin järjestelmiin. Lämmön talteenottoyksikön toiminnan arvioimiseksi käsin laskemalla (kaavat 13 ja 14) valvomon grafiikalle tulisi olla liitettynä raitisilman, LTO jälkeinen, poistoilman sekä jäteilman lämpötilan mittaus ja ohjausviesti. Tuloksesta saadaan tarkempi tulo- ja poistoilmamäärän suhteen avulla (kaava 15). Tyypilliset arvot on kerrottu kohdassa 5.3.

$$\eta_t = \frac{t_{LTO} - t_u}{t_s - t_u} \quad (13)$$

jossa η_t = tuloilman hyötysuhde, %
 t_{LTO} = tuloilman lämpötila LTO jälkeen, °C
 t_u = ulkoilman lämpötila, °C
 t_s = poistoilman lämpötila, °C

$$\eta_p = \frac{t_s - t_j}{t_s - t_u} \quad (14)$$

jossa η_p = poistoilman hyötysuhde, %
 t_s = poistoilman lämpötila, °C
 t_j = jäteilman lämpötila, °C
 t_u = ulkoilman lämpötila, °C

$$\eta_p = \eta_t * \frac{q_{tLTO}}{q_{pLTO}} \quad (15)$$

jossa q_{tLTO} = tuloilmavirta, m³/s
 q_{pLTO} = poistoilmavirta, m³/s

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytyössä oli tavoitteena laatia perehdytysmateriaalia liiketoimintayksikköme uusille henkilöille, joilla on rajoitetut pohjatiedot LVISA-järjestelmistä. Tuotettu perehdytysmateriaali sisältää kuvauksen järjestelmistä joilla on vaikutusta rakennuksen energiatehokkuuteen. Näiden osalta automaatioon, lämmitykseen, ilmanvaihtoon ja ilmastointiin liittyvät perusasiat on esitelty koska niiden ymmärtäminen on tärkeää jokaiselle kiinteistöalalla toimivalle asiantuntijalle. Työn julkisesta versiosta on jätetty pois luku 6, joka käsittelee etäseurannan tekemistä ja havaintoja.

Työn tarkoituksena ei ole antaa absoluuttisia arvoja eri toimenpiteiden vaikutuksista energiankulutukseen. Tällaisten tulosten tuottaminen tämän työn puitteissa ei ole mahdollista satunnaismuuttujien suuren määrän vuoksi. Ympäristöolosuhteet voivat vaikuttaa kohteen energiankulutukseen ± 30 % eri vuosien välillä.

Tyypillisestä toimikiinteistöstä on mahdollista säästää noin 10 % energiankulutuksesta automaatiojärjestelmän säätötoimenpiteillä. Merkittävimmät säätötoimenpiteet liittyvät lämmityskäyrien optimointiin, tuloilman lämpötilan asetusarvoihin sekä aikaohjelmiin. Toimenpiteillä vaikutetaan myös oleellisesti rakennuksen sisäilmaan, jolloin käyttäjiltä saatu palaute on arvokasta.

Suomessa rakennusten lämmitykseen kuluu noin 40 % Suomen kokonaisenergiankulutuksesta. Osuuden pienentäminen on kiinteistöjen omistajien ja ympäristön yhteinen intressi. Useat toimijat ovat lähteneet myymään etäseurantapalveluja energiansäästö edellä, joka on enemmänkin palvelusta saatavaa lisäarvoa. Etäseurannan arvo tulee prosessien tarkastuksissa havaittujen vikoja korjauksista. Hyvin huollettu ja ylläpidetty rakennus on energiatehokas sekä terveellinen. Etäseurannan avulla tuotetaan havaintoja muille energiatehokkuus investoinneille.

Julkisuuden keskustelu sisäilmaongelmista on saanut osan kiinteistöjen omistajista varovaisiksi. Mahdollisiin ongelmiin vedoten ilmanvaihtoa halutaan pitää käynnissä jatkuvasti. Ilmanvaihdon tarkoitus on palvella ihmisiä, ei rakennusta. Ilmanvaihtoa tulisi aina ohjata tarpeen mukaan. Mahdollisten sisäilmaongelmien hoitaminen ilmanvaihdon tehostuksella on ongelman peittäilyä.

Ilmastonmuutoksen seurauksena vuotuinen jäähdytystarve tulee kasvamaan ja yöjäähdytyksen teho vähenemään. Jäähdytyskoneiden käyttämä sähköenergia on merkittävä kuluerä. Automaatiojärjestelmissä vedenjäähdytyskoneiden käyntilupa on tyypillisesti rajattu jäähdytyskaudelle. Kuitenkin säännöllisesti tulee vastaan kohteita, joissa vedenjäähdytyskone on käynnissä yksittäisen tilan takia, jonka tarpeisiin jäähdytysteho on huomattavasti ylimitoitettu. Jäähdytyskoneiden tarpeenmukaisella ohjauksella voidaan saada aikaan kymmenien prosenttien vähennys sähkön kulutukseen.

Ideallisessa tilanteessa automaatiojärjestelmään on rakennettu täydellinen hälytyspisteiden verkko, joka havaitsee virheet prosesseissa. Alalla ei kuitenkaan ole käytössä mitään standardointia, jolloin häiriö prosessissa voi jäädä huomaamatta jopa vuosiksi. Erilaiset anturihäiriöt voivat sekoittaa pro-

sessien toimintaa olematta automaation näkökulmasta virheitä. Anturihäiriöt jäävät helposti havaitsematta nopealla grafiikkakuvan katsomisella.

Rakennusten energiatehokkuus korostuu tulevaisuudessa ilmastonmuutoksen seurauksena muuttuvien ympäristöolosuhteiden sekä lainsäädännön asettamien vaatimusten johdosta. Vietämme lähes kaiken aikamme sisällä rakennetussa ympäristössä, jolloin turvallisten ja terveiden sisäolosuhteiden vaatimukset tulee olla korkeat asettaen haasteita talotekniikan toiminnalle. Uusien rakennusten automaatiojärjestelmissä on lähes poikkeuksetta etäyhteys, joka mahdollistaa etäseurannan ja asiantuntijapalveluiden käytön kaikkialla maailmassa. Tässä opinnäytetyössä luotiin materiaalia asiantuntijapalveluiden perehdytysmateriaaliksi ja toiminnan laadun kehittämiseksi. Tulevaisuudessa automaatiojärjestelmiin liitettävien laitteiden määrä ja älykkyys tulee kasvamaan nopeasti joiden avulla rakennusten energiatehokkuus ja sisäolosuhteet parantuvat kotona, työpaikoilla ja julkisissa tiloissa.

8 LÄHDELUETTELO

- Bloch, Heinz P. ja Budris, Allan R. 2014. *Pump User's Handbook - Life Extension (4th Edition)*. s.l. : Fairmont Press, Inc., 2014. eISBN 978-1-68015-481-8.
- Energiateollisuus Ry. Kaukolämmön tuotanto. [Online] [Viitattu: 20. 09 2018.] https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/kaukolammon_tuotanto.
- . 2014. *Teho ja vesivirta kaukolämmön maksuperusteina*. [Suositus K15/2014] s.l. : Energiateollisuus, 2014.
- Hakala, Pertti ja Kaappola, Esko. 2013. *Kylmälaitoksen suunnittelu*. Tampere : Juvenes Print, 2013. ISBN 978-952-13-5360-4.
- Hydraulic Institute; Europump; US Department of Energy's Office of Industrial Technologies. 2001. *Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems*. [Raportti] 2001. DOE/GO-102001-1190.
- Incropera, Frank P.;ym. 2007. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. s.l. : John Wiley & Sons, Inc, 2007. 978-0-471-45728-2.
- Lappalainen, Markku. 2010. *Energia- ja ekologiakäsikirja*. Tampere : Tammerprint Oy, 2010. ISBN 978-951-682-945-9.
- Merz, H.;Hansemann, T. ja Hübner, C. 2009. *Building Automation*. s.l. : Springer, 2009. 978-3-540-88829-1.
- Morris, Alan S. 1993. *Principles of Measurement and Instrumentation*. Wiltshire : Prentice Hall International (UK) Ltd, 1993. 0-13-489709-9.
- Motiva. 2017. Kaukolämpö. [Online] 25. 8 2017. [Viitattu: 13. 9 2018.] https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/kaukolampo.
- . 2017. Valaistus. [Online] Motiva, 10. 8 2017. [Viitattu: 19. 9 2018.] https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kiinteiston_energian kaytto/valaistus.
- Nesbitt, Brian. 2006. *Handbook of Pumps and Pumping: Pumping Manual International*. eBook : Oxford: Elsevier Science, 2006. 978 185 617 4763.
- . 2007. *Handbook of Valves and Actuators: Valves Manual International*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2007. 9781856174947.
- Rakennustieto Oy. 2010. *Kiinteistöjen kaukojäähdytys*. s.l. : Rakennustieto Oy, 2010. LVI 34-10462.
- . 2018. *Sisäilmastoluokitus 2018*. Espoo : Rakennustieto Oy, 2018. RT 07-11297.
- Santamouris, M ja Asimakopoulos, D. 1997. *Passive cooling of buildings*. Chippenham : James & James (Science Publishers) Ltd, 1997. ISBN 1 873936 47 8.
- Savolainen, Jari ja Vaittinen, Reijo. 2007. *Säätötekniikan perusteita*. Helsinki : Hakapaino Oy, 2007. ISBN 978-951-97329-3-0.
- Seppänen, Olli. 1988. *Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto*. s.l. : LVI-Kustannus Oy, 1988. ISBN 951-96098-0-6.
- Serth, Robert W. ja Lestina, Thomas G. 2014. *Process Heat Transfer: Principles, Applications and Rules of Thumb (2nd Edition)*. s.l. : Elsevier, 2014. 978-0-12397-792-2.
- Serwey, Raymond A ja Jewett, John W. 2004. *Physics for Scientists and Engineers*. s.l. : Thomson Brooks/Cole, 2004. ISBN 0534408427.

- Sisäasiainministeriö. 1976. D1 Suomen rakentamismääräyskokoelma. *Kiinteistöjen vesi- ja viemärilaitteistot*. Helsinki : Sisäasiainministeriö, 30. 10 1976.
- Sosiaali- ja terveysministeriö. 2003. Asumisterveysohje. *Asuntojen ja muiden oleskelutilojen fyysiset, kemialliset ja mikrobiologiset tekijät*. Helsinki : Sosiaali- ja terveysministeriö, 2003. ISSN 1236-116X.
- Svahn, Timo. 2015. LVI-suunnittelu II. [Online] 29. 09 2015. [Viitattu: 20. 09 2018.] https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/138147/mod_resource/content/1/ENE584128_Luento_29092015.pdf.
- Sähkötieto Ry. 2012. *Rakennusautomaatiojärjestelmät*. Espoo : Tammerprint Oy, 2012. ISBN 978-952-231-071-2.
- THL. 2017. Ympäristöterveys. *Legionella, ympäristötekijät ja torjuntamahdollisuudet*. [Online] 27. 10 2017. [Viitattu: 18. 5 2018.] <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/vesi/legionellabakteerit-vesijarjestelmissa/ymparistotekijat-ja-torjuntamahdollisuudet>.
- Tilastokeskus. 2018. Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus [verkkojulkaisu]. [Online] 2018. [Viitattu: 16. 9 2018.] <http://www.stat.fi/til/ehk/tau.html>. ISSN=1799-795X.
- Tähtinen, Simo. 2018. Vantaa, 11. 7 2018.
- Vantaan Energia. Vantaan Energia. [Online] [Viitattu: 03. 08 2018.] <https://www.vantaanenergia.fi/lampo/kaukolammon-termit/>.
- Vinha, Juha. 2013. *Ilmastomuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa*. Tampere : Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos, 2013. ISBN 978-952-15-2949-8.
- Värjä, Pertti ja Mikkola, Jukka-Matti. 1999. *Uusi kiinteistöautomaatio*. Korja : Cadnet Oy, 1999. ISBN 978-952-93-1201-6.
- Ympäristöministeriö. 2003. *Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto lämpöhäviöiden tasauslaskennassa*. Helsinki : Ympäristöministeriö, 2003.
- . 1987. Suomen rakentamismääräyskokoelma D1. *Kiinteistöjen vesi- ja viemärilaitteistot*. Helsinki : Ympäristöministeriö, 1987.
- . 2003. *Suomen rakentamismääräyskokoelma D2: Rakennuksen sisäilmasto ja ilmanvaihto*. Helsinki : Ympäristöministeriö, 2003.
- . 2012. *Suomen rakentamismääräyskokoelma D2: Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto*. Helsinki : Ympäristöministeriö, 2012.
- . 1987. *Suomen rakentamismääräyskokoelma D2: Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto*. Helsinki : Ympäristöministeriö, 1987. ISBN 951-37-0801-2.
- . 2012. *Suomen rakentamismääräyskokoelma D3: Rakennusten energiatehokkuus*. Helsinki : s.n., 2012.
- . 2007. Ympäristöministeriön asetus kiinteistöjen vesi- ja viemärilaitteistoista. Helsinki : Ympäristöministeriö, 2007.
- . 2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten vesi- ja viemärilaitteistoista. *1047/2017*. Helsinki : Ympäristöministeriö, 2017.

LIITE 1: LAINSÄÄDÄNTÖ

Lämmin käyttövesi

Ensimmäisessä rakennusmääräyskokoelman osassa D1 vuodelta 1976 ei anneta määräyksiä vähimmäislämpötilasta. Määräys koskee ainoastaan ylälämpötilaa, joka ei saa olla korkeampi kuin 65 °C (Sisäasiainministeriö, 1976). Vuoden 1987 kokoelmassa annetaan ohje ”että veden lämpötila ei vesilaitteiston missään osassa odotusajan johto-osuuksia lukuun ottamatta laske alle 50 °C”, mutta kyseessä ei siis ole velvoittava määräys (Ympäristöministeriö, 1987).

Sosiaali ja terveysministeriön asumisterveysohje, joka on tullut voimaan 1.5.2003, asettaa lämpimän käyttöveden vähimmäislämpötiloiksi käyttöpisteessä 1-2 minuutin valutuksen jälkeen 55 °C asuinhuoneistojen uudistuotannossa sekä korjattaessa ja uusittaessa vanhojen rakennusten laitteistoja. Ohjeessa asetetaan 50 °C välttäväksi lämpötilaksi nykyisille rakennuksille, jonka alittuessa on ryhdyttävä korjaustoimiin mahdollisen terveyshaitan poistamiseksi. (Sosiaali- ja terveysministeriö, 2003)

Rakennusmääräyskokoelman osassa D1 vuodelta 2007 määräys 2.3.8 todetaan, että ”lämminvesilaitteisto on suunniteltava ja asennettava siten, että veden lämpötila siinä on vähintään 55 °C”. Ohje 2.3.8.1 tarkentaa, että ”vesilaitteiston odotusajan johto-osuuksissa veden lämpötila voi laskea alle 55 °C”. Ennen asetuksen voimaantuloa 1.7.2007 vireille tulleisiin lupahakemuksiin voidaan soveltaa aikaisempia määräyksiä ja ohjeita. (Ympäristöministeriö, 2007)

Viimeisimmät määräykset ovat tulleet voimaan 1.1.2018. Ympäristöministeriön asetuksessa rakennusten vesi- ja viemärlaitteistoista koskee uusia rakennuksia sekä rakennuksien laajennuksia ja kerrosalaan laskettavan tilan lisäämistä, korjaus ja muutostyötä sekä käyttötarkoituksen muutosta. Toisen luvun kuudes momentti määrittelee veden lämpötilan, jossa sanotaan ”lämminvesilaitteistossa olevan veden lämpötilan on oltava vähintään 55 °C ja sitä on saatava lämminvesikalusteesta 20 sekunnin kuluessa. Lämminvesilaitteistosta saatavan veden lämpötila saa olla korkeintaa 65 °C”. Vesilaitteisto määritellään ensimmäisen luvun toisen momentin 34 pykälässä ”laitteistoa talousveden ja lämpimän käyttöveden johtamista varten”. Sosiaali ja terveysministeriön asetus 545/2015 pykälä 7 määrää alhaisemman lämpimän käyttöveden lämpötilan, vähintään 50 °C. (Ympäristöministeriö, 2017).

Määräykset lämpimään käyttöveteen liittyvät luonnossa esiintyvien patogeenisten legionellabakteerien aiheuttamien sairastumien ehkäisyyn. Legionellat lisääntyvät 20 – 45 °C lämpötilassa ja niiden solut alkavat vaurioitua tasaisessa 46 °C lämpötilassa. Suurin osa tuhoutuu muutaman tunnin 50 °C altistuksessa. (THL, 2017).

Huoneilman kosteus

Sosiaali ja terveysministeriön asetus 545/2015 pykälä 5 määrää "huoneilman kosteus ei saa olla pitkäkestoisesti niin suuri, että siitä aiheutuu rakenteissa, laitteissa taikka niiden pinnoilla mikrobikasvun riskiä."

Ilman lämpötila

Sosiaali ja terveysministeriön asetus 545/2015 pykälä 6 sekä liite 1 määrittävät lämpötilan toimenpiderajoja. Huoneilman lämpötila voidaan mitata oleskeluvyöhykkeeltä sen mukaan, mikä on tarpeen terveystilanteen selvittämiseksi. Huoneilman lämpötila mitataan noin 1,1 metrin korkeudelta. Toimenpiderajoja sovelletaan asunnossa vain asuinhuoneiden lämpötilojen terveellisyden arviointiin. Lämpötilat eivät saa aiheuttaa 5 §:ssä tarkoitettua mikrobikasvun riskiä.

	Lämpötilojen toimenpiderajat	Lämpötilaindeksi TI
Asunnossa		
Huoneilman lämpötila lämmityskaudella	+ 18 °C – + 26 °C	
Huoneilman lämpötila lämmityskauden ulkopuolella	+ 18 °C – + 32 °C	
Seinäpinnan alin keskiarvolämpötila	+ 16 °C	81
Lattiapinnan alin keskiarvolämpötila	+ 18 °C	87
Alin pistemäinen pintalämpötila	+ 11 °C	61
Palvelutaloissa, vanhainkodeissa, lasten päivähoitopaikoissa, oppilaitoksissa ja vastaavissa tiloissa		
Huoneilman lämpötila lämmityskaudella	+ 20 °C – + 26 °C	
Huoneilman lämpötila lämmityskauden ulkopuolella lasten päivähoitopaikat, oppilaitokset ja muut vastaavat tilat	+ 20 °C – + 32 °C	
Huoneilman lämpötila lämmityskauden ulkopuolella, palvelutalot, vanhainkodit ja muut vastaavat tilat	+ 20 °C – + 30 °C	
Seinäpinnan alin keskiarvolämpötila	+ 16 °C	81
Lattiapinnan alin keskiarvolämpötila	+ 19 °C	92
Alin pistemäinen pintalämpötila	+ 11 °C	61

Lämpötilojen toimenpiderajat (STM asetus 545/2015).

LIITE 2: LÄMPIMÄN KÄYTTÖVEDEN ENERGIANKULUTUS

```

# ladataan käytetyt kirjastot
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
# tiheys, kg/m3
tiheys = 1000
# luodaan satunnaismuuttujat
x = 0
a = 0
# vedenkulutus, m3
kulutus = 1

# lämpötilan muutos, K
dlampo = 1

# muunnoskerroin energian muuttamiseksi jouleista kilowateiksi
vakio = 3600

# ominaislämpökapasiteetti, kg/m3K
# olk = 4.2
# ominaislämpökapasiteetti, tarkka arvo, kg/m3K
olk = 4.214-2.286*10**-3*(dlampo+5)+4.991*10**-5*(dlampo+5)**2-4.519*10**-
7*(dlampo+5)**3+1.857*10**-9*(dlampo+5)**4

# luodaan kaksi tuplea
tulokset=muutos = ()

#lämmittämiseen vaadittu energia, kWh
for i in range(0,65):
    Q = tiheys*olk*kulutus*dlampo/3600
    # Jotta floatin saa tupleen, pitää olla sulut ja pilkku
    tulokset += (Q,)
    dlampo += 1
    olk = 4.214-2.286*10**-3*(dlampo+5)+4.991*10**-5*(dlampo+5)**2-4.519*10**-
7*(dlampo+5)**3+1.857*10**-9*(dlampo+5)**4

t2 = pd.DataFrame(list(tulokset))

# energiankulutuksen muutos, %
x = 0
for i in range(0,64):
    m = (t2.iloc[x+1,0]-t2.iloc[x,0])/t2.iloc[x,0]*100
    muutos += (m,)
    x += 1

# luodaan tuloksista kuvaaja
fig, ax1 = plt.subplots()

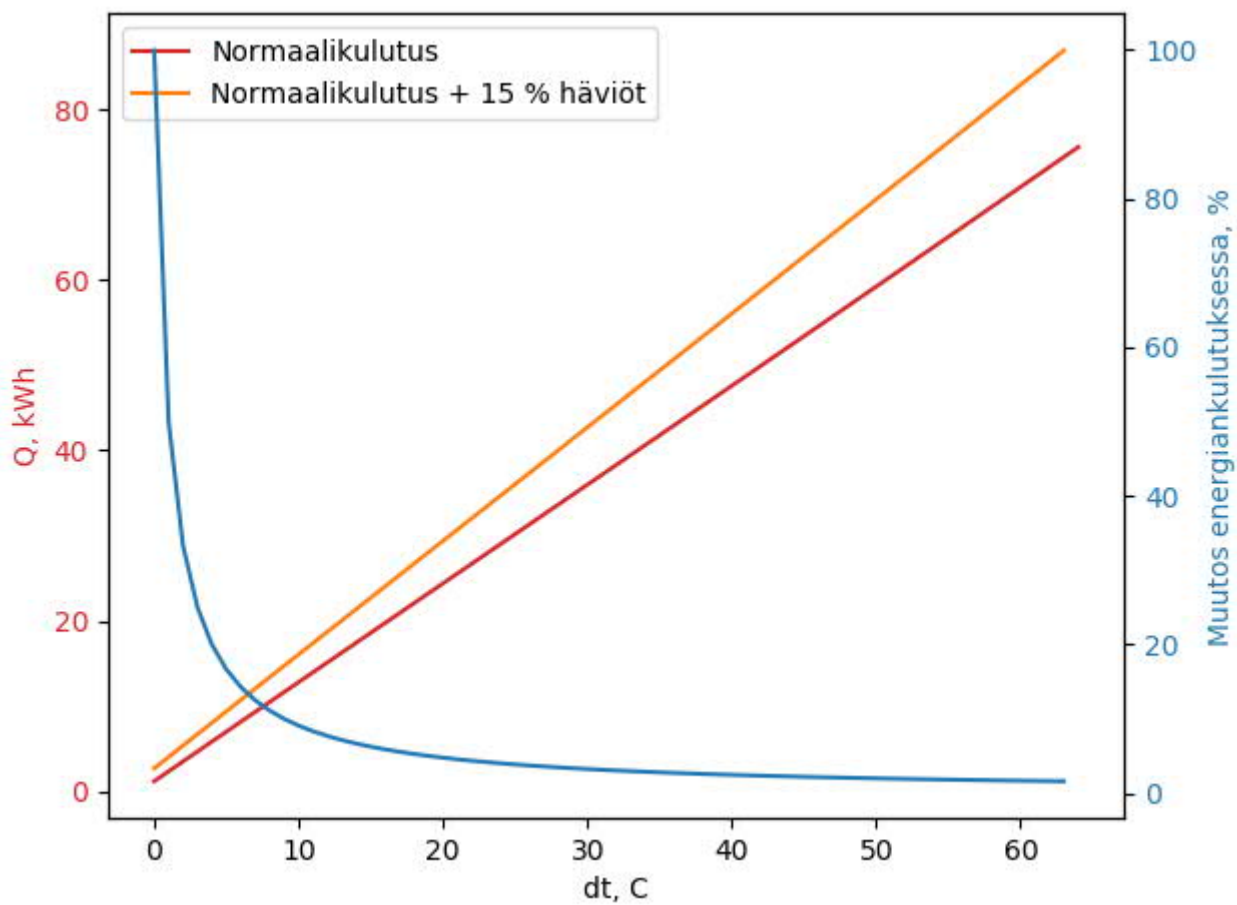
color = 'tab:red'
ax1.set_xlabel('dt, C')
ax1.set_ylabel('Q, kWh', color=color)
ax1.plot(t2, color=color)
ax1.tick_params(axis='y', labelcolor=color)

ax2 = ax1.twinx() # luodaan toinen akseli

color = 'tab:blue'
ax2.set_ylabel('Muutos energiankulutuksessa, %', color=color) # x-akseli on käsitelty ax1
ax2.plot(muutos, color=color)
ax2.tick_params(axis='y', labelcolor=color)

```

fig.tight_layout() # estää oikeanpuoleisen y-akselin leikkauksen
plt.show()



KUVA 1 Edellä olevan funktion tuloksien kuvaaja. Veden lämmittämiseksi vaadittu energia on lineaarinen, mutta energiankulutuksen muutos käyttäytyy logaritmisesti. m^3

LIITE 3: SAATTOLÄMMITYKSEN KÄYTTÖTUNNIT

```

import pandas as pd

# Luodaan ohjelmassa tarvittut muuttujat ja annetaan niiden arvoksi nolla.
vali2 = ulkona2 = vali1 = ulkona1 = ylaraja1 = alaraja1 = ylaraja2 = alaraja2 = 0

# Luodaan lista, jossa on Helsinki-Vantaan lentoaseman lämpötilamittauksen vuodelta 2017
df = pd.read_excel('Vantaa_TRY2012.xls', sheetname='Vantaa_TRY2012')

# Raja-arvojen määrittäminen
# Graafin vuoksi käytä vanhoja/huonoja arvoja raja kahdessa
ylaraja1 = 3
alaraja1 = -3

ylaraja2 = 5
alaraja2 = -5

# Käyntituntien laskenta
x = 0
while x < 8760:
    if df.iloc[x,5] < ylaraja2 and df.iloc[x,5] > alaraja2:
        vali2 += 1
    # Väliprint tulosten tarkasteluun
    # print(df.iloc[x,5])
    else:
        ulkona2 += 1
    if df.iloc[x,5] < ylaraja1 and df.iloc[x,5] > alaraja1:
        vali1 += 1
    else:
        ulkona1 += 1
    x += 1

kasvu = (vali2/vali1*100)-100

# Tulostetaan vastaukset.
print('Temperature between ' + format(alaraja1, '.0f') + '..' + format(ylaraja1, '.0f') + '' + format(vali1, '.0f') + '
hours. Temperature between ' + format(alaraja2, '.0f') + '..' + format(ylaraja2, '.0f') + '' + format(vali2, '.0f') + '
hours. Time changes ' + format(kasvu, '.0f') + '%. ')

# Luodaan kuvaaja tuloksesta
from matplotlib import pyplot as plt
plt.style.use('fivethirtyeight')
fig, ax1 = plt.subplots()
color = 'tab:red'
ax1.set_xlabel('Aika, h')
ax1.set_ylabel('Lämpötila, C', color='m')
ax1.plot(df.iloc[:,5], color='m')
ax1.plot([ylaraja2,x],[ylaraja2,ylaraja2], color='r')
ax1.plot([alaraja2,x],[alaraja2,alaraja2], color='r')
ax1.plot([ylaraja1,x],[ylaraja1,ylaraja1], color='g')
ax1.plot([alaraja1,x],[alaraja1,alaraja1], color='g')
ax1.tick_params(axis='y', labelcolor=color)
ax1.legend()
plt.show()

```