Opinnäytetyö AMK

Kone- ja tuotantotekniikka ja

Energia- ja ympäristötekniikka

2018

Miika Ojanen ja Anssi Duktig

ÄLYKÄS KUIVANAPITOLÄMMITYS

– Kuivanapitolämmitysjärjestelmän suunnittelu, asennus ja pilotointi

TURKU AMK
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ AMK | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma & Energia- ja ympäristötekniikka

2018 | 61

Miika Ojanen ja Anssi Duktig

ÄLYKÄS KUIVANAPITOLÄMMITYS

Suomessa on tuhansia vapa-ajan asuntoja, joiden lämmittämiseen käytetään useita megawattitunteja energiaa etenkin talviaikaan. Rakennuksien kunnossa pysymisen kannalta lämmittäminen on tarpeellista. Tyhjillään olevia rakennuksia pidetään usein turhan lämpimänä, vaikka rakennus olisi mahdollista pitää kunnossa huomattavasti pienemmällä lämmittämisellä ja energiankulutuksella. Lämmittämisellä halutaan vaikuttaa enimmäkseen rakennuksessa vallitsevaan suhteelliseen kosteuteen ja estää jäätymisestä aiheutuvat vahingot.

Energian kulutusta on mahdollista pienentää niin kutsutuilla kuivanapitolämmitysjärjestelmillä. Kuivanapitolämmitysjärjestelmän ideana on pitää tyhjillään oleva rakennus kunnossa mahdollisimman pienellä energiankulutuksella.

Rakennuksen kunnossa pysymiseen vaikuttavien olosuhteiden raja-arvoja on määritetty pitkälti perustuen Tampereen yliopistossa tehtyihin tutkimuksiin. Tärkeimmät aiheeseen liittyvät tutkimukset käsittelevät homeen kasvuun vaikuttavia olosuhteita ja vakioteholämmitysjärjestelmän käyttämistä kuivanapitolämmityksessä.

Turun yliopiston omistamassa Seilin saaressa tutkittiin mahdollisuuksia vähentää saaren rakennuksien energiankulutusta. Kuivanapitolämmitysjärjestelmää pidettiin yhtenä ratkaisuna energian kulutuksen vähentämiseksi. Kuivanapitolämmitystä testattiin saaressa sijaitsevissa vapaa-ajan asunnoissa. Tutkimusta varten suunniteltiin ohjausmalli automatisoidulle kuivanapitolämmitysjärjestelmälle, ja järjestelmä toteutettiin käytännössä logiikkapohjaisella ohjausjärjestelmällä. Rakennuksista kerättiin tietoa olosuhteista ja järjestelmän toiminnasta koko testijakson ajalta.

Opinnäytetyössä esitellään ohjausmalleja automatisoidun kuivanapitolämmitysjärjestelmän toteuttamiseksi, testijärjestelmän rakenne ja toiminta sekä tutkimuksesta saadut tulokset. Opinnäytetyön tarkoituksen on lisätä kiinnostusta kuivanpitolämmitysjärjestelmiä kohtaan sekä lisätä tietoa niiden käyttämisestä ja toteuttamisesta.

Saadut tulokset osoittavat, että kuivanapitolämmitysjärjestelmällä saavutetaan merkittäviä energiasäästöjä. Energiasäästöt suhteessa ohjausjärjestelmän hintaan ovat huomattavia. Tämän lyhyen testijakson aikana rakennuksissa ei havaittu liiallista kosteutta tai muita rakennuksen kuntoa heikentäviä ilmiöitä.

ASIASANAT:

Lämmitysjärjestelmät, automaatiojärjestelmät, energiatehokkuus, energiankustannukset.

BACHELOR´S THESIS THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical and Production Engineering & Energy and Environmental Engineering

2018 | 61

Miika Ojanen & Anssi Duktig

AUTOMATED HEATING SYSTEM FOR OFF SEASONAL USE

There are thousands of cottages, cabins and holiday apartments in Finland. These types of buildings are mostly used during the summertime. Empty buildings are usually kept in unnecessary high temperatures, although, with the right heating solution, lower temperatures could be enough to keep buildings in good condition: The main reasons for heating are to keep humidity levels low and prevent water pipes from freezing.

With an automated heating system, it is possible to save energy by monitoring the temperature and humidity levels and using these measurements to safely drop the temperature inside the building. A lower temperature uses less energy. This thesis describes some possible heating solutions for off seasonal use.

A research made at University of Tampere (TTY) defines the critical temperature and humidity conditions for different construction materials. This research was used to define the critical limits for automated heating systems. TTY has also researched heating solutions for off seasonal use. Base idea for the automated heating systems described in this thesis comes from this research made at TTY. The research used small heaters at constant power to keep the inside temperature a few degrees above the outside temperature. This difference between the inside and outside temperatures is enough to keep the humidity level low.

University of Turku owns many old buildings in Island of Seili. Energy consumption at the property is high and most of the energy is used for heating. University of Turku was interested in finding ways to decrease the energy consumption. Specific automated heating systems were designed, built and tested in 120 m^2 houses in Seili. The goal of these heating systems was to lower the temperatures used in empty buildings. The conditions were measured by adding sensors to the critical areas of the house. Data was collected from the behavior of the systems and the humidity and temperature conditions were measured inside and outside of the buildings.

This thesis describes the used control models, design of the system and measurement data. The results show that by using these systems it is possible to gain high energy savings. During the measurement period, the temperature and humidity conditions sustained under critical areas. Energy savings took place mostly during the wintertime when energy demand in Finland is the highest. The measurement period was short and homogeneous, but the results were promising.

KEYWORDS:

Heating system, automation, energy.

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO **7**

1 JOHDANTO **8**

2 RAKENNUKSEN KUNTOON VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ JA KÄSITTEITÄ **10**

2.1 Ilmanpaine ja ilmanvaihto 12

2.2 Kosteus rakenteissa 14

2.3 Suomalainen homemalli 15

3 KUIVANAPITOLÄMMITYS **18**

3.1 Kuivanapitolämmityksellä tavoiteltavat olosuhteet ja käyttökohteet 18

3.2 Peruslämpö ja vakioteholämmitys 21

3.3 Kuivanapitolämmitysjärjestelmän käyttöönotto 23

4 TUTKIMUSASETELMA **24**

5 OHJAUSMALLIT **26**

5.1 Ohjausmalli 1 27

5.2 Ohjausmalli 2 31

5.3 Ohjausmalli 3 33

6 TESTIJÄRJESTELMÄ **34**

6.1 Komponentit 36

6.1.1 Ohjaavat anturit 37

6.1.2 Dataloggerit 38

6.1.3 Energiamittarit 39

6.1.4 Kontaktorit 39

6.1.5 Logiikka 40

6.1.6 LOGO! tekstinäyttö 42

6.2 Asentaminen 43

6.3 Logiikka ja ohjelmointi 44

6.4 Sisälämpötilaan ja suhteelliseen kosteuteen perustuva ohjaus LOGO! 46

6.4 Lämpötilaeroon perustuva ohjelma LOGO! 49

7 TESTIJAKSON MITTATULOKSET **50**

7.1 Mittatulokset 50
7.2 Käytetty energia ja säästöpotentiaali 56

8 JOHTOPÄÄTÖKSET 57

9 POHDINTA 59
9.1 Jatkotutkimus 60
9.2 Muita mahdollisia tutkimuskohteita. 61

LÄHTEET 7

KAAVAT

Kaava 1. 11
Kaava 2. 29

KUVAT

Kuva 1. Peruslämmön ja vakiotehoisen kuivanapitolämmityksen vertailu (Rytkönen & Kirkkari 2010, 19) 22
Kuva 2. Rakennuksien numerointi ja sijainnit asemapiirroksessa 25
Kuva 3. Vuokaavio ohjausmallin 1 toiminnasta. 30
Kuva 4. Vuokaavio ohjausmallin 2 toiminnasta 32
Kuva 5. Anturien sijoittelu ja lämmitysvyöhykkeet asemapiirroksessa 35
Kuva 7. Ulkonurkan lämpötila on noin 10 ˚C matalampi kuin muun huoneen lämpötila. 38
Kuva 6. Suljetussa allaskaapissa lämpötila ei pääse tasoittumaan huoneil-man kanssa. 38
Kuva 8. Extech usb -dataloggeri 38
Kuva 9. Kuvassa on rakennukseen 1 asennetut energiamittarit. Energiamittarit mittaavat kaikkien testirakennusten kokonaisenergiankulutusta. 39
Kuva 10. Kontaktorit, nokkakytkimet ja logon virtalähde asennettiin sähkötauluun. 40
Kuva 11 Esimerkki kuva Logo! FDB -ohjelmoinnissa käytettävästä toimilohkosta. 40
Kuva 12. Rakennuksen yksi kuivanapitolämmityksen ohjaus. Kuvassa on kaksi Siemens LOGO! 8 -logiikkaa ja FLTA-tukiasema. 41
Kuva 13. Logo TDE tekstinäyttö (Siemens 2018) 42
Kuva 14. Sähkötyöt ja sähköurakka 43
Kuva 15. Ohjausmallin 1 mukainen Logo-ohjelma. 46
Kuva 16. Kolmen vyöhykkeen ohjaus LOGO! ohjelma 48
Kuva 17. Lämpötilaeroon perustuvan ohjauksen koodi LOGO! 49

KUVIOT

Kuvio 1. Ilman kyky sitoa kosteutta eri lämpötiloissa. (Rytkönen & Kirkkari 2010, 27.) 12
Kuvio 2. Suomalaisen homemallin kuvaamat raja-arvot kasvulle lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mukaan. (Tampereen teknillinen yliopisto 2017.) 17
Kuvio 3. Mollierin diagrammilla voi arvioida kosteuden käyttäytymistä eri lämpötiloissa. (Muokattu: The Engineering ToolBox) 20
Kuvio 4. Kuvaaja esittää kosteuteen ja lämpötilaan perustuvan lämmityksen ohjauksen raja-arvot ja ehdot suhteessa sisälämpötilaan ja suhteelliseen kosteuteen. 28
Kuvio 5. Kuvaaja esittää lämpötilaeroon perustuvan ohjasmallin lämmityksen käyttäytymisen sisä- ja ulkolämpötilan suhteen. Kuvaajan y-akselilla on esitetty sisälämpötila ja x-akselilla ulkolämpötila. 31
Kuvio 6. Seilin sääasemalta kerätyt lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot ajalta 14.12.2017 – 30.5.2017. 51
Kuvio 7. Rakennus 1 Produalin antureista kerätyt mittatiedot. 52
Kuvio 8. Lämmitysjärjestelmän hystereesin käyttäytyminen näkyy sisälämpötilan vaihteluna sahalaitaisesti. 53
Kuvio 9. Rakennus 1 dataloggeri 2. Dataloggeri 2 sijaitsi allaskaapissa. Rakennuksessa 1 oli käytössä ohjausmallin 1 mukainen kuivanapitolämmitysjärjestelmä. Rakennusta lämmitettiin yhtenä vyöhykkeenä. 55
Kuvio 10. Rakennus 2 dataloggeri 5. Dataloggeri 5 sijaitsi allaskaapissa. Rakennuksessa 2 oli käytössä ohjausmallin 1 mukainen kuivanapitolämmitysjärjestelmä. Lämmityksen ohjaus oli jaettu kolmeen lämmitysvyöhykkeeseen. 55
Kuvio 11. Rakennus 3 dataloggeri 8. Dataloggeri 8 sijaitsi allaskaapissa. Rakennus kolme pidettiin peruslämmöllä. 55

TAULUKOT

Taulukko 1. Suomalaisen homemallin homeindeksin suureen M arvot ja arvojen kuvaus. (Tampereen teknillinen yliopisto 2017.) 16
Taulukko 2 . Suomalaisen homemallin esittämät homehtumisherkkyysluokat eri materiaaleille. (Tampereen teknillinen yliopisto 2017.) 16
Taulukko 3 . Suomalaisen homemallin taantumaluokat. (Tampereen teknillinen yliopisto 2017.) 16
Taulukko 4. Taulukossa on listattuna kaikki järjestelmän komponentit rakennuskohtaisesti. 36
Taulukko 5. Taulukossa on kaikkien testikäytössä olleiden rakennuksien energian kokonaisenergiankulutus ja prosentuaalinen energiansäästö suhteessa peruslämmöllä pidettyyn rakennukseen. 56

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

I/O	(Input / Output) Ohjelmoitavan logiikan liitännöistä käytetään termejä tulo ja lähtö. Tuloporteilla logiikka saa tietoa järjestelmän tilasta ja lähtöporteilla logiikka ohjaa järjestelmää.
LD	(Ladder Diagram) Logiikoissa yleisesti käytetty ohjelmointi tapa.
FBD	(Function Block Diagram) Logiikoissa yleisesti käytetty ohjelmointi tapa.
NC	Avautuva kosketin (Normal Closed). Termiä käytetään usein releiden, kontaktoreiden tai koskettimien yhteydessä.
NO	Sulkeutuva kosketin (Normal Open) Termiä käytetään usein releiden, kontaktoreiden tai koskettimien yhteydessä.
UDF	(User Defined Function). Logo ohjelmoinnissa käyttäjän määrittelemä toimilohko/aliohjelma.
Ethernet	Ethernet on yleisimmin käytetty lähiverkkotekniikka.
Hystereesi	Hystereesi on ominaisuus joka hidastaa muutoksiin reagoimista.
RH	RH eli suhteellinen kosteus. Suhteellisella kosteudella tarkoitetaan kyllästymisvesihöyrypitoisuuden ja vesihöyrynpaineen välistä suhdetta vakiolämpötilassa.
Absoluuttinen kosteus	Kuvaa vesihöyryn tai veden määrä tietyssä tilavuudessa g/m^3
Kuivanapitolämmitys	Lämmitysmenetelmä jota käytetään tyhjillään olevissa rakennuksissa. Tarkoituksena on varmistaa rakennuksen kunnossa pysyminen mahdollisimman pienellä energiankulutuksella.
PLC	PLC eli ohjelmoitava logiikka. Ohjelmoitava logiikka on tietokone, jota käytetään prosessien ja automaatiojärjestelmien ohjauksissa.

1 JOHDANTO

Suomessa on yli puoli miljoonaa vapaa-ajan asuntoa. Suomen mökkikannan kasvu ja mökkien varustelutason nousu vaikuttavat oleellisesti mökkien aiheuttamiin ympäristövaikutuksiin. Suurin osa mökkien sähkönkulutuksesta kuluu lämmittämiseen. Ympäristöministeriön raportissa on arvioitu, että noin 40–50 prosenttia Suomen mökeistä on sähkölämmitettyjä vuoden 2025 loppuun mennessä. Yhä useampi mökki on varustetasoltaan kakkosasuntoon verrattava. Mökkejä rakennetaan talvi-, syys- ja kevätkäyttöä silmällä pitäen. (Rytkönen & Kirkkari 2010, 11–12.)

Vuonna 2016 vapaa-ajan asuinrakennusten sähkönkulutus oli 865 GWh eli noin 27 prosenttia Suomen asuntokannan sähkönkulutuksesta. Asumisen energiankulutuksesta noin 68 prosenttia käytetään lämmittämiseen. Vapaa-ajan rakennusten lämmittämiseen käytetty energia vuonna 2016 oli noin 580 GWh. Suurin osa energiasta kulutetaan talviaikaan jolloin rakennukset ovat usein tyhjillään. (Tilastokeskus 2016, 4–8.)

Suurin lämmitysenergian tarve ajoittuu kovimmille pakkaskeleille, jolloin Suomen energiankulutus on samaan aikaan huipussaan. (Mökkibarometri 2016). Energiankulutukseen vastataan lisäämällä hetkellisesti omaa tuotantokapasiteettia ja ostamalla sähköä ulkomailta (Energiavirasto 2017, 2).

Perinteisesti käyttämättömiä vapaa-ajan rakennuksia on pidetty vakiolämmöllä. Tämä aiheuttaa turhaa lämmittämistä ja suurta energiankulutusta. Jos lämpötilaa alennetaan rakennuksissa, voidaan rakennuksien lämmityksessä saada aikaan huomattavia energiansäästöjä. Rakennuksia on kuitenkin tarpeellista lämmittää, jotta rakennuksien sisäilman suhteellinen kosteus ei pääse nousemaan korkeaksi ja rakenteet pysyvät kunnossa. (Piiroinen & Vinha 2010, 8.)

Vakioteholämmityksestä on etsitty ratkaisua energiankulutuksen vähentämiseksi. Esimerkiksi Tampereen yliopisto on tehnyt kattavaa tutkimusta vakioteholämmityksen käyttämisestä tyhjissä mökeissä. Vakioteholämmitys pitää rakennuksen sisälämpötilaa hieman ulkolämpötilaa korkeampana. (Piiroinen & Vinha 2010, 16–40)

Vakioteholämmitys ei kuitenkaan välttämättä sovellu kaikkiin rakennuskohteisiin. Automatisoidulla lämmityksenohjausjärjestelmällä voidaan päästä parempiin tuloksiin, ja sitä voidaan soveltaa useammassa kohteessa.

Automatisoimalla rakennuksen lämmitysjärjestelmä on mahdollista vähentää tarvittavaa lämmitystehon määrää alentamalla rakennuksen lämpötilaa hallitusti ja lämmittämällä rakennusta vain tarpeen mukaan. Automaatiolla voidaan saavuttaa vielä suurempia energiansäästöjä kuin vakioteholämmityksellä.

Kattavalla anturoinnilla voidaan varmistaa rakennuksen kuntoa reaaliajassa, ja lämmityksen ohjausjärjestelmä kykenee vastaamaan mahdollisiin olosuhteiden muutoksiin rakennuksessa.

Verrattuna nykyiseen peruslämpöratkaisuun voidaan kuivanapitolämmitysjärjestelmäratkaisulla teoriassa saavuttaa huomattavia energiansäästöjä niin kuluttajan näkökulmasta kuin myös koko yhteiskunnan mittakaavassa. Energiansäästöt sijoittuvat talvikaudelle, jolloin Suomen energiankulutus on huipussaan ja lämmitykseen käytettävän energiantarve on suurimmillaan. Kuivanapitolämmitysjärjestelmistä on tärkeää saada lisätietoa ja helpottaa kuivanapitolämmityksen käyttöönottoa ja tuotteistamista tulevaisuudessa.

Opinnäytetyö käsittelee kuivanapitolämmitystä yleisesti ja esittelee mahdollisia ohjausmalleja sen toteuttamiseksi. Opinnäytetyössä raportoidaan myös Seilin saaressa toteutettu tutkimus kuivanapitolämmityksestä, tutkimuksessa käytetty järjestelmä ja tutkimuksesta saadut tulokset. Opinnäytetyön tarkoituksena on lisätä tietoisuutta kuivanapitolämmityksestä, antaa kattavampi pohja mahdolliselle jatkotutkimukselle ja helpottaa kuivanapitolämmityksen käyttöönottamista tulevaisuudessa.

2 RAKENNUKSEN KUNTOON VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ JA KÄSITTEITÄ

Lumi, jää, vesi ja vesihöyry ovat kosteutta eri olomuodoissa. Liiallinen kosteuden esiintyminen rakenteissa voi aiheuttaa vakavia vaurioita rakennusmateriaaleille. (Rafnet-oppimateriaali 2017, 6.) Tässä opinnäytetyössä tarkkaillaan muun muassa kosteuden käyttäytymistä rakennuksissa, joissa käytetään automaatio-ohjattua kuivanapitolämmitysjärjestelmää.

Lämpötila, kosteus ja ilmapaine-erot ovat tekijöitä, jotka vaikuttavat oleellisesti rakenteiden kosteus- ja lämpötekniseen toimintaan (Siikainen 2008, 130). Vetenä esiintyvä kosteus rakenteissa vähentää rakenteiden lämmöneristyskykyä ja lisää vaaditun lämmitysenergian määrää. Kosteus on osatekijä useimmissa rakennuksiin vaikuttavissa turmeltumisilmiöissä. Liiallinen kosteus voi aiheuttaa kivirakenteissa pakkasvaurioita, puurakenteissa lahoamista ja teräsrakenteissa korroosiota. Korkea suhteellinen kosteus tietyissä lämpötiloissa antaa hyvän kasvualustan home- ja lahosienille. (Björkholtz 1997, 8.)

Ilma on kaasuseos, se koostuu enimmäkseen typestä, hapesta ja argonista. Ilma sisältää myös vesihöyryä. Vesihöyryn osuus ilmakehän alimmassa kerroksessa troposfäärissä on 0,1–4 prosenttia. Lämmin ilma sisältää yleensä enemmän kosteutta kuin kylmä ilma. (Euroopan ympäristökeskus 2013.)

Kostea ilma on kuivan ilman ja vesihöyryn seos. Kuivan Ilman moolipaino on keskimäärin 28,96 kg/kmol ja vesihöyryn 18,02 kg/kmol. Vesihöyry on kuivaa ilmaa kevyempää. Lämmin ilma sitoo enemmän vesihöyryä ja nousee ylöspäin. (Björkholtz 1997, 43.)

Vesihöyryä muodostuu veden kiehuessa tai veden pinnalta haihtumalla. Ilman vesihöyrypitoisuuden ollessa matala ilma pystyy sitomaan enemmän vesihöyryä, jolloin haihtuminen on tehokkaampaa. Ilman vesihöyrypitoisuutta voidaan kuvata suhteellisella kosteudella RH (%) tai absoluuttisella kosteudella v (g/m^3). Absoluuttinen kosteus kuvaa, kuinka paljon ilma sisältää kosteutta lämpötilasta riippumatta. Suhteellinen kosteus kuvaa ilman sisältämän kosteuden määrää suhteessa siihen, kuinka paljon ilma voi sisältää kosteutta tietyssä lämpötilassa. (Siikainen 2008, 143–145.)

Suhteellista kosteutta voidaan määrittää seuraavalla kaavalla.

$$RH = \frac{v}{vk} * 100\% \quad (1)$$

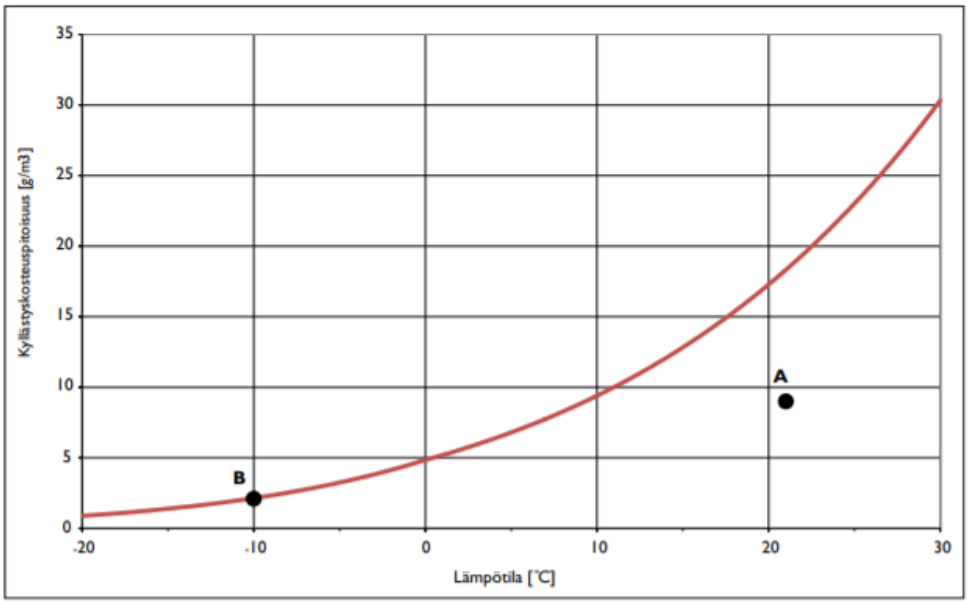
Kaavassa (1) vk on ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus. Suhteellinen kosteus kuvaa suhdetta ilman todellisen vesihöyrypitoisuuden ja ilman kyllästysvesihöyrypitoisuuden välillä. Ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus on riippuvainen lämpötilasta. Mitä matalampi on ilman lämpötila, sitä matalampi on ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus. (Rafnet-oppimateriaali 2017, 7).

Lämpötilaa, jossa vesihöyry alkaa tiivistyä vedeksi, kutsutaan kastepistelämpötilaksi. Lämmin ilma pystyy sitomaan itseensä enemmän vesihöyryä. Kun ilma ei pysty kantamaan suurempaa määrää vesihöyryä, vesihöyry tiivistyy vedeksi. Vesihöyry tiivistyy aina ympäröivää ilmaa kylmemmälle kovalle pinnalle. (Siikainen 2008, 143–145.) Esimerkiksi vesi tiivistyy saunan ikkunalle, kun lämmin kostea ilma on kohdannut kastepisteen ikkunan pinnalla (Rafnet-oppimateriaali 2017, 11).

Lämpötilan muuttuessa ja vesihöyryn määrän pysyessä vakiona absoluuttinen kosteus pysyy vakiona, mutta suhteellinen kosteus muuttuu suhteessa lämpötilaan. Sama ilmiö on havaittavissa rakennuksen sisä- ja ulkoilman välillä, ja tämä ilmiö mahdollistaa rakenteen kuivaamisen lämpötilaa nostamalla. (Rafnet-oppimateriaali 2017, 7–8.)

Suhteellisen kosteuden ollessa 100 prosenttia ilma on täysin kyllästetty, eikä se pysty sitomaan kosteutta. Täysin kylläisessä ilmassa vesihöyry alkaa tiivistyä pisaroiksi kastepistelämpötilassa (kuvio 1).

Standardin- SFS EN 13788 mukainen Ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus lämpötilan funktiona. Kuvio 1 kuvaa ilman kykyä sitoa kosteutta eri lämpötiloissa. Pisteessä A lämpötila on 21 astetta ja ilma voi maksimissaan sisältää vesihöyryä noin 18 g/m^3. Suhteellisen kosteuden ollessa 50 prosenttia ilma sisältää noin 9 g/m^3. Jos pisteessä A oleva ilma siirtyy pisteen B olosuhteisiin, ilma pystyy kantamaan enää 2,1 g/m^3. Vesihöyrystä 6,9 g/m^3 tiivistyy vedeksi. (Rytkönen & Kirkkari 2010, 27.)



Kuvio 1. Ilman kyky sitoa kosteutta eri lämpötiloissa. (Rytkönen & Kirkkari 2010, 27.)

Rakennusmateriaalit, rakenteet ja kalusteet sisältävät lähes aina jonkin verran kosteutta. Kosteuspitoisuuteen vaikuttaa oleellisesti ympäröivä lämpötila ja ilmankosteus. Materiaalien sisältä kosteus lisää aineen lämmönjohtavuutta. Rakenteet tulee suunnitella siten, että niiden kosteus ei ajan kuluessa kohoa merkittävästi normaalin tasapainokosteuden yläpuolelle. (Siikainen 2008, 135–137.)

2.1 Ilmanpaine ja ilmanvaihto

Vesihöyryn siirtymistä rakennuksissa tapahtuu konvektiona ja diffuusiona. Konvektiolla tarkoitetaan vesihöyryn liikkumista ilmavirtauksien mukana. Ilmavirtaukset syntyvät ilmanpaine-eroista. Suuria ilmanpaine-eroja syntyy kylminä vuodenaikoina, jolloin ilmavirtauksia saattaa syntyä rakenteissa olevien halkeamien ja reikien läpi. Konvektion mukana siirtyvä kosteuden määrä on usein moninkertainen diffuusioon verrattuna. (Siikainen 2008, 144–149.)

Diffuusiossa kaasuseosten pitoisuudet pyrkivät tasoittumaan. Diffuusio on kaasun liikettä suuremman pitoisuuden määrästä pienemmän pitoisuuden määrään. Suurin osa materiaaleista läpäisevät vesihöyryä. Vesihöyryn liikkumista rakenteiden läpi kutsutaan vesihöyryn diffuusioksi. Vesihöyryn osapaine-erot pyrkivät tasoittumaan seinärakenteiden

läpi. Normaalisti vesihöyryn diffuusion suunta on osapaineesta pienenpään osapaineeseen. Ilman kokonaispaine on ilman sisältämien osapaineiden summa. Kylmän ilman sisältämän vesihöyryn osapaine on yleensä lämpimän ilman vesihöyryn osapainetta pienempi. Vesihöyryn diffuusiota esiintyy tyypillisesti Suomessa talviaikana, kun sisä- ja ulkoilman lämpötilaero on suuri. Rakenteita suunniteltaessa on huomioitava, että rakenteen höyrynvastus pienenee ulospäin mentäessä, tämä mahdollistaa rakenteen kuivumisen oikein. (Siikainen 2008, 144–149.)

Ilmanpainevaihtelut vaikuttavat rakennuksen kosteus- ja lämpötekniseen toimintaan. Tuuli, savupiippuvaikutus, lämmitys ja ilmanvaihto ovat tekijöitä, jotka aiheuttavat ilmanpaine-eroja rakennuksissa. Edellä mainittujen tekijöiden aiheuttamien paine-erojen tuottamia ilmavirtauksia rakenteissa kutsutaan pakotetuksi konvektioksi. (Siikainen 2008, 130–131.)

Savupiippuvaikutus syntyy, kun ilmaa lämmitetään ja lämmitetty kevyempi ilma pyrkii ylöspäin. Savupiippuvaikutuksesta syntyy pieniä paine-eroja rakennuksessa, huonetilan yläosaan muodostuu ylipainetta ja alaosaan alipainetta. Savupiippuvaikutuksen aiheuttamat paine-erot ovat käytännössä pysyviä, joten niillä on vaikutusta rakennuksen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. (Siikainen 2008, 130–131.)

Tuulen aiheuttamat paine-erot ovat hyvin vaihtelevia rakennusten välillä. Kova pitkäaikainen tuuli voi lisätä huomattavasti kosteuden ja lämmön siirtymiseen rakenteissa. (Siikainen 2008, 130–131.)

Koneellisella ilmanvaihdolla on suuri vaikutus rakennusten kosteus- ja lämpötekniseen toimintaan. Koneellinen ilmanvaihto aiheuttaa alipainetta rakennukseen, jolloin paine-erot pyrkivät tasoittumaan muun muassa seinärakenteiden läpi. Kylmä ulkoilma imeytyy seinärakenteiden läpi. Seinän läpi virratessa ilma lämpenee ja ilman suhteellinen kosteus pienenee, ja tällä on kuivattava vaikutus seinärakenteille. (Siikainen 2008, 131–133.)

Rakennuksien seinärakenteissa puhutaan hengittävistä ja höyrysulkurakenteista. Hengittävä rakenne sallii ilman sisältämien kaasujen tasoittumisen ja ilmavirtojen kulkeutumisen rakenteiden läpi diffuusiona. Konvektiota eli vapaata ilmavirtausta ei kuitenkaan sallita. Höyrysulkurakenteella tiivistetään rakennusta siten, että ilmavirtoja voidaan ohjata hallitusti ilmanvaihtokanavia pitkin eivätkä ilmavirrat kulje diffuusiona rakenteiden läpi. (Ympäristöministeriö 2015)

Ilmanvaihdon toimivuuteen ja kosteuden siirtymiseen vaikuttaa merkittävästi rakennuksen vaipan ilmatiiveys. Sisäilman suhteellisen kosteuden ollessa korkea ja sisä- ja ulkoilman lämpötilaeron ollessa suuri on kastepisteen muodostuminen todennäköisempää. Kylmä ilma ei välttämättä pysty kantamaan lämpimän ilman sisältämää kosteutta. Rakennuksen kunnon kannalta on tärkeää, että ilmavirrat liikkuvat rakennuksessa ulkoa sisälle ja rakenne pääsee kuivumaan oikein. Kosteuden siirtymistä rakenteeseen voidaan ehkäistä höyrysulun avulla, jolloin kosteusvirrat ovat hallittavissa ilmanvaihtokanavien avulla. Ilmanvaihdolla on tärkeä rooli rakennuksen sisäilman laadun kannalta. Ilmanvaihto huolehtii rakennuksen korvausilmasta, poistaa epäpuhtauksia ja kosteutta rakennuksista. (Sisäilmayhdistys ry 2017.)

2.2 Kosteus rakenteissa

Hygroskooppinen kosteus on kosteutta, jonka huokoinen aine sitoo ilmasta. Hygroskooppinen kosteus pyrkii tasaantumaan ilman suhteellisen kosteuden kanssa luovuttamalla ja sitomalla kosteutta. Kosteuskapasiteetilla tarkoitetaan aineen kykyä sitoa ja luovuttaa kosteutta. Kosteuskapasiteetti tasaa vesihöyryn muodossa olevan kosteuden kulkemista rakenteiden läpi (Siikainen 2008, 143–150.)

Rakennusmateriaalit, rakenteet ja kalusteet sisältävät lähes aina jonkin verran kosteutta. Kosteuspitoisuuteen vaikuttaa oleellisesti ympäröivä lämpötila ja ilmankosteus. Materiaalien sisältämä kosteus lisää aineen lämmönjohtavuutta. Rakenteet tulee suunnitella siten, että niiden kosteus ei ajan kuluessa kohoa merkittävästi normaalin tasapainokosteuden yläpuolelle. (Siikainen 2008, 135–137.)

Lämpö- ja kosteustekninen toiminta voi vaihdella huomattavasti eri rakennustyyppien ja rakennusten välillä. Kuivanapitolämmitysjärjestelmän kannalta on hyvä ymmärtää kyseisen rakennuksen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan vaikuttavat tekijät. Rakennuksen kosteusarvot on tarkoitus pitää kriittisen kosteuden alapuolella.

Kriittisellä kosteudella tarkoitetaan kosteuspitoisuuden ylärajaa, joka vaikuttaa oleellisesti rakenteiden kuntoon tai toimintaan (Björkholtz 1997, 60). Suomalaisessa homemallissa on määritetty kriittisen kosteuden arvoja homeen kasvamiselle.

2.3 Suomalainen homemalli

VTT on aiemmin kehittänyt puumateriaaleille laskentamallin, ns. homemallin, jolla homeen kasvua voidaan tarkastella laskennallisesti vaihtelevissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa. Mallissa huomioidaan olosuhteiden kriittisyys, altistumisaika ja homeen kasvun kannalta epäsuotuisat olosuhteet. Mallia on kehitelty sen jälkeen, ja se soveltuu nykyään muihinkin materiaaleihin. (Tampereen teknillinen yliopisto 2017.)

VTT ja TTY tekivät yhdessä homemalliin pohjautuvan suomalaisen homemallin. Suomalainen homemalli on tällä hetkellä maailman pisimmälle kehitetty arviointityökalu homehtumisriskille. Mallin avulla arvioidaan homeen kasvua rakennusmateriaalien pinnoilla ajan funktiona. (Tampereen teknillinen yliopisto 2017.)

Mallilla voidaan laskea homeindeksi kaikille materiaaleille, joiden homehtumisherkkyysluokka tunnetaan. Mallin soveltuvuus on valmiiksi verifioitu useille eri materiaaleille, rakenteille ja materiaalien rajapinnoille. Verifiointi on tehty laboratoriokokein. (Tampereen teknillinen yliopisto 2017.)

Suomalaisessa homemallissa homeindeksin avulla arvioidaan homeen kasvun määrää materiaalin pinnalla. Homeindeksiä kuvataan suuren M avulla. Arvio homeen kasvun määrästä perustuu mikroskoopilla tehtyihin visuaalisiin havaintoihin. Malli ottaa kantaa ainoastaan kasvun määrään, ei homelajiin tai sen haitallisuuteen. Suure M saa arvoja väliltä 0… 6. Arvo nolla kuvaa sitä, että kasvua ei esiinny ja arvo kuusi kuvaa runsasta kasvua (Taulukko 2). Homeindeksin arvon laskemiseen käytetään tunnin syklillä olevaa dataa suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvoista. Tunnin syklin on kokeellisesti todettu vastaavan parhaiten todellista tilannetta. Laskenta antaa tuloksen eri herkkyysluokkien mukaan HHL1… HHL4 (Taulukko 3). Taantuminen on määritetty arvojen HTL2… HTL4 välillä (Taulukko 4). (Tampereen teknillinen yliopisto 2017.)

Taulukko 1. Suomalaisen homemallin homeindeksin suureen M arvot ja arvojen kuvaus. (Tampereen teknillinen yliopisto 2017.)

Home-indeksi M	Havaittu homeenkasvu	Huomautuksia
0	Ei kasvua	Pinta puhdas
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu	Paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma
2	Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	Homerihmasto peittää 10 % tutkittavasta alasta (mikroskoopilla). Useita rihmastopesäkkeitä muodostunut.
3	Silmin havaittava kasvu Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	Alle 10 % peitto alasta (silmillä) Alle 50 % peitto alasta (mikroskoopilla) Uusia itiöitä alkaa muodostua
4	Selvä silmin havaittava kasvu Runsas mikroskoopilla havaittava kasvu	Yli 10 % peitto alasta (silmällä) Yli 50 % peitto alasta (mikroskoopilla)
5	Runsas silmin havaittava kasvu	Yli 50 % peitto alasta (silmillä)
6	Erittäin runsas kasvu	Lähes 100 % peitto, tiivis kasvusto

Taulukko 2 . Suomalaisen homemallin esittämät homehtumisherkkyysluokat eri materiaaleille. (Tampereen teknillinen yliopisto 2017.)

Homehtumisherkkyysluokka		Rakennusmateriaalit
HHL1	Hyvin herkkä	Karkeasahattu ja mitalistettu puutavara (mänty ja kuusi), höylätty mänty, käsittelemätön huokoinen puukuitulevy
HHL2	Herkkä	Höylätty kuusi, paperipohjaiset tuotteet ja kalvot, kipsilevy, vaneri, lastulevy, bitumoidut/käsitellyt huokoiset kuitulevyt
HHL3	Kohtalaisen herkkä	Mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni*, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiili
HHL4	Kestävä	Alkalinen uusi betoni, lasi ja metallit, tehokkaita homesuoja-aineita sisältävät materiaalit

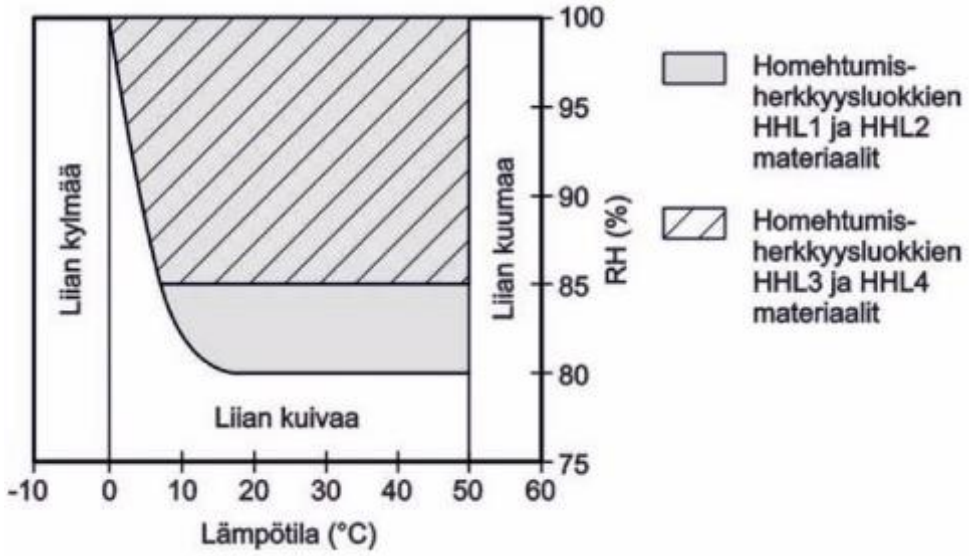
* Kevytbetoni kuuluu homehtumisominaisuuksiltaan kahteen eri homehtumisherkkyysluokkaan. Homeen kasvunopeus vastaa homehtumisherkkyysluokkaa HHL2, mutta homeindeksin maksimiarvo jää homehtumisherkkyysluokan HHL3 tasolle.

Taulukko 3 . Suomalaisen homemallin taantumaluokat. (Tampereen teknillinen yliopisto 2017.)

Homehtumis-herkkyysluokka	Homeen taantumaluokka
HHL1	HTL2 Merkittävä taantuma
HHL2	HTL3 Kohtalainen taantuma
HHL3	HTL4 Vähäinen taantuma
HHL4	HTL4 Vähäinen taantuma

Homeen kasvu on mahdollista 0…50 ˚C lämpötilassa suhteellisen kosteusprosentin ollessa yli 80 prosenttia. Home kasvaa paremmin lämpimässä kuin kylmässä. 0…15 ˚C Lämpötilassa suhteellisen kosteusprosentin pitää olla suurempi kuin 80 prosenttia homeen kasvuston syntymiseksi. Todellisuudessa 50 ˚C raja ei ole niin yksiselitteinen. Tavallisesti rakennuksissa tai rakenteissa ei esiinny 50 ˚C tai sen yli olevia lämpötiloja, jolloin kyseinen raja on merkityksetön. Lämpötilan ollessa kasvun kannalta suotuisan alueen ulkopuolella homeen kasvaminen pysähtyy ja homeen kasvu alkaa taantua. Homeindeksin arvo nousee yleensä suureksi, jos homeen kasvu on nopeaa alkuvaiheessa, tällöin myös taantuminen on nopeampaa. (Tampereen teknillinen yliopisto 2017.)

Kriittiset olosuhteet vaikuttavat merkittävästi, miten korkealle tai nopeasti homeindeksi nousee. Esimerkiksi 85 prosentin suhteellisella kosteudella ja 10˚C lämpötilassa homeindeksi kohoaa huomattavasti hitaammin kuin 95 prosentin kosteudella samassa lämpötilassa. (Tampereen teknillinen yliopisto 2017.)



Kuvio 2. Suomalaisen homemallin kuvaamat raja-arvot kasvulle lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mukaan. (Tampereen teknillinen yliopisto 2017.)

3 KUIVANAPITOLÄMMITYS

3.1 Kuivanapitolämmityksellä tavoiteltavat olosuhteet ja käyttökohteet

Kuivanapitolämmityksellä tarkoitetaan lämmitysmuotoa, joka tähtää rakenteiden ja kalusteiden kunnossa pysymiseen energiaa säästäen. Sisäilman olosuhteita voidaan mitata lämpötilan ja suhteellisen kosteuden perusteella. Suhteellinen kosteus vaikuttaa oleellisesti sisäilman laatuun sekä rakenteiden ja kalusteiden säilymiseen. (Piiroinen 5 10.)

Korkea suhteellinen kosteus rakennuksessa mahdollistaa home ja lahosienien kasvamisen ja metallin ruostumisen. Korkea suhteellinen kosteus saattaa myös aiheuttaa hygieniariskejä, lisätä pölypunkkien määrää sekä aiheuttaa värivikoja ja muodon muutoksia rakennusmateriaaleissa. Liian alhainen suhteellinen kosteus lisää puolestaan muun muassa pölyämistä sekä limakalvojen ja ihon oireilua. Kuivanapitolämmityksellä pyritään pitämään lämmittämällä suhteellinen kosteus sopivalla tasolla, ja näin pitää rakenteet ja irtaimisto kunnossa. (Piiroinen & Vinha 2010, 13–14.)

Kosteuden kriittisistä arvoista on Finlexin Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksissa seuraavasti:

> ”5 §. Huoneilman kosteus
>
> > Huoneilman kosteus ei saa olla pitkäkestoisesti niin suuri, että siitä aiheutuu rakenteissa, laitteissa taikka niiden pinnoilla mikrobikasvun riskiä.” (Finlex 2015.)

Finlexin ohjeistus ei käytännössä anna suoria arvoja rakennuksen sisäilman suhteelliselle kosteudelle. Finlexin vanhassa asetuksessa sen sijaan oli sisäilman suhteelliselle kosteudelle asetettu raja 20 — 60 prosentin väliin. (Finlex 2003). Kyseinen raja-arvo on myös mainittu useassa aihetta käsittelevässä kirjassa. Tästä määritelmästä on kuitenkin luovuttu. (Valvira 2016, 11).

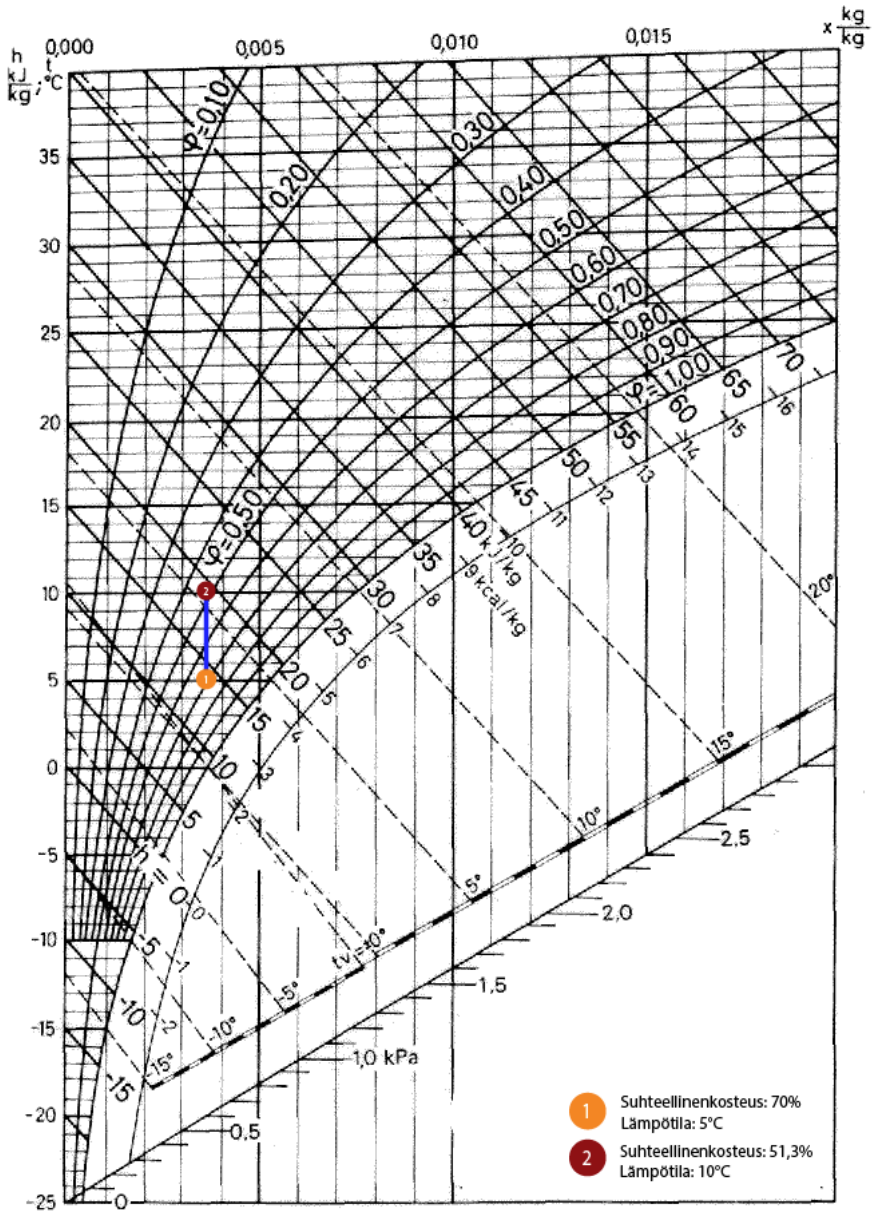
Kuivanapitolämmityksen tavoiteltavat olosuhteet tulevat Suomalaisesta Homemallista. Suomalaisen homemallin perusteella homeen kasvua ei ole havaittavissa lämpötilan ollessa 5 – 20 ˚C ja ilman suhteellisen kosteuden ollessa alle 80 prosenttia. Rakenteet ja

kalusteet pysyvät pääsääntöisesti kunnossa edellä mainituissa olosuhteissa. Rakennuksen suhteellisen kosteuden ollessa noin 70 prosenttia voimme varmistua, että olosuhteet eivät ole kriittisiä esimerkiksi ikkunan pinnoilla, joissa kosteus voi olla 10 – 15 prosenttia korkeampi kuin muussa huoneilmassa. (Piiroinen & Vinha 2010, 13–14.)

Kuivanapitolämmitykselle tavoiteltava suhteellisen kosteuden yläraja on 10 – 15 % homemallissa esitetyn HHL1 riskirajan alapuolella. Näin varmistetaan, että suhteellinen kosteus ei pääse yli 80 prosentin, ja lämmityksenohjaus voi sallia pienet lyhytaikaiset ylärajan ylitykset aiheuttamatta vahinkoja. (Piiroinen & Vinha 2010, 13–14.)

Ilman suhteellista kosteutta säädetään rakennusta lämmittämällä. Lämmin ilma sitoo suuremman määrän kosteutta kuin kylmä ilma. Lämmin ilma kuljettaa kosteutta rakennuksesta pois ilmanvaihdon ja ilmavirtojen avulla. Ilman lämmittäminen ei vaikuta absoluuttiseen kosteuteen, mutta se pienentää ilman suhteellista kosteutta. (Piiroinen & Vinha 2010.)

Mollierin diagrammin avulla voimme arvioida suhteellisen kosteuden käyttäytymistä suhteessa lämpötilaan. Lämpimämpi ilma pystyy sitomaan enemmän kosteutta itseensä kuin kylmempi ilma. Lähtötilanteessa 1 suhteellinen kosteus on 70 prosenttia lämpötilan ollessa 5 ˚C. Ilmaa lämmitetään 5 ˚C. Tilanteessa 2 huomataan että, kun lämpötila on noussut 10 asteeseen on kosteusprosentti pudonnut 51,3 prosenttiin. Rakennuksen lämpötilan ollessa 5 – 20 ˚C on pienillä lämpötilan muutoksilla suuri vaikutus suhteelliseen kosteuteen. (kuvio 3.)



Kuvio 3. Mollierin diagrammilla voi arvioida kosteuden käyttäytymistä eri lämpötiloissa. (Muokattu: The Engineering ToolBox)

On tärkeää huomioida, että kosteus- ja lämpötilaolosuhteet saattavat vaihdella suuresti eri rakennustyyppien välillä. Paikalliset lämpö- ja ilmavuodot saattavat nostaa suhteellisen kosteuden liian korkeaksi ja aiheuttaa kastepisteen syntymisen. Esimerkiksi ikkunan pinnat ja rakennuksen ulkonurkat voivat olla huomattavasti kylmempiä kuin muu rakennus. Yleensä turvalliset olosuhteet saavutetaan sisälämpötilan ollessa 3 – 5 ˚C korkeampi kuin ulkolämpötila.

Kuivanapitolämmitystä mitoittaessa on hyvä huomioida rakennuskohtaiset olosuhteet. Pakkasta kestävät rakennukset ja kalusteet mahdollistavat suuremmat energiansäästömahdollisuudet. Lämpötilan laskiessa nollan alapuolelle voidaan rakennuksessa sallia suurempi suhteellinen kosteus. Suomalaisen homemallin mukaan homeen kasvua ei esiinny pakkasella. (Tampereen teknillinen yliopisto 2017).

Kuivanapitolämmityksen on tarkoitus toimia vaihtoehtona peruslämmölle. Kylmänä pidettyjen hirsirakenteisten rakennusten mittauksissa ei ole havaittu syitä kuivanapitolämmityksen käyttöönotolle. Kuivanapitolämmitys vähentää huomattavasti peruslämmöllä pidetyn vapaa-ajan asunnon sähkönkulutusta. Energiansäästöt voivat vaihdella rakennusten välillä. Keskimäärin on arvioitu, että kuivanapitolämmityksellä voidaan säästää noin puolet peruslämmöllä lämmitykseen käytetystä energiankulutuksesta. (Rytkönen & Kirkkari 2010, 21.)

Vakiotehoisen kuivanapitolämmityksen kosteusteknistä toimintaa on käsitelty kattavasti työssä ”Vakiotehoisen kuivanapitolämmityksen vaikutus hirsimökkien lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan” (Piironen & Vinha 2010).

3.2 Peruslämpö ja vakioteholämmitys

Peruslämmöllä rakennus asetetaan tiettyyn vakiolämpötilaan. Usein rakennus pidetään 5... 7 C välillä. Peruslämmöllä pidettävän rakennuksen lämmitystehon tarve määräytyy ulkolämpötilan mukaan. Energian kulutus on sitä suurempaa, mitä kylmempää ulkona on. Ulkolämpötilan ollessa korkeampi kuin peruslämmöllä asetettu sisälämpötila, termostaatti lopettaa lämmittämisen eikä peruslämpö enää pysty vaikuttamaan rakennuksen suhteellisen kosteuden määrään. Tässä tilanteessa suhteellinen kosteus voi päästä nousemaan korkeaksi. (Tampereen teknillinen yliopisto. 2017)

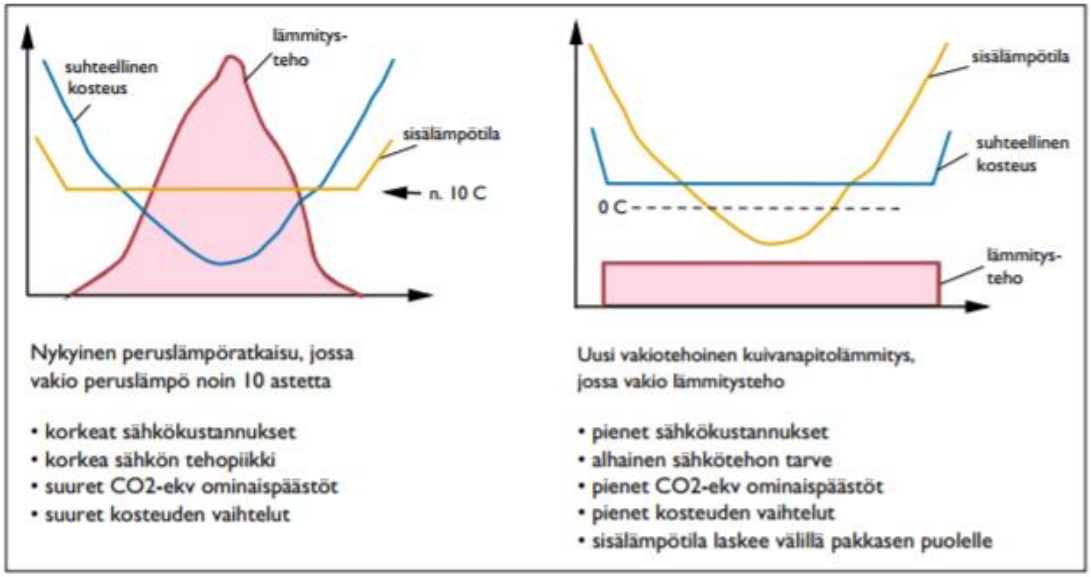
Liian korkea peruslämpö lisää huomattavasti lämmityksestä koituvia kustannuksia. Matalalla peruslämmöllä energiankulutus laskee, mutta riski suhteellisen kosteuden nousemiselle kasvaa.

Kuivanapitolämmitysjärjestelmä voidaan toteuttaa myös vakiotehoon perustuvalla järjestelmällä. Vakioteholämmityksessä rakennus pidetään muutama aste ulkolämpötilaa korkeammalla lämmittämällä rakennusta määritetyllä vakioteholla. Pienellä lämpötilaerolla saadaan pidettyä suhteellinen kosteus tarpeeksi alhaisena. Vakioteho mitoitetaan raken-

nuksen koon, rakenteiden ja varustelun perusteella. Vakioteholla toimiva lämmitin voidaan sijoittaa keskeiselle paikalle niin, että sillä lämmitetään koko rakennusta. Vaihtoehtoisesti voidaan esimerkiksi pesutila lämmittää kokonaan normaalilämpötilaan, ja pesutilan lämpöhäviöt lämmittävät muuta rakennusta. (Piiroinen & Vinha 2010, 15–16.)

Vakioteholämmityksestä saadaan paras hyöty rakennuksissa, joissa kalusteet ja rakenteet kestävät lämpötilan laskun pakkasen puolelle, tämä saattaa tuoda huomattavia energian säästöjä. Yksinkertainen vakiotehojärjestelmä ei estä rakennuksen jäätymistä kovilla pakkasilla. Kiinteän lämmitysjärjestelmän omaavissa rakennuksissa termostaattien avulla on mahdollista määrittää alaraja estämään lämpötilan laskun pakkasen puolelle. Vakioteholämmityksessä sisälämpötila pysyy muutaman asteen ulkolämpötilaa korkeampana ja myötäilee ulkolämpötilan vaihteluita. (Piiroinen & Vinha 2010, 15–16.)

Rakennusta pidettäessä vakiolämmöllä sisäilman kosteus saattaa laskea hyvin matalaksi ja lämmitystehon tarve on pakkasilla hyvin suurta. Vakioteholämmityksessä sisälämpötila myötäilee ulkolämpötilaa ja lämmitysteho pysyy tasaisena koko lämmityskauden ajan. Tämä vähentää turhaa energian kulutusta ja sisäilman kosteus käyttäytyy tasaisemmin (Kuva 1). (Rytkönen & Kirkkari 2010, 19–20.)



Kuva 1. Peruslämmön ja vakiotehoisen kuivanapitolämmityksen vertailu (Rytkönen & Kirkkari 2010, 19)

3.3 Kuivanapitolämmitysjärjestelmän käyttöönotto

Kuivanapitolämmitysjärjestelmää asennettaessa on hyvä olla tietoinen kohderakennuksen vaatimuksista ja järjestelmän soveltavuudesta kyseiseen rakennukseen. Lämmitysjärjestelmän mitoituksessa ja toteutuksessa tulee ottaa huomioon rakennuksen rakenteiden ja varustelun lämpötila- ja kosteusherkkyys. Huomioitavaa on, että rakennuksessa saattaa esiintyä tiloja ja pisteitä, missä lämpötila on huomattavasti sisälämpötilaa matalampi, tällöin myös suhteellinen kosteus on korkeampi. Näitä paikkoja kutsutaan kriittisiksi paikoiksi. Kuivanapitolämmityksen käyttöönotossa onkin hyvä huomioida, että rakennuksen lämpötilaerot pääsevät tasaantumaan mahdollisimman hyvin. Huoneiden ovet ja mahdollisten ulkoseinää vasten olevien kaappien ovet on tarvittaessa hyvä avata. Rakennuksen ollessa lähellä nollaa tai, jos rakennus päästetään pakkaselle, on vesikalusteet hyvä suojata päästämällä putket paineettomaksi ja esimerkiksi vessanpöntön vesisäiliön voi suojata pakkasenestoaineella. Vesikalusteita voi myös pyrkiä suojaamaan lämmittimien ja mahdollisten pakkasvahtien avulla.

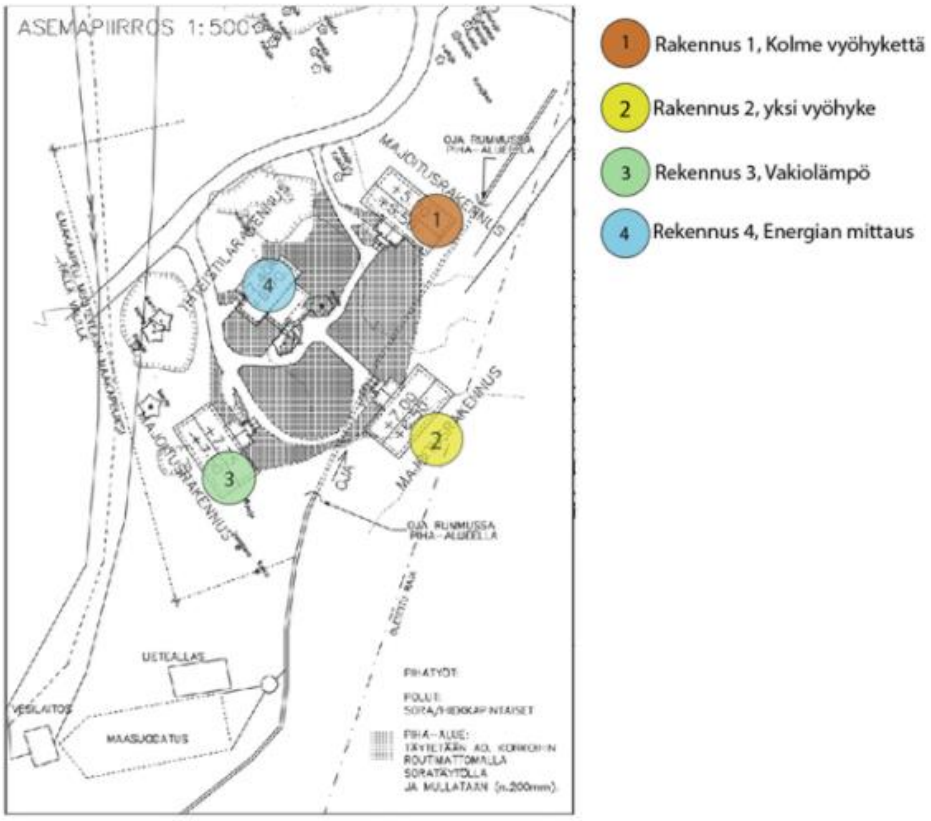
Modernit vapaa-ajan asunnot on yhä useammin kalustettu lähes omakotitalon veroisesti, joten pakkaselle päästäminen ei ole aina mahdollista. Vaativimmissa kohteissa on hyvä käyttää älykkäästi ohjattuja malleja. Älykkäällä ohjauksella voidaan tuoda käyttäjille lisää ominaisuuksia, esimerkiksi luoda etäkäyttötoiminnot ja etävalvonta. Älykäs ohjaus optimoi lämmityksen ohjausta energiatehokkaasti ja mahdollistaa riskipaikkojen hallinnan. Älykkäällä ohjauksella voimme paremmin varmistua siitä, että koko rakennuksessa pysyy tarvittava lämpötilaero sisä- ja ulkoilman välillä. Energiatehokas ohjaus lämmittää rakennusta tasaisemmin, ja tarpeettomasta lämmittämistä päästään eroon. Oikein tehdyllä anturoinnilla voidaan varmistua rakennusten kriittisten paikkojen olosuhteiden hallinnasta ja estää lämpötilan laskeminen liian alahaiseksi. Väärin tehdyllä anturoinnilla estetään energiatehokas ohjaus ja vaarannetaan kriittisten paikkojen olosuhteet. Kuivanapitolämmitys soveltuu parhaiten rakennuksiin, joita ei ole tarkoitettu ympärivuotiseen käyttöön eikä varustelutaso ole korkea.

4 TUTKIMUSASETELMA

Turun yliopisto omistaa useita rakennuksia Seilin saaressa. Seilin saari sijaitsee Airiston eteläosassa saaristonmerellä noin 30 km Turusta. Suurin osa saaren rakennuskannasta on vanhaa, ja rakennusten lämmittämisestä koituvat energian kustannukset ovat suuria. Turun yliopisto on kiinnostunut laskemaan saaren energiankulutusta. Kuivanapitolämmitysjärjestelmä nähtiin yhtenä vaihtoehtona vähentää käyttämättömien rakennuksien energiankulutusta talvikaudella.

TTY on tehty kattavaa tutkimusta kuivanapitolämmityksestä ja sen toteuttamisesta vakioteholämmitykseen perustuen. Tutkimuksen jatkokehitysmahdollisuuksissa on mainittu älykkään kuivanapitolämmitysjärjestelmän toteuttaminen. (Piiroinen & Vinha 2010). Tutkimuksessa toteutettiin ohjausmalli älykkäälle kuivanapitolämmitysjärjestelmälle ja pilotoitiin sen käyttämistä asentamalla kaksi kuivanapitolämmitysjärjestelmää Seilin saaressa sijaitseviin kaksikerroksisiin puurunkoisiin majoitusrakennuksiin. Tutkimuksella oli käytössä yhteensä kolme lähes identtistä 119m^2 rakennusta. Rakennukset ovat yleensä koko talvikauden pois käytöstä, jonka aikana ne on perinteisesti pidetty 17˚C peruslämmöllä.

Tutkimus sijoittui ajalle 14.12.2016 – 30.5.2017. Rakennuksista kahteen asennettiin lämmityksenohjausjärjestelmä, ja yksi rakennuksista pidettiin 17˚C peruslämmöllä. Peruslämmöllä pidettävä rakennus toimii vertailukohteena kuivanapitolämmitysjärjestelmille.



Kuva 2. Rakennuksien numerointi ja sijainnit asemapiirroksessa

Rakennuksista kerättiin mittatietoa järjestelmän toiminnasta. Rakennuksista tarkkailtiin muun muassa kosteuden ja lämpötilan käyttäytymistä ja kokonaisenergiankulutusta. Tutkimuksella on tarkoitus saada lisätietoa kuivanapitolämmityksen toiminnasta, kuivanapitolämmitysjärjestelmän rakentamisesta ja optimoinnista. Lisäksi tarkoitus on lisätä ymmärrystä siitä, mitä järjestelmän rakentaminen vaatii, toteuttaa ohjausmalli lämmitysjärjestelmälle, saada lisätietoa kosteuden ja lämpötilan käyttäytymisestä rakennuksissa ja selvittää onko järjestelmän rakentaminen taloudellisesti kannattavaa.

5 OHJAUSMALLIT

Kuivanapitolämmitysjärjestelmän ohjausmallien ehdot on pyritty määrittelemään mahdollisimman yksinkertaiseen muotoon. Tarkoituksena on helpottaa mallien toisintamista ja käyttämistä tulevaisuudessa. Mallit ovat toteutettavissa helposti usealla eri ohjelmointikielellä ja usealla ohjelmointialustalla.

Aikaisemmissa kuivanapitolämmitystä koskevissa tutkimuksissa ja artikkeleissa kuivanapitolämmitystä on tutkittu vakioteholämmitykseen perustuvalla mallilla, joten energiansäästöt ja rakennusten olosuhteista kerätyt tutkimustulokset saattavat olla eriäviä eri lämmityksenohjausmallien välillä.

Esitetyt ohjausmallit käsittelevät vain toimintoja, jotka vaikuttavat lämmityksen ohjaukseen. Hälytykset, etäohjaus ja muut lisäominaisuudet ovat jätetty pois tästä kuvauksesta.

Ohjausmallin tarkoitus on määritellä ehdot lämmityksen toiminnalle tilanteessa, jossa rakennus ei ole käytössä. Tavoitteena on pitää rakennus kunnossa mahdollisimman pienellä energiankulutuksella. Ohjausmallien ehdot on määritelty pääsääntöisesti perustuen suomalaiseen homemalliin sekä TTY:llä tehtyyn aikaisempaan tutkimukseen kuivanapitolämmityksestä. Ohjausmalleissa oletamme, että rakennuksissa on materiaaleja jokaisesta homehtumisherkkyysluokasta, tästä syystä rakennuksien olosuhteet pyritään pitämään HHLI 1 homehtumisherkkyysluokan alapuolella (Taulukko 3).

Testijärjestelmä on suunniteltu kohteeseen, jossa on sähkölämmitys. Ohjauksella ei pystytä suoraan vaikuttamaan lämmitystehoon, joten ohjaus toimii kytkemällä lämmitys joko päälle tai pois. Lämmityksen käyttäytymistä rajatilanteissa hallitaan hystereesillä. Hystereesillä tarkoitetaan kuollutta aluetta, joka jää ohjauksen päälle ja pois kytkemisen väliin (Alan S. Morris 2001). Hystereesillä estetään liian nopeat muutokset ohjauksessa. Tämä on tärkeää, koska ohjattava laite toimii päälle/pois -periaatteella eikä lämmitystehon määrään päästä suoraan vaikuttamaan.

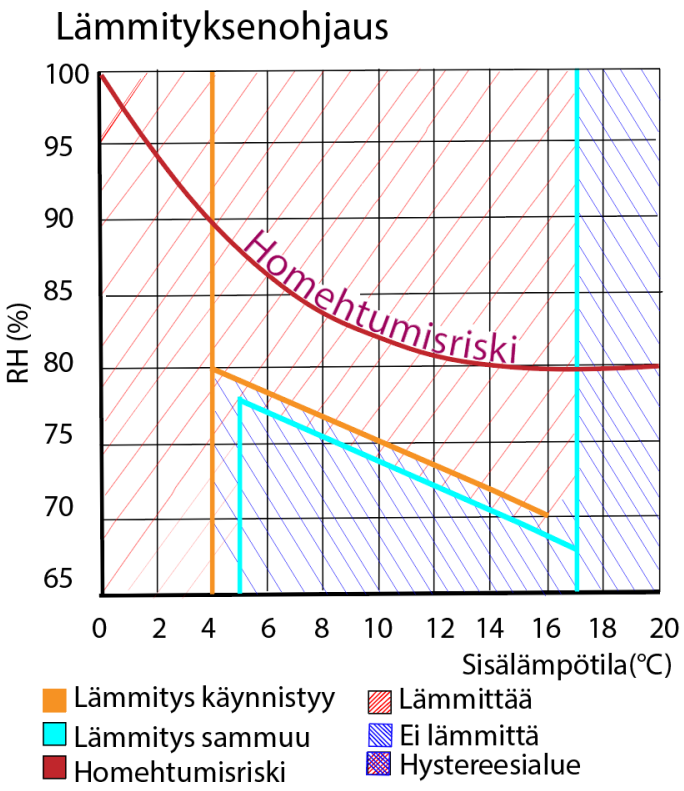
Ohjausmalleissa lämmityksen alaraja on asetettu 4 – 5 ˚C paikkeille. On kuitenkin hyvä huomioida, että homeen kasvua ei esiinny pakkasessa, joten lämpötilan ollessa nollan alapuolella ei lämmittäminen ole aina tarpeellista (kuvio 4). Rakennuksissa, joissa pakkanen ei aiheuta tuhoja, on malli hyvä optimoida sen mukaisesti. Rakennuksen pakkaselle päästäminen säästää huomattavasti enemmän energiaa.

5.1 Ohjausmalli 1

Ohjausmalli 1 on malleista energiatehokkain, mutta se myös nojaa kaikista eniten Suomalaisessa homemallissa esitettyihin kosteuden ja lämpötilan raja-arvoihin. Ohjausmallissa 1 pyrittiin minimoimaan energiankulutus hyödyntämällä matalien lämpötilojen tuomia etuja. Pieni energiankulutus on tarkoitus saavuttaa sallimalla suurempi suhteellinen kosteus rakennuksen sisäilmassa matalissa lämpötiloissa, mikä vähentää lämmitystarvetta.

Ohjaus perustuu sisälämpötilaan ja sisäilman suhteelliseen kosteuteen. Ohjelma kerää viiden minuutin välein tiedon sisälämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Mitattujen arvojen perusteella ohjaus pyrkii myötäilemään lineaarisesti suomalaisen homemallin asettamaa herkkyysluokan yksi alarajaa noin 10 prosenttia tämän alapuolella. Lämpötila saattaa vaihdella rakennuksen sisällä ja rakennuksesta saattaa löytyä kylmempiä alueita, joten 10 prosentin erolla pyritään varmistamaan, että kaikkialla rakennuksessa on alle 80 prosentin suhteellinen kosteus.

Kuvioon 4 on merkitty punaisella viivalla homehtumisriskin raja. Ohjaus pyrkii pitämään sisäilman olosuhteet tämän rajan alapuolella. Rakennuksen sisälämpötila pyritään pitämään aina mahdollisimman alhaisena, kun suhteellinen kosteus ylittää oranssilla merkityn rajan, lämmitys käynnistyy. Rakennusta lämmitettäessä suhteellinen kosteus laskee, koska lämmin ilma sitoo enemmän kosteutta. Lämmitys sammuu, kun kosteus laskee sinisellä merkityn rajan alapuolelle. Raja-arvojen väliin jäävä alue toimii hystereesinä.



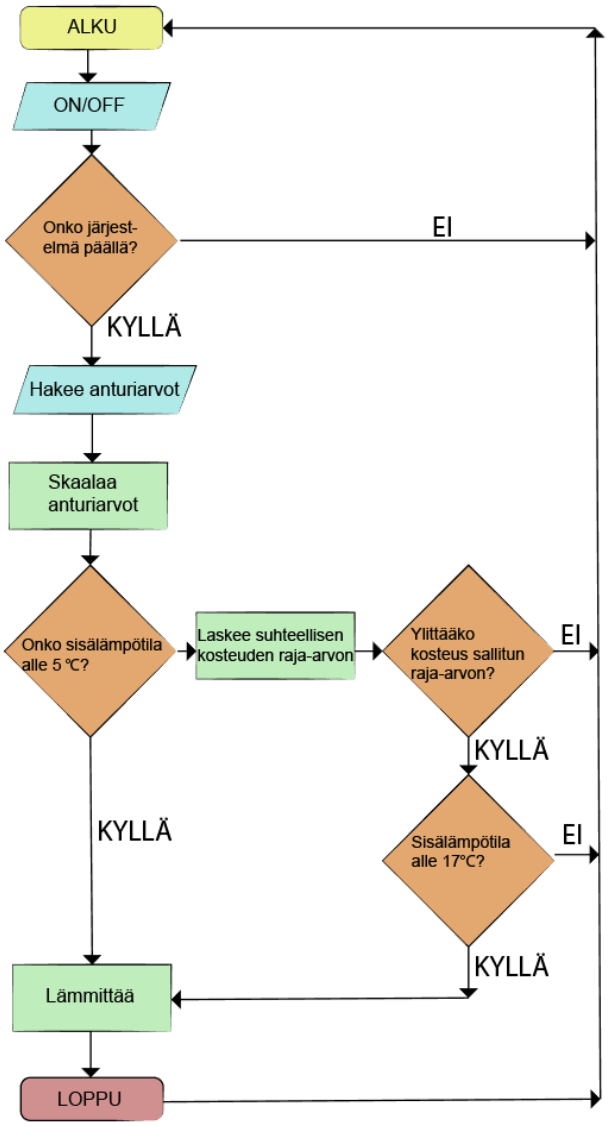
Kuvio 4. Kuvaaja esittää kosteuteen ja lämpötilaan perustuvan lämmityksen ohjauksen raja-arvot ja ehdot suhteessa sisälämpötilaan ja suhteelliseen kosteuteen.

Pystyviivat viiden ja neljän asteen kohdalla kuvaavat lämmityksen ala- ja ylärajaa. Lämmitys käynnistyy neljässä asteessa ja sammuu viidessä asteessa. Ohjelmallisesti tätä voidaan vertailla pienempi ja suurempi kuin - funktiolla. Sisäilman ollessa viiden asteen yläpuolella ohjaus seuraa lineaarista funktiota (kaava 2). Offset-arvoon vaikuttamalla voidaan asettaa kaksi lineaarista funktiota hieman erilleen toisistaan: tämä mahdollistaa hystereesin luomisen. Kaavalla 2 lasketaan suurin sallittu kosteuden arvo tietyssä lämpötilassa. Suurinta sallittua suhteellisen kosteuden arvoa verrataan mitattuun suhteellisen kosteuden arvoon. Jos mitattu suhteellisen kosteuden arvo on suurempi kuin laskettu suurin sallittu arvo, rakennusta tarvitsee lämmittää. Suurimmassa osassa ohjelmointi- ja logiikka-alustoja on tämä lineaarinen malli mahdollista kääntää myötäilemään luonnollista käyrää. Tämä mahdollistaa tarkemman ohjauksen luomisen. Lämmittämiselle on asetettu myös yläraja, ja lämmittäminen lopetetaan kokonaan sisälämpötilan noustessa tämän rajan yläpuolelle.

$$RH_{max} = t_{now}(-1) + RH_{offset} \quad (2)$$

Kaavan 2 avulla lasketaan suurin sallittu suhteellinen kosteus tietyssä lämpötilassa. RH_{offset} avulla asetetaan rajan korkeus, ja se kerrotaan negatiiviseksi käännetyllä realiaikaisella lämpötilan arvolla.

Vuokaaviossa on esitetty yksinkertaistettuna ohjelman toiminta ja vaatimukset. Ohjelma on käytännössä takaisinkytketty säätöpiiri. Säätöpiiri tarkkailee huonelämpötilaa ja kosteutta. Mitattuja arvoja verrataan ohjelman ehdoissa määritettyihin raja-arvoihin. Anturiarvojen ylittäessä nämä raja-arvot ohjataan rakennuksen lämmitys päälle. Anturiarvojen laskiessa halutulle tasolle lämmittäminen lopetetaan. Näitä raja-arvoja ovat sisälämpötilan alaraja ja yläraja. Ylä- ja alarajan välillä järjestelmä lämmittää vain suhteellisen kosteuden noustessa laskennallisen maksimiarvon yläpuolelle.



Kuva 3. Vuokaavio ohjausmallin 1 toiminnasta.

Lämmitystä ohjaavat ehdot:

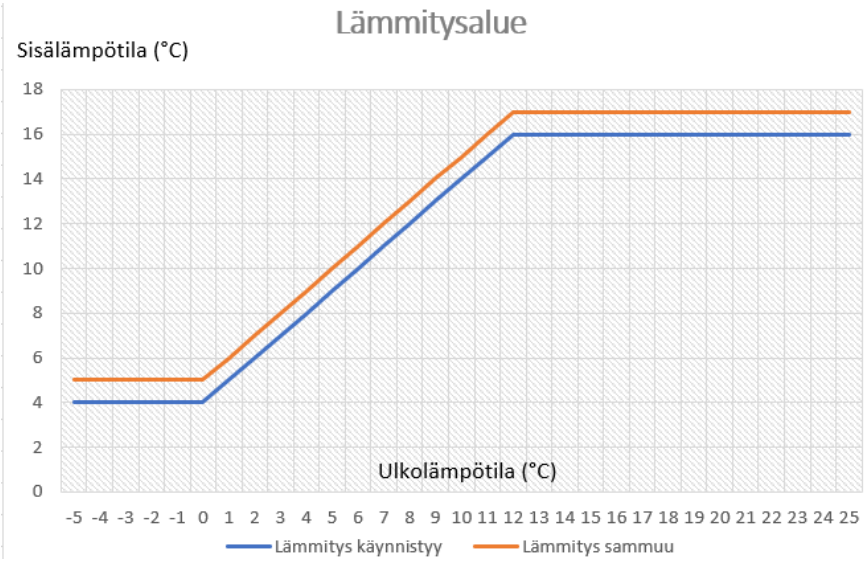
- Lämmitysjärjestelmä päällä vai pois päältä
- Lämpötila ei saa koskaan laskea alle 5 ˚C.
- Suhteellinen kosteus ei saa ylittää laskettua raja-arvoa.
- Lämmitys lopetetaan sisälämpötilan noustessa yli 17 ˚C

Huomioitavaa on, että jokaiseen lämmitystä ohjaavaan ehtoon tarvitaan noin +/- 0.5 asteen hystereesi.

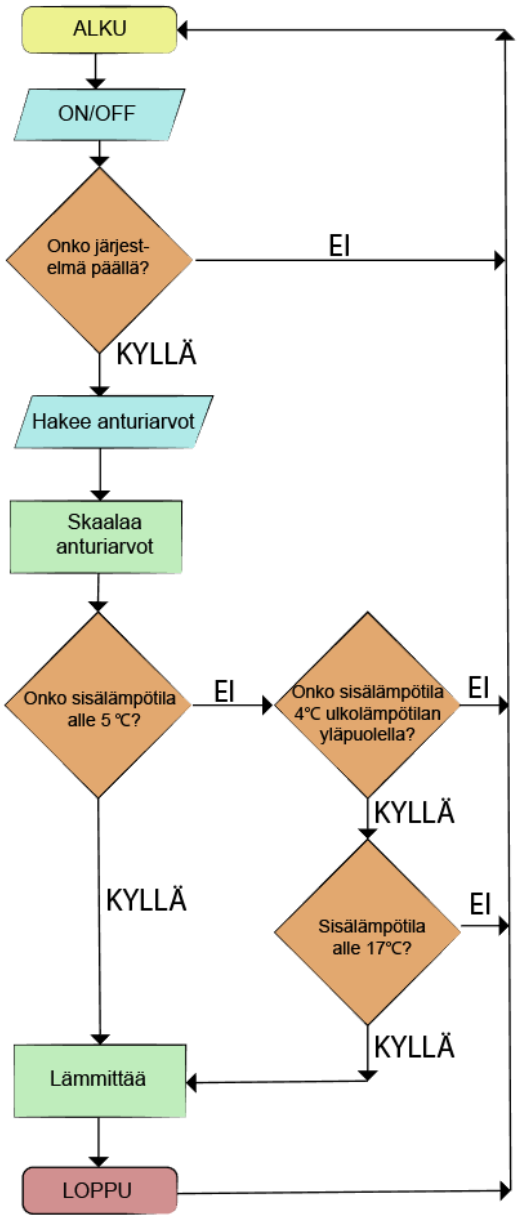
5.2 Ohjausmalli 2

Ohjausmalli 2 toimi varavaihtoehtona ohjausmallille 1. Mikäli ohjausmalli 1 olisi osoittautunut testijakson aikana toimimattomaksi, olisimme vaihtaneet ohjausmallin 2 käyttöön. Toimimattomuudella tarkoitetaan esimerkiksi liian korkeaa suhteellista kosteutta tai liian matalia lämpötiloja rakennuksessa.

Lämpötilaeroon perustuvassa ohjauksessa ohjausehtoina ovat lämpötilan ala- ja yläraja ja ehto, joka pitää sisälämpötilan aina muutaman asteen ulkolämpötilaa korkeammalla. Kuvion 5 esimerkissä sisälämpötila pidetään 3 – 4 ˚C ulkolämpötilan yläpuolella. Tässä ohjausmallissa ei tarvitse tietää ilman suhteellista kosteutta vaan ohjaamiseen käytetään tietoa sisä- ja ulkolämpötilasta. Lämpötilaerosta johtuen ilmansuhteellinen kosteus pysyy alhaisena. Järjestelmän lämmityksen käyttäytyminen on esitetty sisä- ja ulkolämpötilan suhteena kuviossa 5. Lämmitys käynnistyy sinisen viivan kohdalla ja sammuu, kun saavuttaa oranssin rajan. Viivojen väliin jäävä alue toimii hystereesinä ja estää kontaktorien hallitsemattoman käyttäytymisen.



Kuvio 5. Kuvaaja esittää lämpötilaeroon perustuvan ohjasmallin lämmityksen käyttäytymisen sisä- ja ulkolämpötilan suhteen. Kuvaajan y-akselilla on esitetty sisälämpötila ja x-akselilla ulkolämpötila.



Kuva 4. Vuokaavio ohjausmallin 2 toiminnasta

Lämmitystä ohjaavat ehdot:

- Lämmitysjärjestelmä päällä vai pois päältä
- Lämpötila ei saa koskaan laskea alle viiden asteen.
- Lämmittää, jos sisä- ja ulkolämpötilan ero alle 4 ˚C.
- Lämmitys lopetetaan sisälämpötilan noustessa yli 17 ˚C

5.3 Ohjausmalli 3

Nämä kaksi edellä mainittua mallia yhdistämällä voidaan luoda malli, jossa lämpötilaero minimoidaan tai sisälämpötila pidetään vähintään samassa lämpötilassa ulkolämpötilan kanssa. Rakennusta lämmitetään enemmän vain silloin, kun kosteus nousee raja-arvojen yläpuolelle. Tämä malli tarvitsee suuremman määrän anturointia, koska ohjaukseen tarvitaan tieto sisälämpötilasta, suhteellisesta kosteudesta ja ulkolämpötilasta.

Ohjausmalli 3 kuluttaa teoriassa vähemmän energiaa kuin ohjausmalli 2, mutta enemmän kuin ohjausmalli 1. Ohjausmallin 3 etuna ohjausmalliin 1 nähden on se, että se ei koskaan kellu ulkolämpötilan mukana, vaan pitää rakennuksessa aina vähintään saman lämpötilan ulkolämpötilan kanssa, ja on silti kykenevä nopeasti vastaamaan lisääntyvän kosteuden tuomiin muutoksiin rakennuksessa.

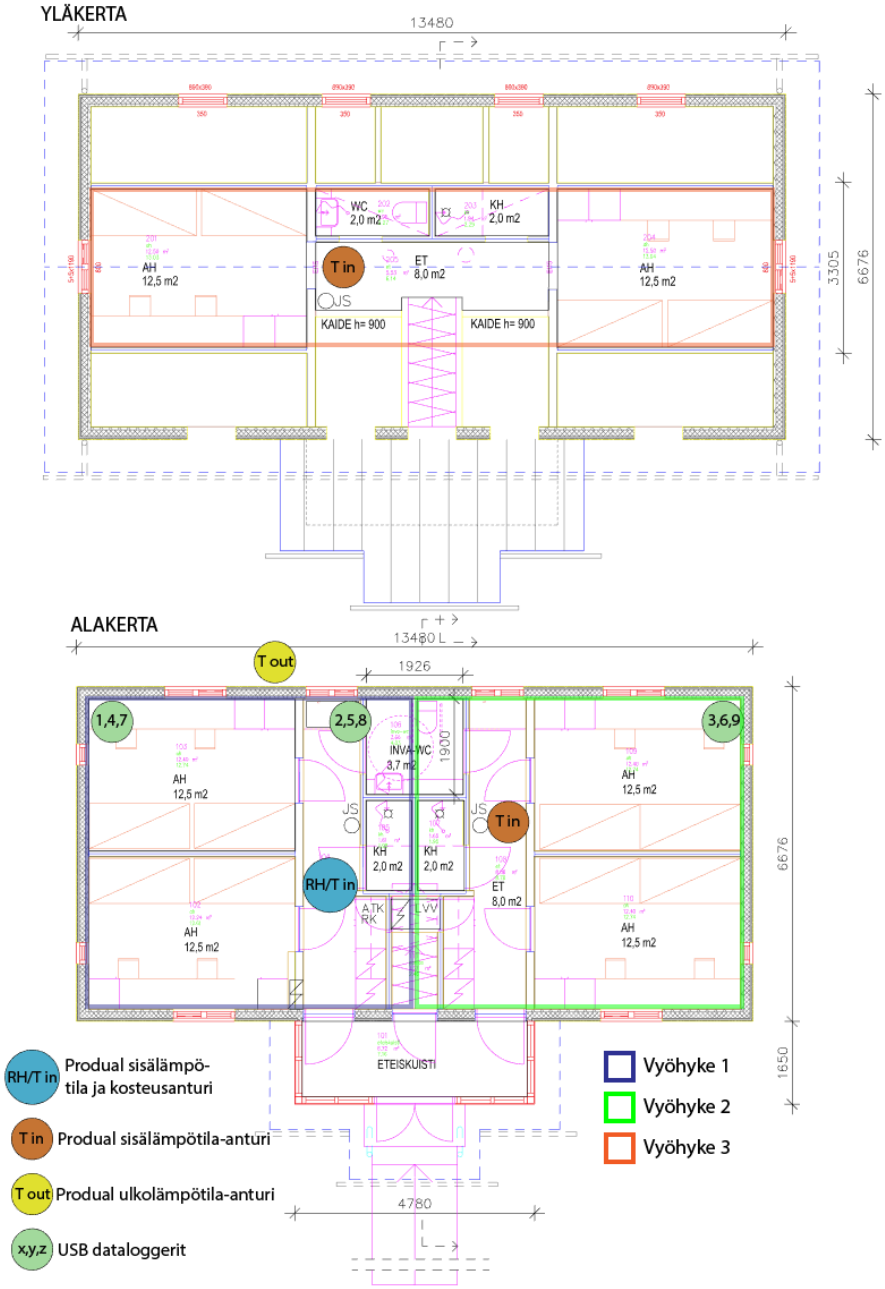
6 TESTIJÄRJESTELMÄ

Tässä kappaleessa käydään läpi pilottikohteeseen asennetun järjestelmän rakenne komponentit, asentaminen, ohjelmointi ja käyttöönotto. Testijärjestelmä suunniteltiin kohteen vaatimusten mukaisesti. Testin käytössä oli kolme identtistä majoitusrakennusta, joista kahteen asennettiin kuivanapitolämmitysjärjestelmä. Rakennus kolme pidettiin vertailukohteena. Rakennuksien sijainti ja numerointi on esitetty asemapiirroksessa (Kuva 2).

Testijärjestelmä on suunniteltu toimimaan Siemens Logo! :n ympärille. Siemens logo on tarkoitettu pieniin automaatiojärjestelmiin, ja se soveltuu kyseiseen käyttötarkoitukseen hyvin. Logiikat asennettiin sähkökaappien yhteyteen, logiikalla ohjattiin suoraan rakennuksen omaa sähkölämmitystä.

Kaikista kolmesta rakennuksesta kerättiin kosteus- ja lämpötila-arvot samoista mittapisteistä. Lämpötila- ja kosteusarvot kerättiin Produalin huonelämpötila- ja kosteusantureista ja dataloggereista koostuvasta rinnakkaisesta mittausjärjestelmästä. Produalin antureita käytettiin lämmityksen ohjauksessa. Rakennuksista kerättiin tietoa myös kokonaisenergiankulutuksesta. Kokonaisenergiankulutus mitattiin rakennukseen 4 asennetuista rakennuskohtaisista energiamittareista.

Rakennusten sähköpatterit jaettiin kolmeen lämmitysvyöhykkeeseen. Vyöhykkeet valittiin rakennuksen pohjaratkaisuun sopiviksi. Rakennuksen alakerta jaettiin kahteen identtiseen vyöhykkeeseen, ja rakennuksen yläkerta toimi kolmantena vyöhykkeenä (kuva 5). Vyöhykkeiden lämmitysjärjestelmän sähkönsyöttö ryhmiteltiin kontaktoreiden taakse, tämä mahdollisti vyöhykekohtaisen lämmityksen ohjaamisen. Kontaktoreita ohjataan logiikalta tulevilla ohjaussignaaleilla. Ohjaus perustuu rakennuksesta mitattuihin kosteus- ja lämpötila-arvoihin.



Kuva 5. Anturien sijoittelu ja lämmitysvyöhykkeet asemapiirroksessa

Rakennuksiin yksi ja kaksi asennetut lämmitysjärjestelmät eroavat ohjauksellisesti toisistaan. Rakennuksen yksi vyöhykkeitä ohjataan erikseen ja rakennuksen kaksi kaikkia vyöhykkeitä ohjataan samanaikaisesti. Tämä tarkoittaa, että rakennuksen yksi lämmitystä ohjataan vyöhykekohtaisten antureiden perusteella kolmena erillisenä vyöhykkeenä. Rakennusta lämmitetään vain vyöhykkeillä, joissa se todetaan ohjausehtojen mu-

kaan tarpeelliseksi, kun taas rakennuksen kaksi kaikkia vyöhykkeitä ohjataan yhden keskeisesti sijoitetun anturin perusteella. Rakennuksen 2 ohjauksessa käytetty anturi on esitetty kuvassa 5 sinisellä.

Rakennukset sijaitsivat Seilin saarella, jonne kulkuyhteydet ovat huonoja. Järjestelmä piti suunnitella toimimaan hyvin kyseisessä ympäristössä, ja mahdollisista virheistä piti saada tieto etänä. Etäyhteys järjestelmään luotiin kannettavalla tietokoneella. Tietokone asennettiin samaan lähiverkkoon Siemens logo!: jen kanssa, ja siihen asennettiin etäkäyttöyhteys. Tämä mahdollisti järjestelmän hallinnan ja päivitysten tekemisen etäyhteyden kautta.

6.1 Komponentit

Taulukko 4. Taulukossa on listattuna kaikki järjestelmän komponentit rakennuskohtaisesti.

	Rakennus 1	Rakennus 2	Rakennus 3	Rakennus 4
Energiamittarit				3 kpl
Dataloggerit	3 kpl	3 kpl	3 kpl	
Ulkolämpötila-anturi	1 kpl			
Sisälämpötila-anturi	3 kpl	3 kpl	3 kpl	
Kosteusanturi	1 kpl	1 kpl	1 kpl	
Langaton tukiasema	2 kpl			
Logo! 8		1 kpl		
Logo TDE 1kpl				
Nokkakytkin	3 kpl	3 kpl		
Kontaktori	3 kpl	3 kpl		
Tietokone				1 kpl

Taulukossa 4 on esitetty kaikki järjestelmässä käytetyt komponentit. Järjestelmän komponentit ovat valittu vastaamaan kyseisen testiympäristön tarpeita. Testijärjestelmästä piti kyetä keräämään tietoa kaikista antureista, lämmityksen toiminnasta ja logiikan toi-

minnasta. Komponenttien piti kyetä toimimaan myös saaren olosuhteissa. Saarella tapahtuu huomattava määrä sähkökatkoja ja järjestelmän pitää pystyä nopeasti käynnistymään uudelleen sähköjen palautuessa.

6.1.1 Ohjaavat anturit

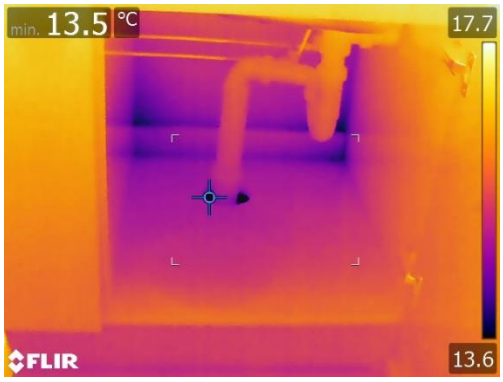
Ohjaavien anturien valinnassa otettiin huomioon anturin teknisten ominaisuuksien lisäksi niiden asennettavuus. Kohteeseen valittiin Produal-merkkisiä taloautomaatioon tarkoitettuja antureita. Suurin osa antureista on langattomia. Langattomat anturit helpottavat asennustyötä, ja asennustyöstä koituvat jäljet vähenevät huomattavasti. Langattomien anturien kantama vapaassa tilassa on valmistajan mukaan 500 metriä. Kantama mahdollistaa yhden langattoman tukiaseman käyttämisen, koska rakennukset sijaitsivat lähellä toisiaan. Produalin FLTA-merkkinen tukiasema on asennettu rakennukseen yksi, josta logiikka jakaa tarpeelliset anturitiedot paikallisen Ethernet-verkon yli muille logiikoille.

Anturien sijainnit rakennuksissa on merkitty asemapiirrokseen (Kuva 5). Sisälämpötila-anturit asennettiin keskeiselle paikalle 1,1 metrin korkeuteen lattiasta. Ulkolämpötila-anturi on asennettu varjoiseen paikkaan rakennuksen yksi pohjoispuolelle. Vaikka rakennukset anturointiin identtisesti, rakennuksen kaksi ohjaamiseen käytettiin kuitenkin vain yhtä langallista lämpötila- ja kosteusanturia, joka on merkitty kuvassa 5 sinisellä. Muut anturit toimivat tiedonkeruussa. Rakennuksessa kaksi käytettiin langallista anturia, koska ohjauksen kannalta tärkeää tietoa ei haluttu kierrättää rakennuksen yksi langattoman tukiaseman kautta.

6.1.2 Dataloggerit

Logoon liitettyjen anturien lisäksi rakennuksiin asennettiin myös rinnakkainen mittausjärjestelmä. Rinnakkaisella mittausjärjestelmällä lisättiin mittapisteiden määrää, varmistettiin rakennuksen kriittisiä paikkoja ja muun mittatiedon oikeellisuutta. Mittausjärjestelmä toteutettiin Extech RHT10 usb -dataloggereilla. Loggerit mittaavat 30 minuutin välein kosteus- ja lämpötila-arvot. Loggerit on sijoitettu paikkoihin, joissa kosteus- tai lämpötila-arvot ovat todennäköisimmin kriittisellä alueella. Esimerkiksi dataloggeri kaksi sijoitettiin allaskaappiin (kuva 8). Allaskaappi on asennettu vasten rakennuksen ulkoseinää.

Loggerit yksi ja kolme asennettiin rakennuksen ulkonurkkiin noin 20 cm:n korkeudelle lattiasta (kuva 7). Lämpökuvissa on selvästi havaittavissa suljettujen tilojen, ulkonurkkien tai ilmavuotojen aiheuttamia lämpötilaeroja. Lämpimän ja kylmän alueen välillä saattaa olla huomattava ero suhteellisessa kosteudessa. Dataloggerit asennettiin paikalleen testijakson alussa, ja mittatiedot loggereista kerättiin talteen testijakson loputtua.



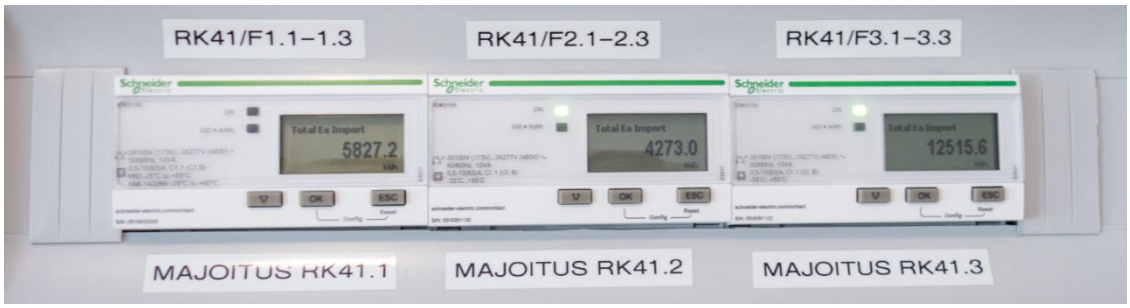
Kuva 7. Suljetussa allaskaapissa lämpötila ei pääse tasoittumaan huoneilman kanssa.

Kuva 6. Ulkonurkan lämpötila on noin 10 ˚C matalampi kuin muun huoneen lämpötila.

Kuva 8. Extech usb -dataloggeri

6.1.3 Energiamittarit

Datan analysoinnin kannalta on tärkeää saada tietoa rakennuksien kokonaisenergiankulutuksesta. Rakennuksen kokonaisenergiankulutusta seurattiin suoraan mittaavilla Schneider electric iem 3155 -energiamittareilla. (Schneider 2018). Testijärjestelmän rakennuksien sähköt kulkevat päärakennuksen sähkökaapin kautta. Energiamittarit asennettiin päärakennuksen sähkökaapin yhteyteen. Rakennuksissa ei aikaisemmin ollut rakennuskohtaista energian mittausta.



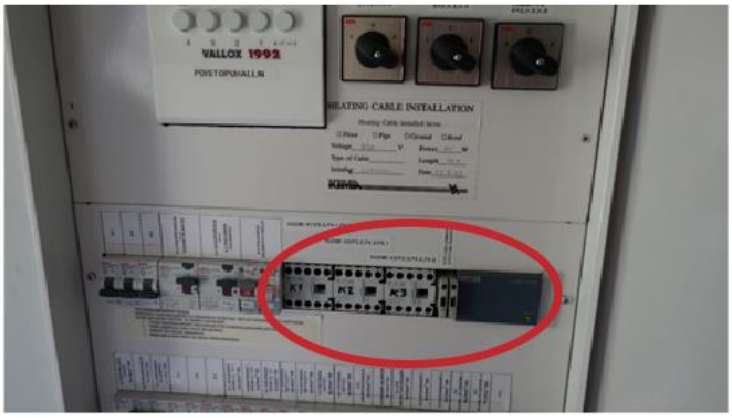
Kuva 9. Kuvassa on rakennukseen 1 asennetut energiamittarit. Energiamittarit mittaavat kaikkien testirakennusten kokonaisenergiankulutusta.

6.1.4 Kontaktorit

Siemens Logo! toimii 24 voltin jännitteellä, samalla jännitteellä ohjataan kontaktoreita. Rakennuksen sähköpattereita ohjaavat sähköt on ryhmitelty kolmen kontaktorin taakse. Tämä tasaa yksittäisen kontaktorin kuormaa ja mahdollistaa sähköpatterien ohjaamisen erillisinä vyöhykkeinä. Kontaktorien ja logon väliin on asennettu myös kytkimet, joilla järjestelmän voi ohittaa.

Lämmityksen ohjauksessa olisi hyvä käyttää avautuvalla koskettimella varustettuja kontaktoreita (NC, normaly Closed). Avautuvalla koskettimella toimiva kontaktori katkaisee virran saadessaan ohjaussignaalin. Tämä helpottaa vikatilanteiden käsittelyä tilanteissa, joissa logiikka vikaantuu tai lämmitys pitää jostain muusta syystä saada pakko-ohjattua päälle. Logiikan sammuessa NC-kontaktorin kosketin on kiinni. Kontaktoreiden ollessa suljettuna rakennuksen sähkölämmitys toimii normaalisti.

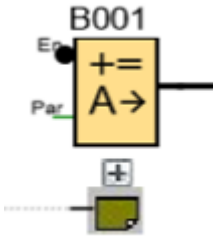
Useamman kontaktorin käyttäminen vähentää kuormaa yksittäiseltä kontaktorilta, mahdollistaa lämmityksen jakamisen useamman sulakkeen taakse, useamman vyöhykkeen ohjaamisen ja tekee järjestelmästä samalla varmatoimisemman. Kontaktorit on asennettu sähkökaappiin DIN-kiskoon (Kuva 10.). Testijärjestelmässä käytettiin kuitenkin NO-kontaktoreita, koska asennushetkellä saaressa ei muita kontaktoreita ollut saatavilla.



Kuva 10. Kontaktorit, nokkakytkimet ja logon virtalähde asennettiin sähkötauluun.

6.1.5 Logiikka

Lämmitysjärjestelmän ohjauksessa käytetään Siemens Logo! 8:n ohjelmoitavaa relettä. Se on tarkoitettu lähinnä pienimuotoisiin automaatio-ohjauksiin, mutta rele on kykenevä toimimaan myös osana isompaa kokonaisuutta. Logossa on kahdeksan tuloa, joista neljä voidaan muuntaa analogisiksi. Logossa on myös neljä relelähtöä, ja sitä on myös helppo laajentaa lisäämällä kaksi laitetta rinnakkain tai lisäämällä I/O-laajennusmoduuli. Laitteet kommunikoivat keskenään Ethernet-verkossa. (Siemens 2018.)



Kuva 11 Esimerkki kuva Logo! FDB -ohjelmoinnissa käytettävästä toimilohkosta.

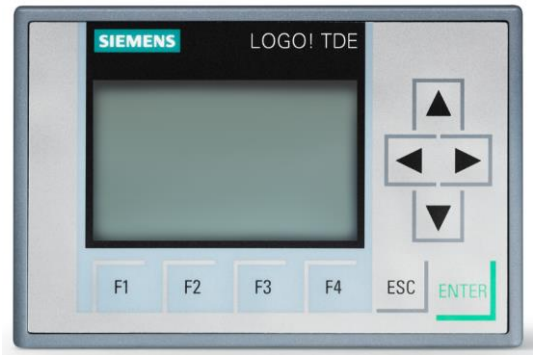
Siemens Logo! 8 -ohjelmoinnissa käytetään logiikkaohjelmoinnille tyypillistä FBD- tai LD-ohjelmointitapaa. FDB-ohjelmoinnissa tulojen ja lähtöjen välille määritetään toiminnot toimilohkoilla. Tieto kulkee vasemmalta oikealle. Siemens logo! 8 -ohjelmoinnissa käytetään yleensä LOGO! Soft comfort v8.x -ohjelmaa. Ohjelmassa on mahdollisuus myös simuloida logiikan toimintaa. Tämä on hyödyllinen työkalu ohjelmaa suunniteltaessa tai päivittäessä. (Siemens 2018.)

Logiikan valinnassa otettiin huomioon soveltuvuus taloautomaatioon. Logiikan tuli olla kooltaan pieni, jotta se saatiin mahtumaan siististi rakennuksen sähkökaapin yhteyteen. Logiikassa piti olla tarpeellinen määrä I/O-liitäntöjä. Tuloista suurin osa on analogisia ja lähdöistä piti saada vähintään 3x24 V ON/OFF-signaalia. Logiikan piti myös soveltua tiedon keräämiseen, jotta tarvittavat anturitiedot saatiin tallennettua ja logiikan käyttäytymistä voitiin seurata.

Kuva 12. Rakennuksen yksi kuivanapitolämmityksen ohjaus. Kuvassa on kaksi Siemens LOGO! 8 -logiikkaa ja FLTA-tukiasema.

6.1.6 LOGO! tekstinäyttö

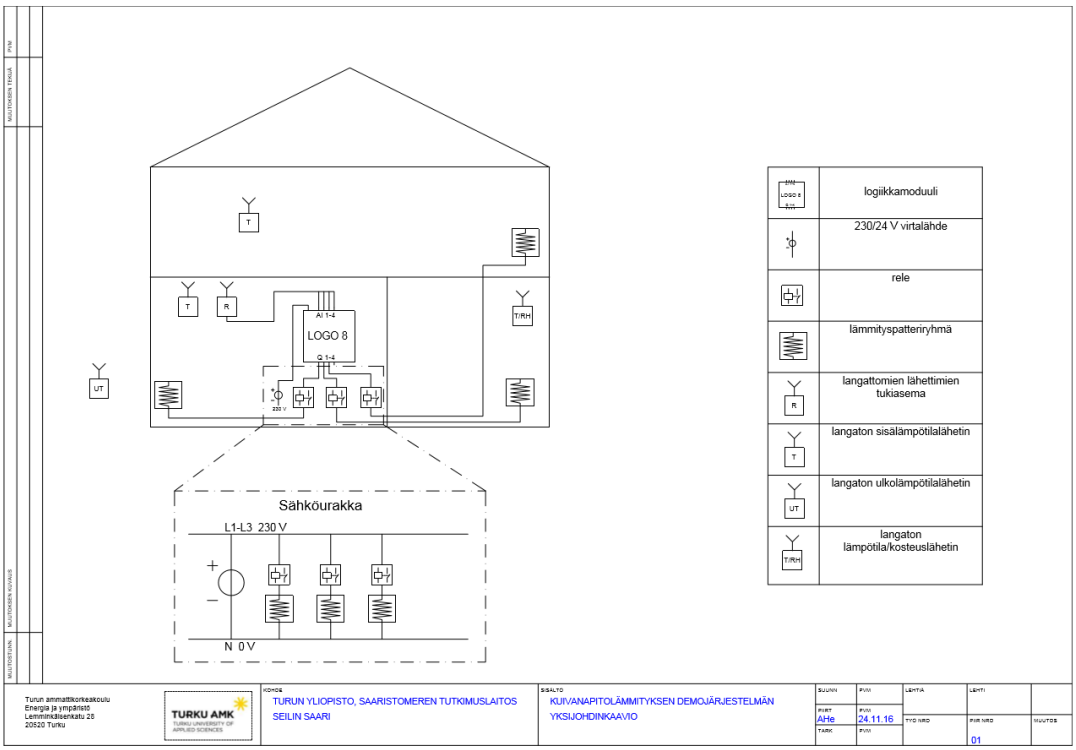
Logo TDE on logon kanssa käytettäväksi tarkoitettu tekstinäyttö, joka mahdollistaa järjestelmän seurannan ja etäkäyttämisen. Logo!:n ja TDE:n välille muodostetaan yhteys Ethernetilla, ja niitä käytetään yleensä samassa lähiverkossa. Logo TDE asennettiin rakennuksista vastaavan huoltomiehen työpisteelle. Tekstinäyttö mahdollistaa järjestelmän kytkemisen päälle tai pois ja toistaa mahdolliset hälytykset. Hälytykset esitettiin näytöllä punaisella taustalla ja virheviestillä. (Siemens 2018).



Kuva 13. Logo TDE tekstinäyttö (Siemens 2018)

6.2 Asentaminen

Sähkökaapin ahtauden takia ohjausjärjestelmä asennettiin erilliseen suojakoteloon sähkökaapin yläpuolelle. Sähkökaappiin asennettiin järjestelmän virransyöttö, kontaktorit ja nokkakytkimet. Ohjausjärjestelmältä sähkökaappiin kulkee ainoastaan 24V DC-ohjaussignaalit ja logiikan käyttöjännite. Langaton anturointi nopeutti huomattavasti asennustyötä ja vähensi asennuksesta koituvia jälkiä. Rakennuksen sähkölämmityksen sähkönsyöttö jouduttiin ryhmitelmään uudelleen vyöhykeohjauksen mahdollistamiseksi. Rakennukseen neljä asennettiin rakennuskohtaiset suoraan mittaavat energiamittarit.



Kuva 14. Sähkötyöt ja sähköurakka

Ohjausjärjestelmän asennus ja käyttöönotto tapahtuivat Turun Ammattikorkeakoulun toimesta, AC-puolen kytkentöjen muuttamisesta ja asentamisesta vastasi Caverion Oy:n sähköasentaja. Asennuksessa otettiin huomioon mahdolliset järjestelmään tulevat muutokset. Molempien rakennuksien lämmitysjärjestelmien sähköt kytkettiin kolmen kontaktorin taakse erillisiksi lämmitysvyöhykkeiksi. Tämä mahdollistaa muutoksien tekemisen vyöhykeohjauksen ja ohjelmamallien välillä pelkkää ohjelmaa vaihtamalla.

Pilotointijakson ajaksi rakennukseen asennettiin myös varalämmitysjärjestelmä. Varalämmitysjärjestelmän tarkoituksena oli varmistaa, että esimerkiksi ohjausjärjestelmän vikautuessa rakennuksen sisälämpötila ei pääse laskemaan pakkasen puolelle. Varalämmitysjärjestelmät sijoitettiin pesuhuoneisiin, jotka sijaitsevat lämmön jakautumisen kannalta optimaalisessa paikassa. Varalämmitysjärjestelmän tehtävä on käynnistyä, jos rakennuksen lämpötila lähestyy nollaa. Varajärjestelmän termostaatit asetettiin ohjelman lämmitysalueen alapuolelle noin 3 asteen lämpötilaan, jotta ne eivät vaikuttaisi ohjausjärjestelmän toimintaan ja testin tuloksiin. Vesivahinkojen välttämiseksi vesiputkista tyhjennettiin paineet ja vessanpöntöt suojattiin alkoholipohjaisella pakkassuoja-aineella.

6.3 Logiikka ja ohjelmointi

Ohjelman tarkoitus on hallita ohjattavan rakennuksen lämmitysjärjestelmää kontrolloimalla sen sähkönsyöttöä. Ohjaus perustuu huoneistosta kerättävään anturitietoon, jonka avulla tarkkaillaan rakennuksen lämmitystarvetta. Kyseisen lämmitysjärjestelmän kohdalla voidaan puhua niin sanotusta takaisinkytketystä ohjauksesta, jos anturien mittavaa arvo poikkeaa ohjausarvosta antaa ohjaus käskyn lämmittää. Rakennusta lämmitetään niin pitkään, että anturien mittaamat arvot ovat halutulla tasolla. Lämmityksen ohjaus toimii ON/OFF-periaatteella, ohjaus on joko päällä tai pois. ON/OFF-ohjaus soveltuu hyvin kyseisen tilanteen hallitsemiseen. Muutokset ovat hitaita, ja vanhanmalliset sähköpatterit eivät tue muuta ohjausmuotoa.

Ohjelman tärkein toiminto on ohjata rakennuksen lämmitystä. Rakennuksen lämmitykseen käytetty ohjelma on esitetty kuvassa 15. Kuvan ohjelmassa on esitettynä vain lämmitykseen liittyvät toiminnot. Rakennuksiin asennetulla ohjelmalla on kuitenkin muitakin funktioita: Ohjelman on tarkoitus kerätä mittatietoa jokaiselta anturilta, tarkkailla ohjelman toimivuutta, merkitä tulojen ja lähtöjen tilat ja ilmoittaa mahdollisista virhetilanteista.

Data tallennetaan logon muistikortille. Ajastinpiiri antaa tunnin välein käskyn tallentaa kaikkien anturien ja logon lähtöjen tiedot tekstitiedostoon. Kaikki tiedot aikaleimataan tallentamisen yhteydessä.

Ohjelmassa on hälytystoiminnot virhetilanteiden varalle. Hälytyksillä varmistettiin rakennuksien kuntoa ja testijakson onnistumista. Järjestelmän hälytykset ohjataan logon tekstinäytölle, joka sijoitettiin rakennusta valvovan huoltomiehen työpisteelle.

Hälytys käynnistyy, jos joku seuraavista ehdoista toteutuu:

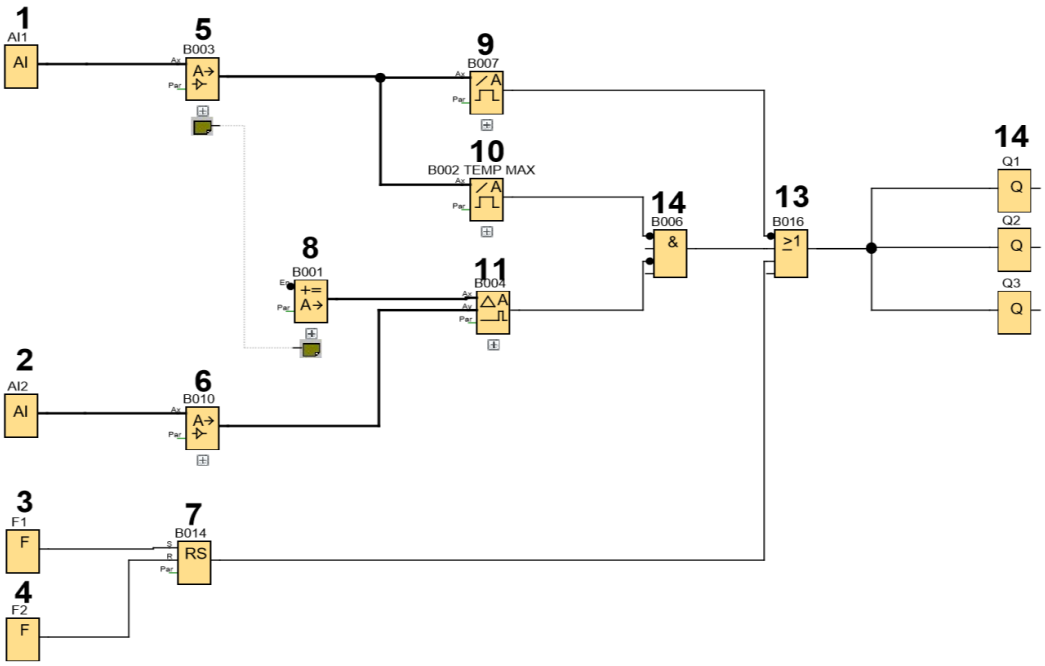
- Rakennuksen lämpötila laskee alle 1 ˚C.
- Rakennuksen kosteus nousee yli 80 prosentin.
- Anturin arvo on pysynyt samana yli vuorokauden.

Anturin arvon toimintaa tarkkaillaan ajastimella. Anturin arvon muuttuessa ajastin nollautuu. Anturin arvon pysyessä samana yli vuorokauden, voimme päätellä anturin hajonneen, tai yhteyden anturiin katkenneen: tällöin ajastin antaa hälytyskäskyn tekstinäytölle. Hälytyksen sattuessa näytön väri muuttuu punaiseksi ja näytöllä toistetaan hälytystä kuvaava virhekoodi.

Lämmitysjärjestelmän tilaa voi hallita manuaalisesti sähkökaappiin kytketyistä nokkakytkimistä tai paikallisen verkon yli joko selaimen käyttöliittymällä tai logon TDE-tekstinäytöllä. Järjestelmän käyttöliittymä tarjoaa mahdollisuuden valita, onko ohjausjärjestelmä käytössä. Käyttöliittymästä voi myös tarkkailla anturien ja järjestelmän tilaa. Järjestelmän sammuessa sähköpattereiden termostaatit ohjaavat talon lämmitystä normaalisti.

Rakennuksissa testattiin ohjausmallin 1 mukaista ohjelmaa. Kuvassa 15 on esitettynä ohjausmallin 1 mukainen ohjelma toteutettuna Siemensin Logo!:lle. Koodi on kirjoitettu LOGO! soft Comfort V8.1 -ohjelmointiympäristössä FBD-ohjelmointikielellä.

6.4 Sisälämpötilaan ja suhteelliseen kosteuteen perustuva ohjaus LOGO!



Kuva 15. Ohjausmallin 1 mukainen Logo-ohjelma.

1. A1: (Analog in) Sisälämpötila
2. A2: (Analog in) Suhteellinen kosteus
3. F1: ON
4. F2: OFF
5. B003: (Analog amplifier) Skaalaa sisälämpötilaa mittaavan anturin analogisen millivoltti-viestin celsiusasteiksi
6. B010: (Analog amplifier) Skaalaa suhteellista kosteutta mittaavan anturin analogisen millivolttiviestin prosenteiksi
7. B014: (Reset/Set) Kuuntelee viestiä On ja OFF painikkeilta, Set asento pitää painona-pilta On tulevan signaalin päällä ja Reset sammuttaa Järjestelmän
8. B001: Laskee sisälämpötilan perusteella suurimman sallitun kosteuden arvon
9. B007: Tarkkailee sisälämpötilan alarajaa
10. B002: Tarkkailee sisälämpötilan ylärajaa
11. B004: Vertaa laskettua suurinta sallittua suhteellisen kosteuden arvoa mitattuun kosteu-den arvoon
12. B006: Lämmittää, jos kosteus on liian korkea suhteessa lämpötilaan ja estää lämmittä-misen, jos sisälämpötila nousee yli 17 asteen
13. B016: Lämmittää aina, jos lämpötila alle 5 C, tai boo6 toimilohkolta tulee lämmityskäsky tai jos järjestelmä on OFF asennossa.
14. Q1: Kontaktori 1 (vyöhyke 1)
    Q2: Kontaktori 2 (vyöhyke 2)
    Q3: Kontaktori 3 (vyöhyke 3)

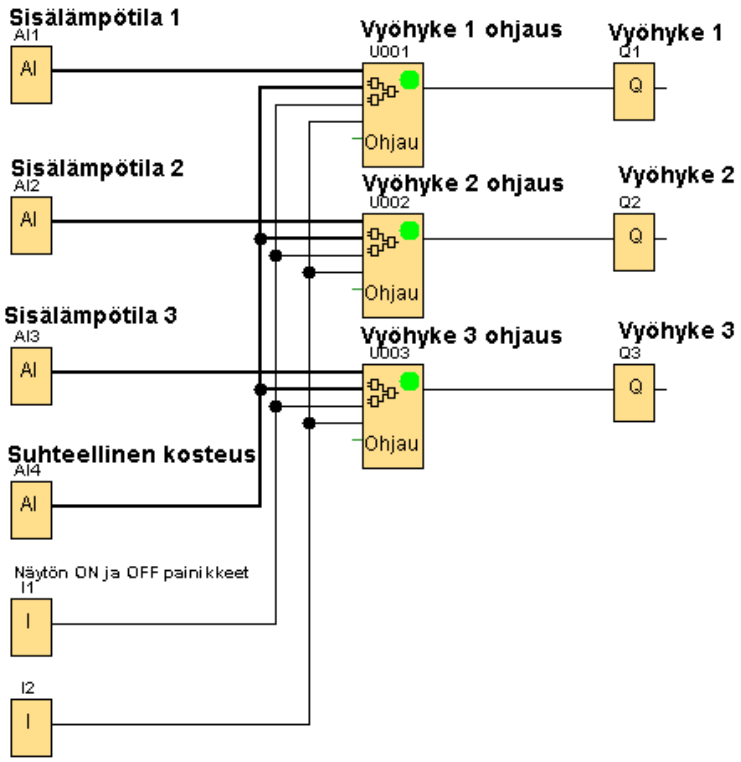
Logiikan analogiseen tuloon AI1 on kytketty sisälämpötila-anturi, ja tuloon AI2 on kytketty suhteellista kosteutta mittaava anturi. Logiikka saa viiden minuutin välein päivittyneet arvot antureilta ja ohjaa rakennuksen lämmitystä tarpeen mukaan.

Mitatut arvot skaalataan oikeaan lämpötilaan ja suhteellista kosteutta vastaaviin arvoihin käyttäen Analog Amplifier -toimilohkoa. Esimerkiksi Prudualin TELF-RH-P -sisälämpötila-anturi toimii alueella 0 – 50 ˚C ja FLTA-tukiasemalta saadaan 0 – 10 Vdc millivolttiviesti. Logo muuntaa 0 – 10 Vdc millivolttiviestin desimaaleiksi väille 0 – 1000. Todellinen lämpötilan arvo saadaan laskettua millivolttiviestistä kertomalla saatu arvo kertoimella 0.05.

Seuraavaksi ohjelma vertaa lämpötilaa asetettuun lämpötilan alarajaan. Lämmityskäsky ohjataan eteenpäin lämpötilan laskiessa alle neljän asteen. Rakennusta lämmitetään, kunnes sisälämpötila on noussut viiteen asteeseen. Alarajaa tarkkaillaan toimilohkolla B016 (Kuva 15)

Rinnakkain alarajaa vahtivan toimilohkon kanssa on ohjelma, joka vertaa sisälämpötilaa ja suhteellista kosteutta. Suhteellista kosteutta verrataan lämpötilasta laskettuun suhteellisen kosteuden raja-arvoon. Raja-arvo lasketaan toimilohkolla B001 (Mathematic instructor). Laskemiseen käytetään kaavan 1 mukaista yhtälöä. Raja-arvoa ja suhteellista kosteutta vertaillaan toimilohkolla B004 (Analog Comparator). Raja-arvon ylittyessä rakennusta lämmitetään niin pitkään kunnes kosteus laskee 2 prosentin alle asetetun raja-arvon, tai lämpötila ylittää 17 ˚C.

Jokaiseen ohjauskäskyyn, joka vaikuttaa suoraan lämmitysjärjestelmän tilaan on lisätty hystereesiä. Hystereesillä varmistetaan että ohjauskäskyt eivät aiheuta liian äkkinäisiä liikkeitä kontaktoreissa. Esimerkiksi kriittistä kosteutta seuraavan toimilohkon B004 ohjaus sammuu vasta, kun raja-arvon ja kosteuden ero muuttuu arvoon +2 ja B007 käynnistyy neljässä asteessa ja sammuu, kun rakennus on lämmennyt viiteen asteeseen.

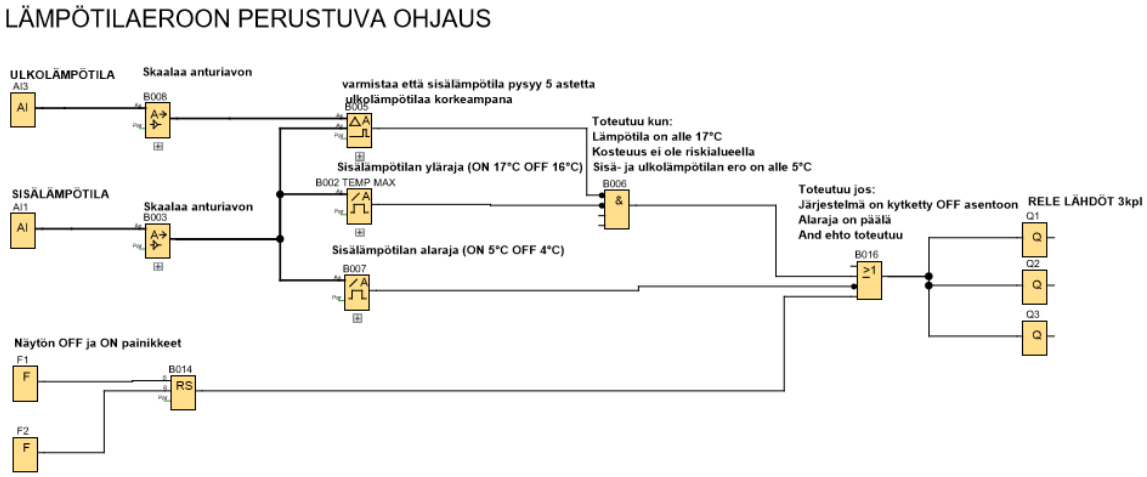


Kuva 16. Kolmen vyöhykkeen ohjaus LOGO! ohjelma

Rakennuksen kaksi ohjaus on jaettu lämmitysvyöhykkeisiin, ohjelma tarvitsee tiedon useammalta sisälämpötila-anturilta. Kolmevyöhykkeisen järjestelmän logo-ohjelman ohjaus on toiminnoiltaan melkein identtinen yhden vyöhykkeen ohjelman kanssa. Ainoana erona ohjelmassa on, että relelähtöjä Q1 – Q3 ohjataan eri anturitietojen perusteella. Jotta ohjelmaa olisi helpompi lukea ja käsitellä, on ohjausparametreista luotu oma aliohjelma (Kuva 16). Logo mahdollistaa aliohjelmien rakentamisen UDF-funktioina (User Defined Function) eli käyttäjän määrittäminä funktioina. Yhteen aliohjelmaan on sisällytetty kaikki samat toimilohkot kuin yhden vyöhykkeen ohjelmassa. Jokainen vyöhyke vaatii oman ohjausfunktion käyttämisen.

6.4 Lämpötilaeroon perustuva ohjelma LOGO!

Lämpötilaan perustuva ohjaus on toiminnaltaan yksinkertaisempi, ja se toimii varavaihtoehtona kosteuspohjaiselle ohjelmalle. Lämpötilaeroon perustuva ohjaus perustuu kolmeen pääehtoon. Kaiken ohittavana ehtona on lämpötilan alaraja. Lämmitys ohjataan päälle neljässä asteessa ja sammutetaan viidessä asteessa. Ylärajan ehto aktivoituu 16˚C ja sammuu 17 ˚C. 5 – 17 ˚C välillä ohjaus perustuu lämpötila eroon. Toimilohko B005 varmistaa, että sisälämpötila on 3 – 4 ˚C ulkolämpötilan yläpuolella. (kuvio 5). Tässä ohjausmallissa ei tarvitse tietää ilman suhteellista kosteutta. Lämpötilaerosta johtuen ilman suhteellinen kosteus pysyy alhaisena. Järjestelmän lämmityksen käyttäytyminen on esitetty sisä- ja ulkolämpötilan suhteena kuvaajassa kaksi. Lämmitys käynnistyy sinisen viivan kohdalla ja sammuu, kun saavuttaa oranssin rajan. Viivojen väliin jäävä alue toimii hystereesinä ja estää kontaktorien hallitsemattoman käyttäytymisen.



Kuva 17. Lämpötilaeroon perustuvan ohjauksen koodi LOGO!

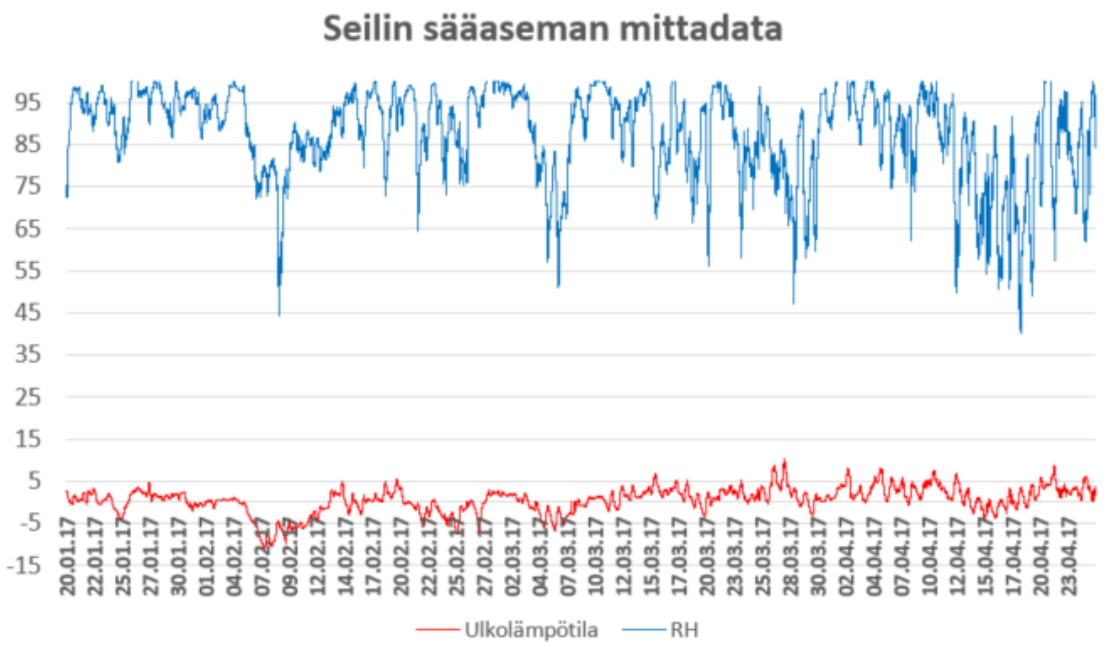
7 TESTIJAKSON MITTATULOKSET

7.1 Mittatulokset

Rakennuksista kerättiin kosteus-, sisä- ja ulkolämpötila -arvot ajanjaksolta 14.12.2016 – 30.5.2017. Rakennukset olivat käytössä 12.1.2017 – 20.1.2017, ja rakennukset otettiin kokoaikaiseen käyttöön 25.4.2017.

Rakennuksista saatu laadukas mittajakso jäi välille 20.1.2017 – 25.4.2017. Rakennuksen 1 logiikan toiminnassa alkoi esiintyä häiriöitä 23.3.2017 juohtuen samaan lähiverkkoon kolmannen osapuolen toimesta asennetuista IP-kameroista. IP-kamerat oli asennettu lähiverkkoon samoilla kiinteillä IP-osoitteilla logiikoiden kanssa. Rakennukseen 1 oli asennettu kaksi Siemens Logo!:a toimimaan rinnakkain. Toinen logiikka toimi I/O-laajennuksena ohjaavalle logiikalle. Tämä esti rakennukseen 1 asennettujen logiikoiden kommunikoinnin keskenään, eivätkä kaikki ohjaukseen käytetyt anturitiedot kulkeneet enää logiikalta toiselle. Myös hälytykset tippuivat pois käytöstä, joten ongelman havaitseminen viivästyi.

Seilin saaressa on paikallinen sääasema. Sääaseman mittadataa tarkastellaan välillä 14.12.2017 – 30.5.2017. Säädata tallennettiin 5 minuutin välein. Tiedot vietiin Exceliin ja keskiarvotettiin tuntiarvoiksi. Sää Seilin saaressa on ollut koko mitta-ajanjakson kylmää ja kosteaa. Lämpötila on ollut kylmillään noin -12 astetta ja korkeimmillaan + 10 astetta. Ilman suhteellinen kosteus matalimmillaan 49 prosenttia ja korkeimmillaan 100 prosenttia. Ilman suhteellisen kosteuden keskiarvo koko mittajakson ajalta on 87 prosenttia. Keskilämpötila on pysynyt noin - 0,5 asteessa. Sääolosuhteet ovat pysyneet suuren osan ajasta homehtumisen kannalta epäsuotuisalla alueella: vaikka ulkoilman suhteellinen kosteus on ollut korkea, on saaressa suurelta osin ollut liian kylmää homehtumiselle. Kuitenkin ulkolämpötilan ollessa 0 – 10 asteen välillä, on ulkoilman suhteellinen kosteus ylittänyt hetkellisesti homehtumisriskin rajan. Lämpötila on pysynyt suurimman osan ajasta lämmitysjärjestelmälle asetetun alarajan tuntumassa tai sen alapuolella. Ulkolämpötila on käynyt vain hetkittäin viiden asteen yläpuolella.



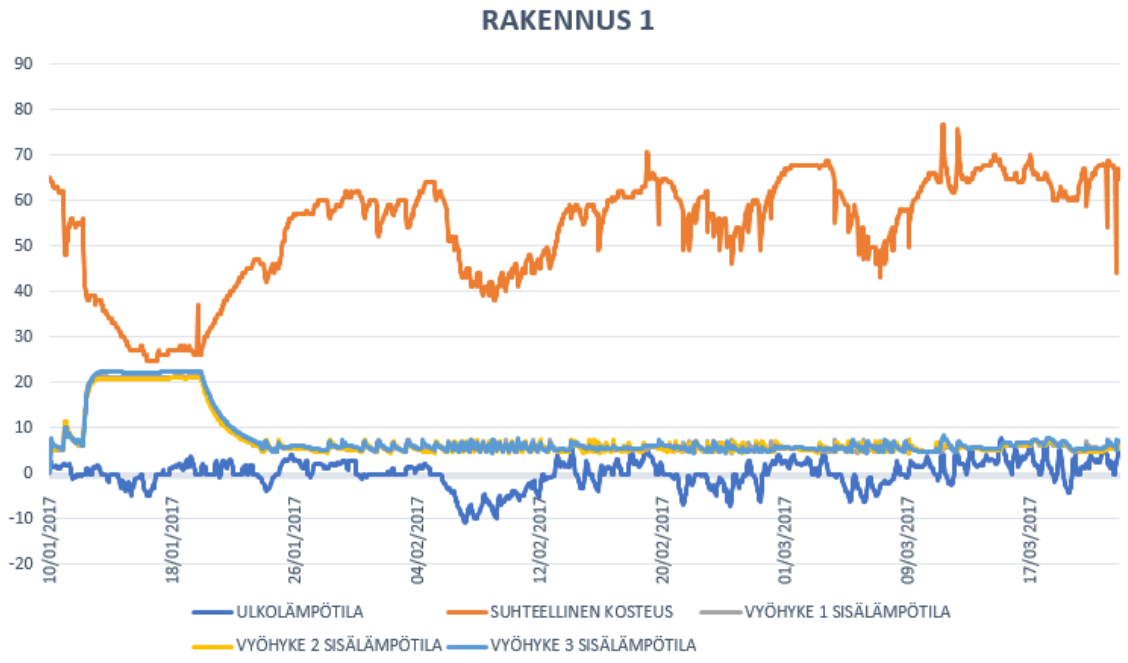
Kuvio 6. Seilin sääasemalta kerätyt lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot ajalta 14.12.2017 – 30.5.2017.

Rakennukseen yksi asennetun ulkolämpötila anturin keskilämpötila mitta-ajanjaksolta oli noin 2.6 °C. Keskilämpötila on noin kolme astetta korkeampi kuin sääasemalta mitattu keskilämpötila. Tämä saattoi johtua ulkolämpötila-anturin suojaisesta asennuspaikasta. Mahdolliset rakennuksen lämpövuodot ovat voineet myös vaikuttaa anturin lämpötilaan.

Mittaustiedot saatiin kerättyä moitteettomasti kaikilta paitsi yhdeltä mittapisteeltä. Rakennuksen 3 dataloggeri 7 oli vioittunut ja pudonnut pois käytöstä jo mittajakson alussa. Kaikki rakennuksista kerätty mittatieto vaikutti johdonmukaiselta ja loogiselta. Logiikoista tallennetusta mittatiedosta oli havaittavissa, että saaressa tapahtuu huomattava määrä sähkökatkoja. Sähkökatkot ovat havaittavissa samanaikaisena mittadatan puutteena molemmissa logiikoissa. Sähkökatkot ovat suurimmilta osin lyhyitä, eivätkä aiheuttaneet haittaa lämmityksen toiminnalle.

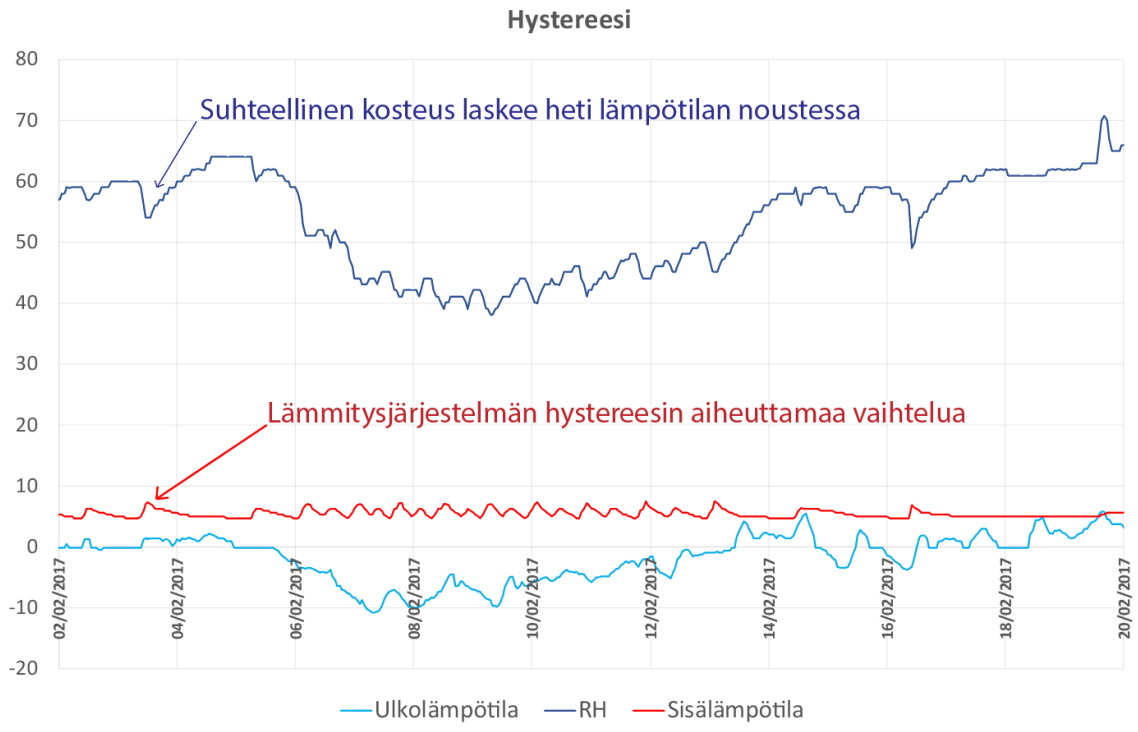
Huoneen keskeltä mitattuna rakennuksen 1 suhteellisen kosteuden keskiarvo on ollut 48 prosenttia. Rakennuksen kylmimmästä ja kosteimmassa mittapisteessä suhteellinen kosteus oli noin 59 prosenttia. Suhteellinen kosteus on pysynyt hyvin alhaisena koko mittajakson ajan. Kuviosta 7 näemme, että rakennuksen ollessa käyttölämpötilassa suhteellinen kosteus putoaa alle 30 prosentin. Optimaalinen suhteellinen kosteus olisi noin 60 prosentin luokkaa. Pieni suhteellinen kosteus lisää pölyyntymistä ja epäpuhtauksien määrää ilmassa. Matala suhteellinen kosteus johtuu rakennuksen pienestä kosteuskuormasta ja suuresta lämpötilaerosta suhteessa ulkolämpötilaan.

Korkeimmillaan suhteellinen kosteus on käynyt 76 prosentissa. Tämä on tapahtunut hyvin nopeasti ja vain kerran mittajakson aikana. Korkeimman suhteellisen kosteuden mittasi huoneen keskelle sijoitettu anturi. Tilanteessa lämpötila oli 4.6 ºC, joten suhteellisen kosteuden takia tässä lämpötilassa ei ole tarvetta lämmittää. suhteellinen kosteus on pysynyt suhteessa lämpötilaan turvallisella alueella koko mittajakson ajan. Kuivanapitolämmityksen ollessa käytössä lämpötila on pysynyt koko mitta-ajanjakson 4 – 7 ºC välillä.



Kuvio 7. Rakennus 1 Produalin antureista kerätyt mittatiedot.

Lämmitys on toiminut koko testiajanjakson lämmitysjärjestelmän alarajalla (kuvio 7). Kylmän sään ja lyhyen testiajanjakson takia, emme päässeet tutkimaan järjestelmän toimimista järjestelmälle optimaalisella alueella. Kuviossa 8 näkyy lämmitysjärjestelmän käyttäytymistä lämmityksen alarajalla. Lämmitysjärjestelmän käynnistyessä lämpötila nousee nopeasti 2 – 3 astetta, jonka jälkeen lämpötila laskee hitaasti takaisin 4 asteeseen, jossa lämmitys käynnistyy uudelleen. Lämpötilan hystereesi pitäisi toimia asteen sisällä, mutta lämmitykseen käytetty teho ja sähkölämmityksen jäähtymisestä johtuvan viiveen takia lämpötila nousee enemmän. Hystereesiä voi tarkentaa antureiden mittaviivettä pienentämällä ja ennakoimalla tämän ilmiön hystereesin suuruudessa. Kuvaajasta 6 on myös havaittavissa selvästi lämpötilan vaikutus suhteelliseen kosteuteen. Lämpötilan noustessa muutamalla asteella suhteellinen kosteus tippuu useita prosentteja.



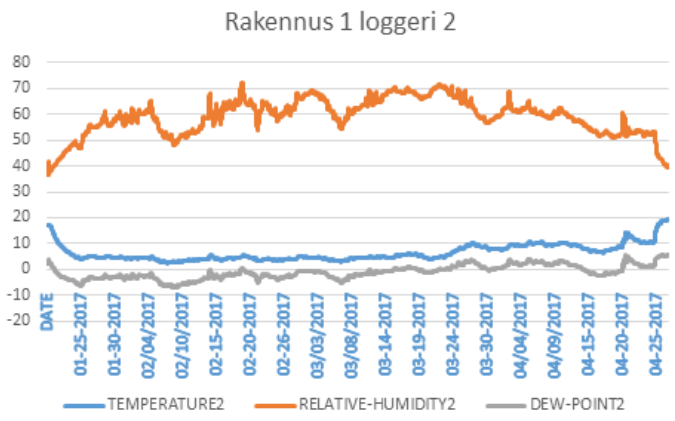
Kuvio 8. Lämmitysjärjestelmän hystereesin käyttäytyminen näkyy sisälämpötilan vaihteluna sahalaitaisesti.

Kuvioissa 9 – 11 on esitettynä rakennuksen kylmimmästä ja kosteimmasta mittapisteestä kerätty mittadata. Rakennuksen yksi ja kaksi välillä on selvä ero suhteellisen kosteuden käyttäytymisessä. Rakennuksissa yksi ja kolme suhteellinen kosteus käyttäytyy vastaavasti, mutta eri lämpötila-alueella. Rakennuksessa kaksi suhteellisen kosteuden vaihtelu on huomattavasti hitaampaa. On todennäköistä, että rakennuksen kaksi ilmanvaihto toimii hitaammin kuin rakennuksien 1 ja 3. Tästä johtuen sisäilman suhteellinen kosteus ei reagoi yhtä nopeasti ulkoilmassa tapahtuviin suhteellisen kosteuden muutoksiin. Näiden tuloksien perusteella vaikuttaisi siltä, että testikäytössä olleiden rakennuksien ilmanvaihdon olisi hyvä toimia normaalisti kuivanapitolämmityksen ollessa käytössä.

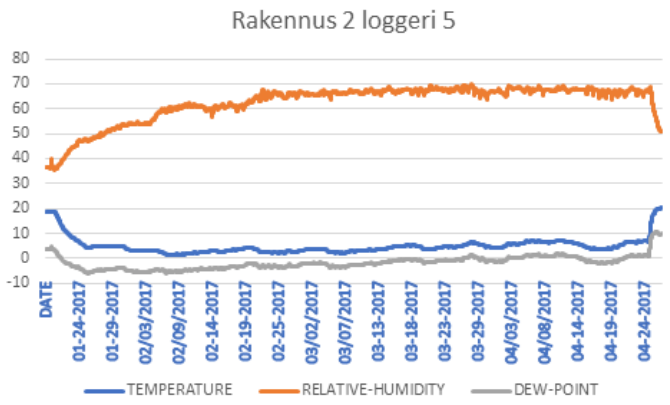
Valviran asumisterveysasetuksen soveltamisohjeessa määritetään, että Huoneilman suhteellinen kosteuden suosituksen rajana on aikaisemmin pidetty 20 — 60 prosenttia. Uusimmassa ohjeistuksessa todetaan, että näiden raja-arvojen saavuttaminen ei ole aina mahdollista. Rakennuksen muiden terveydellisten ominaisuuksien täyttyessä ei raja-arvojen ylityksistä aiheudu terveellistä haittaa. Soveltamisohjeessa mainitaan myös, että kovien pakkasjaksojen aikana 60 prosentin suhteellinen kosteus aiheuttaa mikrobikasvun riskin rakennuksen kylmissä kohdissa. (Valvira 2016, 11.)

Asumisterveysasetus määrittää vain seuraavasti: ”Huoneilman kosteus ei saa olla pitkäkestoisesti niin suuri, että siitä aiheutuu rakenteissa, laitteissa taikka niiden pinnoilla mikrobikasvun riskiä.” (Finlex 2015). Valvira on soveltamisohjeessa todennäköisesti määrittänyt tämän rajan tilanteessa, jossa rakennuksen sisäilman lämpötila on huomattavasti korkeampi kuin ulkoilman lämpötila. Kuivanapitolämmitystä käytettäessä lämpötilaa pidetään kuitenkin aina lähellä ulkolämpötilaa. Lukuun ottamatta tilannetta, jossa kuivanapitolämmityksellä estetään pakkaselle pääseminen ja kuivanapitolämmitys toimii sen alarajalla. Tässä tilanteessa käyttämättömän rakennuksen kosteuskuormat ovat yleensä matalia ja korkea lämpötilaero pitää suhteellisen kosteuden hyvin matalana. Ilmanvaihdon toimivuus vaikuttaa oleellisesti suhteellisen kosteuden käyttäytymiseen, kylmä ulkoilma sisältää yleensä vähemmän kosteutta kuin kuiva sisäilma. Ilman vaihtuessa vähemmän vesihöyryä sisältävä kylmä ulkoilma, kuivaa enemmän vesihöyryä sisältävää lämmintä sisäilmaa.

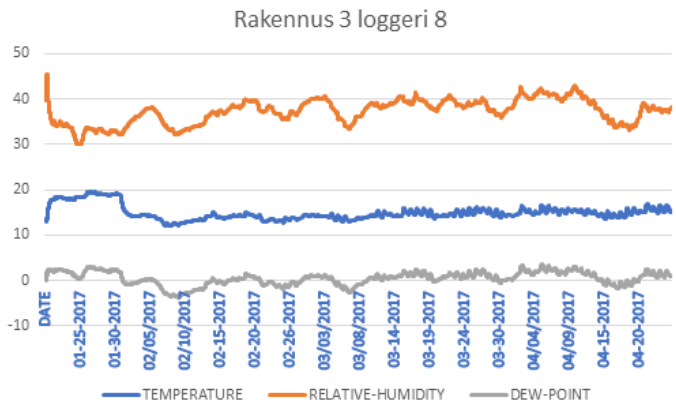
Jatkuvasta lämmittämisestä johtuen on rakennuksen 3 suhteellinen kosteus jatkuvasti alempana, kuin rakennuksen 1 ja 2. Rakennuksen 1 ja 2 kosteus kuitenkin pysyy koko mitta-ajanjakson turvallisella alueella ja lämmitykseen käytettävää energiaa säästyy huomattavasti.



Kuvio 9. Rakennus 1 dataloggeri 2. Dataloggeri 2 sijaitsi allaskaapissa. Rakennuksessa 1 oli käytössä ohjausmallin 1 mukainen kuivanapitolämmitysjärjestelmä. Rakennusta lämmitettiin yhtenä vyöhykkeenä.



Kuvio 11. Rakennus 2 dataloggeri 5. Dataloggeri 5 sijaitsi allaskaapissa. Rakennuksessa 2 oli käytössä ohjausmallin 1 mukainen kuivanapitolämmitysjärjestelmä. Lämmityksen ohjaus oli jaettu kolmeen lämmitysvyöhykkeeseen.



Kuvio 10. Rakennus 3 dataloggeri 8. Dataloggeri 8 sijaitsi allaskaapissa. Rakennus kolme pidettiin peruslämmöllä.

7.2 Käytetty energia ja säästöpotentiaali

Taulukko 5. Taulukossa on kaikkien testikäytössä olleiden rakennuksien energian kokonaisenergiankulutus ja prosentuaalinen energiansäästö suhteessa peruslämmöllä pidettyyn rakennukseen.

Rakennus	1	2	3	Yhteensä
Energian kulutus kWh	5827.2	4273	12515.6	22615.8
Energian hinta 0.09€/Kwh	524 €	385 €	1,126 €	2,035 €
Säästö	53%	66%		

Rakennusten energiankulutus kerättiin koko mittajakson ajalta. Rakennukset olivat käytössä 2 kertaa mittajakson aikana. Tämä tasaa kulutuseroa rakennukseen kolme nähden. Rakennus 2 kulutti kaikista vähiten energiaa. Rakennuksessa yksi esiintyi turhaa lämmittämistä viimeisen kuukauden aikana. Turha lämmittäminen johtui yllämainitusta yhteysongelmasta logiikoiden välillä. Tämä lisäsi rakennuksen 1 energiankulutusta. Myös rakennuksen kaksi ilmanvaihto vaikutti myös toimivan rakennusta 1 hitaammin. Rakenteellisten erojen lisäksi on mahdollista, että rakennus 1 hukkaa enemmän lämpöä ilmanvaihdon kautta kuin rakennus 2.

Edeltävistä syistä tuloksista on vaikea päätellä, kuluttiko rakennus 1:een asennettu vyöhykemalli enemmän vai vähemmän energiaa kuin rakennus 2:n malli, missä rakennusta lämmitettiin yhtenä vyöhykkeenä.

Järjestelmän toimiessa alarajalla rakennuksen lämmitys on myös noussut lämmittäessä usein 7 asteen paikkeille, joka on huomattavasti liian korkea haluttuun lämpötilaan nähden. Korjaamalla hystereesiä ja optimoimalla lämmitystä ovat todennäköisesti myös säästöt suurempia.

Kuivanapitolämmityksellä talviaikana saadaan huomattavia energian säästöjä peruslämpöön nähden. Kuivanapitolämmitysjärjestelmän tuomia säästöjä ja takaisinmaksuaikaa voidaan karkeasti arvioida laskemalla, että talvikaudella lämmitykseen käytetään noin 50 prosenttia vähemmän energiaa. Energian kulutuksen ollessa suurta ovat säästöt myös suurempia. Tällä karkealla arviolla voidaan määrittää mahdollisen sijoituksen kannattavuutta.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Testijakson aikana saaduista tuloksista voi päätellä, että kuivanapitolämmitysjärjestelmän tuomat energiansäästömahdollisuudet ovat huomattavia. Korkeaan peruslämpöön verrattuna testikohteessa saavutettiin noin 50 — 60 prosentin energiansäästöt. Energiansäästöt ovat niin suuria, että kuivanapitolämmitysjärjestelmä on todennäköisesti mahdollista tuotteistaa houkuttelevalla takaisinmaksuajalla. Takaisinmaksuaikaan vaikuttaa muun muassa rakennuksen koko ja rakennuksen lämmitykseen tarvittavan energian määrä. Kohteissa, joissa lämmityskustannukset ovat ennestään pieniä, kulutus ei kata yhtä nopeasti hankinnasta aiheutuneita kustannuksia.

Osa mittapisteistä sijaitsi paikoissa, joissa keskimääräinen huonelämpötila oli ajoittain huomattavasti alempi kuin samaan aikaan mitatut ohjaamiseen käytettyjen antureiden arvot. Mittapisteessä on tässä tilanteessa havaittavissa myös suurempi suhteellinen kosteus. Tämä ilmiö oli huomioitu lämmityksen ohjauksessa alentamalla sallitun suhteellisen kosteuden ylärajaa noin 10 prosenttia suomalaisessa homemallissa määritetyn HHL1-riskirajan alapuolelle. Mittajakson aikana ilmenneissä olosuhteissa 10 prosentin ero piti suhteellisen kosteuden kriittisissä paikoissa sallitulla alueella. Saatujen testitulosten perusteella kaikilla mittapisteillä suhteellinen kosteus pysyy suhteessa lämpötilaan halutulla alueella. On kuitenkin hyvä huomioida, että testijakso oli lyhyt ja sää testijakson aikana oli kylmä, joten järjestelmää ei päästy testaamaan kaikilla halutuilla lämpötila- ja kosteusalueilla. Tästä syystä aiheesta olisi hyvä tehdä pidempi jatkotutkimus.

Ohjausmalli vaikuttaisi toimivan suunnitellusti. Suurempia virheitä ohjauksen käyttäytymisessä ei havaittu. Lämpötilalle asetettua hystereesialuetta pitää hienosäätää. Hystereesiin pitää lisätä hieman ennakointia tai mittanopeutta, jotta rakennuksen lämpötila pysyy paremmin halutulla hystereesialueella, eikä rakennus pääse lämpiämään liikaa.

Tutkimuksessa saatu data oli onnistunutta. Dataa olisi kuitenkin voinut olla määrällisesti enemmän ja logiikan ohjaukseen käytettyjä arvoja olisi voinut tallentaa tiheämmin. Dataa olisi ollut hyvä kerätä useammasta mittapisteestä ja tiheämmällä syklillä. Myös tarkemmat energiankulutus tiedot helpottaisivat yksittäisten ajanjaksojen tarkkailua ja tarkemman analyysin tekemistä.

Kuivanapitolämmitysjärjestelmän ohjauksessa käytetyt ehdot on mahdollista tehdä niin yksinkertaisiksi, että järjestelmä on nopeasti toteutettavissa useilla ohjelmointikielillä ja

alustoilla. Tuotteistettaessa kuivanapitolämmitystä alusta ja ohjelmointikieli kannattaakin määritellä muiden haluttujen lisäominaisuuksien mukaan.

Opinnäytetyössä tarkasteltu mitta-ajanjakso on lyhyt ja yksipuolinen, siksi se ei välttämättä anna yleispätevää kuvaa kuivanapitolämmityksen toiminnasta. Kuivanapitolämmitysjärjestelmän käyttämisestä olisi hyvä saada vielä lisää tietoa. Järjestelmän turvallisten raja-arvojen optimointia, oikean ohjausmallin valintaa ja toimivan kuivanapitolämmitysjärjestelmäratkaisun kehittämistä olisi siksi vielä hyvä jatkaa.

9 POHDINTA

Testijakson aikana saadut mittatulokset ovat lupaavia ja tukevat kuivanapitolämmitysjärjestelmän kehittämistä. Tulosten perusteella kuivanapitolämmitysjärjestelmä vaikuttaa houkuttelevalta tuotteelta ja mahdolliset vaikutukset lämmityksestä aiheutuvan hiilijalanjäljen vähentämiseksi ovat suuria. Teoriassa jos kuivanapitolämmitys olisi mahdollista ottaa käyttöön kaikissa vapaa-ajan asunnoissa, olisi energiansäästöistä johtuva ympäristövaikutus merkittävä.

Vapaa-ajanasuntojen lämmitykseen käytetyn energian määrä vuonna 2016 oli noin 580 GWh. Koko Suomen sähkönkulutus vuonna 2016 oli 85,1 TWh. Jos vertaan Suomen sähkönkulutusta Vapaa-ajanasuntojen lämmittämiseen käytetyn sähkönkulutukseen, voidaan yrittää arvioida kuivanapitolämmityksen markkinan kokoa, mahdollisia ympäristövaikutuksia ja energiansäästöpotentiaalia. Testijakson aikana saadut säästöt olivat yli 50 prosenttia, nämä säästöt ovat huomattavan suuria. Kuivanapitolämmitysjärjestelmän tuomat säästöt ovat varmasti suuria, mutta vaihtelevat paljon rakennuskohtaisesti. Kuivanapitolämmityksen tuomiin säästöihin vaikuttavat myös energian hinta, sää, järjestelmänhinta, lämmitysmuoto, rakennuksen normaali energiankulutus, käytetty ohjasmalli, rakennuksen käyttöaste ja kohteen rakenteelliset ominaisuudet.

Järjestelmän hintaan vaikuttaa oleellisesti käytettyjen anturien määrä ja asennustyöhön vaadittu aika. Helposti asennettava järjestelmä mahdollistaa lyhyemmän takaisinmaksuajan. Tulevaisuudessa markkinaehtoisen laitteen hinnaksi voisi arvioida 300 – 600 euroa ja sähköasennuksiin laskutettavaa työtä on 1 – 3 tuntia. Karkeasti arvioiden järjestelmä maksaisi itsensä takaisin kohteesta riippuen 1 – 4 vuodessa.

Jotta kuivanapitolämmitysjärjestelmän tuomia energiansäästökustannuksia päästäisiin hyödyntämään suuressa mittakaavassa, olisi järjestelmä hyvä tuotteistaa ja tietoisuutta siitä lisätä. Nykytilanteessa käytämme turhaan satoja gigawattitunteja energiaa tyhjien rakennusten lämmittämiseen.

Järjestelmän kaupallistamiseksi pitäisi se saada kuluttajalle houkuttelevaksi tuotteeksi eli järjestelmän hinta pitää saada alhaiseksi, takaisinmaksuaika saada mahdollisimman lyhyeksi ja investoinnin tuottoprosentti korkeaksi. Myös järjestelmän käyttöönotosta pitää saada tarpeeksi helppoa eli tuotteen pitäisi olla helposti asennettavissa nykyisten läm-

mitysjärjestelmien yhteyteen. Tuotteen pieni koko mahdollistaisi sen helpon asentamisen sähkökaappiin, tai sähkökaapin yhteyteen. Langaton anturointi nopeuttaa asennustyötä ja pitää järjestelmän visuaalisen ilmeen siistinä. Järjestelmän parametrien optimointi ja antureiden konfigurointi pitää saada mahdollisimman helpoksi.

Houkuttelevuutta järjestelmään voisi lisätä tuomalla sen yhteyteen etäkäyttömahdollisuuksia, esimerkiksi mökin lämmityksen kytkemisen päälle kotoa käsin, tai jopa yhdistää järjestelmän kokonaisvaltaiseksi Smart home -ratkaisuksi.

9.1 Jatkotutkimus

Ohjausjärjestelmää on testattu lähinnä kohteissa, joissa on suora sähkölämmitys. Järjestelmän tuotteistamisen kannalta olisi myös hyvä selvittää parhaaksi todetun ohjausmallin hyödyntämistä muiden lämmitysratkaisujen yhteydessä. Koska ohjausmalli ei ole sidottu kyseiseen lämmitysmuotoon, sitä voi todennäköisesti soveltaa muihinkin lämmitysratkaisuihin, esimerkiksi lämpöpumpun yhteyteen.

Kuivanapitolämmityksen jatkotutkimuksessa voisi vertailla kosteuspohjaisen ja lämpötilaeroon perustuvan kuivanapitolämmitysjärjestelmän eroja. Molemmissa järjestelmissä ohjaus voitaisiin jakaa vyöhykkeisiin. Aikaisemmat tutkimukset osoittavat, että lämmityksen ohjaaminen tuo huomattavia energiansäästöjä. Tutkimuksessa olisi hyvä keskittyä tarkkailemaan kosteuden käyttäytymistä rakenteissa ja kaikista herkimmillä pinnoilla.

Jatkotutkimuksessa datan määrä on hyvä yrittää lisätä. Datan määrää voidaan maksimoida pidentämällä pilotointijaksoa, tai lisäämällä pilotoitavien kohteiden määrää. Rakennuskohtaisten anturien määrää olisi myös hyvä lisätä ja mittadatan resoluutiota tihentää. Dataa kerääviä antureita olisi hyvä sijoitella ainakin ikkunoiden kulmiin, talon ulkonurkkiin, ulkoseinää vasten oleviin kaappeihin ja mahdollisuuksien mukaan välipohjaan ja seinän höyrysulun ulko- ja sisäpinnalle. Näin saataisiin mahdollisimman kattava kuva kosteuden käyttäytymisestä koko rakennuksessa. Kaikkien anturien kosteus- ja lämpötila-arvoja voitaisiin kerätä kerran sekunnissa ja tallentaa minuuttikeskiarvo, myös logiikan lähtöjen käyttäytyminen olisi hyvä tallentaa kerran minuutissa. Näin saadaan tarkka kuva anturien toiminnasta ja logiikan lähtöjen käyttäytymisestä.

9.2 Muita mahdollisia tutkimuskohteita.

Olisi mielenkiintoista testata vakioteholämmityksen yhdistämistä peruslämpöön. Rakennuksen oman lämmitysjärjestelmän termostaatit voitaisiin asettaa siten, että suurin osa lämmittimistä käynnistyy sisälämpötilan laskiessa 5 asteeseen, kun taas vakioteholämmityksen vaatima määrä sähköpattereita asetetaan 17 asteen lämpötilaan. Näin voitaisiin estää rakennuksen meneminen pakkasen puolelle, mutta se toisi myös vakioteholämmityksen tuomat kuivattavat ominaisuudet. Vakioteholle asetettava lämmitin voi olla keskeisellä paikalla sijaitseva sähköpatteri, tai erillinen lisälämmitin. Tämä voisi olla ilmainen tai edullinen ratkaisu olemassa olevalla lämmitysjärjestelmällä.

Järjestelmän tuotteistamisen kannalta voisi järjestelmää testata pienillä pc-pohjaisilla laitteilla, näin testijärjestelmästä saataisiin myös edullisempi rakentaa. Nykyisin markkinoilla on paljon pieniä edullisia tietokoneita, jotka mahdollistavat releiden ja mittalaitteiden helpon kytkemisen. Anturiverkko voitaisiin myös rakentaa PC:n ympärille. PC-pohjaisilla laitteilla on myös mahdollista rakentaa helposti reaaliaikainen datan seuranta ja etävalvonta. Mielenkiintoista olisi myös tutkia mahdollisuutta lisätä kuivanapitolämmitysjärjestelmä suoraan jo olemassa olevaan Smart home -ratkaisuun.

LÄHTEET

Alan S. Morris 2001. Measurement and Instrumentation Principle. Butterworth-Heinemann. Viitattu 3.2.2018

Energiateollisuus 2017. Energiavuosi 2016 SÄHKÖ: sähkönkäyttö kääntyi nousuun. Viitattu 5.11.2017. Luettavissa: https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/energiavuosi_2016_sahko_sahkonkaytto_kaantyi_nousuun.html

Energiavirasto 2017. Kertomus sähkön toimitusvarmuudesta vuonna 2016-2017 sekä tehoaste-ennuste talvikaudelle 2017-2018. viitattu: 10.5.2018. Luettavissa: https://www.energiavirasto.fi/documents/10191/0/Kertomus+s%C3%A4hk%C3%B6n+toimitusvarmuudesta+2016_2.pdf/71da1f4e-7867-44d2-b173-dca583066724

Euroopan ympäristökeskus 2013. Ilma jota hengitämme. Viitattu 2.2.2018. Luettavissa: https://www.eea.europa.eu/fi/ymparisto-signaalit/signaalit-2013/artikkelit/ilma-jota-hengitamme

Finlex 2003. Asumisterveysohje. Viitattu: 20.9.2018. Luettavissa: https://www.finlex.fi/data/normit/14951/asumisterveysohje_pdf.pdf

Finlex 2015. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. viitattu: 20.9.2018. Luettavissa: https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2018/20150545

Hengitysliitto 2016. Opas ilmanvaihdosta. Viitattu 13.10.2017. Luettavissa: https://www.hengitysliitto.fi/sites/default/files/oppaat/ilmanvaihto-opas.pdf

ICAO. Carbon Emission Calculator. viitattu 10.8.2018 Luettavissa: https://www.icao.int/environmental-protection/CarbonOffset/Pages/default.aspx

Piiroinen 2010. Vakiotehoisen kuivanapitolämmityksen vaikutus hirsimökkien lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Viitattu 15.11.2017. Luettavissa: https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/23182/Piironen.pdf?s.

Piiroinen & Vinha 2010. Vakiotehoisen kuivanapitolammityksen vaikutus hirsimökkien lämpö ja kosteustekniseen toimintaan. viitattu: 10.5.2018. Luettavissa: https://tutc-

ris.tut.fi/portal/en/publications/vakiotehoisen-kuivanapitolammityksen-vaikutus-hirsimoekkien-lampoe-ja-kosteustekniseen-toimintaan(0d4bbc08-2e62-47bb-915b-de8976110157).html

Rafnet-ryhmä 2004. Rakennusfysiikkaa rakennusinsinööreille, kosteus. Viitattu 4.9.2017. Luettavissa: http://www.tekniikka.oamk.fi/~kimmoi/talrakjatko/kosteus_27092004.pdf

Rytkönen & Kirkkari 2010. Vapaa-ajan asumisen ekotehokkuus. Ympäristöministeriö. Viitattu 13.12.2017. Luettavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37982/SY6_2010_Vapaa-ajan_asumisen_ekotehokkuus,_sivut_1-63.pdf?sequence=1

Saaristoasiain neuvottelukunta Maa- ja metsätalousministeriö. Mökkibarometri 2016. Viitattu 21.2.2018.Luettavissa: http://mmm.fi/documents/1410837/1880296/Mokkibarometri+2016/7b69ab48-5859-4b55-8dc2-5514cdfa6000

Schneider. Products A9MEM3155. viitattu 10.4.2018 Luettavissa: https://www.schneider-electric.com/en/product/A9MEM3155/iem3155-energy-meter---63-a---modbus---1-digital-i---1-digital-o---multi-tariff/

Siemens. Logic module LOGO!. viitattu 10.4.2018 Luettavissa: https://c4b.gss.siemens.com/resources/images/articles/dffa-b10079-02-7600.pdf

Siikanen 2012. Rakennusten lämpö- ja kosteusfysikaalisia näkökohtia. Viitattu 13.10.2017. Luettavissa: https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK120401.pdf

Sisäilmayhdistys ry 2017. Ilmanvaihdon perusteet. Viitattu 13.10.2017. Luettavissa: http://www.sisailmayhdistys.fi/Perustietoa-sisailmasta/Ilmanvaihdon-perusteet

Suomen ympäristökeskus 2016. Rakennusten energiankulutuksen perusskenaario Suomessa 2015-2050. Viitattu 1.12.2017. Luettavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/166673/SYKEra_35_2016.pdf?sequence=4

Tampereen teknillinen yliopisto. Suomalainen homemalli. Viitattu 2.2.2018. Luettavissa: http://www.tut.fi/fi/tutkimus/tutkimusalat/rakennustekniikka/rakennetekniikka/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/index.htm

Tilastokeskus 2016. Asumisen energiankulutus 2016. Viitattu 21.2.20018. Luettavissa: https://www.stat.fi/til/asen/2016/asen_2016_2017-11-17_fi.pdf

The Engineering ToolBox. Mollier Diagram viitattu 1.4.2018. Luettavissa: https://blogit.jamk.fi/oppari/2013/05/23/monesta-lahteesta-muokattu-kuvio/

Tilastokeskus 2016. Kesämökit 2016. Viitattu 10.9.2017. Luettavissa: https://tilastokeskus.fi/til/rakke/2016/rakke_2016_2017-05-24_kat_001_fi.html

Valvira 2016. Asumisterveysasetuksen soveltamisohje. viitattu 20.9.2018. Luettavissa: https://www.valvira.fi/documents/14444/261239/Asumisterveysasetuksen+soveltamisohje/ac8d5e16-97be-456c-9c9c-ce8560f2092e

Ympäristöministeriö 2012. Rakennusten sisäilmasta ja ilmanvaihto. Viitattu: 12.12.2017. Luettavissa: www.finlex.fi/data/normit/37187-D2-2012_Suomi.pdf

Ympäristöministeriö 2015. Kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Viitattu: 2.5.2018. Luettavissa: http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/75517