

RAKENNETESTAUKSEN KEHITTÄMINEN ARCTIC
POWERILLA

Antti Sirkka

Opinnäytetyö
Rakennustekniikka
Insinööri (AMK)
2014

LAPIN AMMATTIKORKEAKOULU

TEKNIikka JA LIIKENNE

Rakennustekniikka

**RAKENNETESTAUKSEN KEHITTÄMINEN ARCTIC
POWERILLA**

2014

Toimeksiantaja Arctic Power
Antti Sirkka

Hyväksytty _____ 2014 _____

Työ on Theseus-verkkokirjastossa

Tekniikka ja liikenne
Rakennustekniikka

Tekijä	Antti Sirkka	Vuosi	2014
Toimeksiantaja	Arctic Power		
Työn nimi	Rakennetestauksen kehittäminen Arctic powerilla		
Sivu- ja liitemäärä	44 + 5		

Arctic Power on Lapin ammattikorkeakoulun tutkimus- ja kehitys yksikkö, joka sijaitsee napapiirillä. Arctic Powerilla on käytössään laboratoriotilat, joiden käyttöä kehitetään jatkuvasti. Laboratoriossa on kaksi olosuhdehuonetta, jotka on rakennettu kiinni toisiinsa. Tiloja erottaa seinäelementti. Laboratoriotilojen käyttöä halutaan laajentaa myös rakennustekniikan opetukseen ja tutkimukseen, erityisesti rakennusfysiikan näkökulmasta. Työssä tutkitaan tilojen hyödyntämismahdollisuuksia rakennetestauksessa sekä lämpö- ja kosteusteknisessä tutkimuksessa. Lähtökohtana seinäelementin tilalle asennetaan tutkittava rakennusosa ja rakenteen eri puolille luodaan sisä- ja ulkoilman olosuhteet.

Opinnäytetyön esiselvitysvaiheessa tutkittiin vastaavia tutkimusmenetelmiä Suomessa sekä perehdyttiin rakennusfysiikkaan testauksen näkökulmasta. Seuraavassa vaiheessa suunniteltiin testausympäristön rakentaminen Arctic Powerin laboratoriotiloihin ja tutkittiin eri vaihtoehtoja toteutukseen. Tutkimuksen lopuksi tehtiin pilottitestejä sekä rakennettiin ja kehitettiin testausympäristöä. Tutkimuksen aikana saatiin paljon tietoa sisä- ja ulkoilman olosuhteiden määrittämisestä ja pysyvyydestä laboratoriotiloissa. Jatkokehitykseen saatiin paljon käytännön ideoita ja toisaalta todettiin, että joitakin kehitysuuntia ei ole tarvetta viedä eteenpäin.

Avainsanat rakennusfysiikka, lämpö, kosteus, rakennetestaus

School of Technology
Degree Programme in Civil Engineering

Author	Antti Sirkka	Year	2014
Commissioned by	Arctic Power		
Subject of thesis	The development of structural testing in Arctic Power		
Number of pages	44 + 5		

Arctic Power is the Lapland University of Applied Science*s research and development unit, which is located in the Arctic Circle. Arctic Power has a laboratory which is constantly being developed. In the laboratory there are two condition rooms, which are attached to each other. The rooms are separated by a wall element. There is a wish to extend the use of the laboratory facilities to the civil engineering education and research, especially in building physics. The aim of this research was to investigate the possibilities to use these facilities in construction testing and in heat and humidity research. The starting point was that two condition rooms will be created for indoor and outdoor air conditions and they will be placed between the examined building block.

In the preliminary stage of this thesis study the same kind of methods used in Finland were studied and examined from the building physics testing point of view.

The next step was the design of a testing environment built for Arctic Power's laboratory and examining various options for the implementation. Finally, pilot tests were carried out and the testing environment was built and developed.

This thesis provides a lot of information about the internal and external atmospheric conditions and the determination of the stability of laboratory facilities. A lot of practical ideas for further development, were provided, and on the other hand, it was found out that there is no need to push forward some of the development directions.

Key words building physics, heat, humidity, construction testing

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	2
2 ARCTIC POWER	3
3 RAKENNUSFYSIKAALINEN TUTKIMUS.....	4
3.1 YLEISTÄ.....	4
3.2 LÄMPÖ.....	4
3.3 KOSTEUS	5
3.4 ILMANPAINEN JA ILMAVIRTAUKSET	6
3.5 KOSTEUS VAIPPARAKENTEISSA	8
3.6 VAIPPARAKENTEIDEN RAKENNUSFYSIKAALINEN SUUNNITTELU	8
4 NYKYTILANNE SUOMESSA	10
4.1 YLEISTÄ.....	10
4.2 VASTAAVIA RAKENNETESTAUSMENETELMIÄ	10
4.3 RAKENNUSFYSIKAALISET LASKENTAOHJELMAT.....	14
4.4 STANDARDIT	15
5 MITTAUSJÄRJESTELYT	17
5.1 KYLMÄHUONEIDEN KÄYTTÖ JA SÄÄTÖ.....	17
5.2 TESTIRAKENTEEN LIITTYMÄ JA TIIVEYS.....	18
5.3 SUOJAKAMMIO JA SUOJALEVYTYT	19
5.4 MITATTAVAT SUUREET JA OLOSUHTEIDEN SÄÄTÄMINEN	19
6 RAKENNETESTAUKSEN PILOTOINTI JA TOTEUTUS.....	21
6.1 PILOTOINTI.....	21
6.2 TOTEUTUS.....	22

7 TULOKSET	28
7.1 PILOINTIVAIHEET.....	28
7.2 MITTAUSTULOKSET.....	29
8 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	33
9 JATKOKEHITYS.....	35
LÄHTEET	37
LIITTEET	38

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuvio 1 Luonnollinen konvektio. (Tiivistalo, 2013)	7
Kuvio 2 Poikkileikkaus TTY:n tutkimuslaitteistosta (TTY, 2013).....	13
Kuvio 3 Periaatekuva säärasisäiläiteistosta (TTY, 2013)	14
Kuvio 4 Seinäelementin runko	25
Kuvio 5 Seinäelementin kiinnitys	26
Kuvio 6 Testaus käynnissä	27
Kuvio 7 Lämpötila ja suhteellinen kosteus "ulkoilmassa"	29
Kuvio 8 Lämpötila ja suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn ulkopinnassa.	29
Kuvio 9 Lämpötila ja suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn alla runkotolppaan upotettuna	30
Kuvio 10 Lämpötila ja suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn sisäpinnassa villan kohdalla.	30
Kuvio 11 Lämpötila ja suhteellinen kosteus höyrynsulkumuovin sisäpinnassa	31
Kuvio 12 Lämpötila ja suhteellinen kosteus "sisäilmassa".....	32

1 JOHDANTO

Rakennetestauksen kehittämisessä tavoitteena on kehittää uusi palvelumalli Lapin ammattikorkeakoulun TKI-yksikkö Arctic Powerille. Rakennetestauksen kehittämisen pohjana on Arctic Powerin laboratoriotiloissa yhteen liitetyt olosuhdehuoneet ja niiden hyödyntäminen mahdollisimman monipuolisesti. Kahden tilan välinen avattava seinä-elementti olisi tarkoitus korvata testirakenteella ja rakentaa testausympäristö. Lähtökohtana on suunnitella testausympäristö vaipparakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä tutkimusta varten. Mikäli olosuhteet eivät sovellu tämäntyyppiseen tutkimukseen, tarkastellaan muita käyttömahdollisuuksia.

Työn alussa perehdytään rakennusfysiikan perusteisiin ja etsitään muita vastaavanlaisen palvelun tarjoajia. Käytännön tasolla tehdään laboratoriokokeita, joilla selvitetään testausympäristön soveltuvuutta ja säädeltävyyttä halutunlaiseen tutkimukseen. Rakennetestauksen pilotoinnissa saadaan käytännön tietoa ja oppia mahdollisista ongelmakohtista ja laitteiden toiminnasta. Pilotointi suoritetaan olemassa olevalla seinäelementillä sekä rakennetaan varsinainen testielementti rakennusmääräysten mukaisesti. Työn edetessä piirretään CAD-kuvat testausympäristöstä, liittymädetaljeista, testirakenteesta ja antureiden sijoittamisesta rakenteeseen.

2 ARCTIC POWER

Arctic Power on Lapin ammattikorkeakoulun alaisuudessa toimiva yksikkö. Arctic Power tuottaa tutkimus-, kehitys- sekä testauspalveluita yritysten ja yhteisöjen käyttöön. Erityisosaamisena ovat kylmään ja talveen liittyvät haasteet. Tarjolla on valmiiden palvelukonseptien lisäksi asiakkaan tarpeeseen mukautuvaa yksilöllistä palvelua. Monipuolinen tutkimusympäristö kattavalla laitteistolla ja asiantuntijuudella luo asiakkaalle mahdollisuuden keskittyä ydinosaamiseensa. Tutkimusympäristön ytimenä toimivat säädeltävät olosuhdehuoneet, joihin saadaan halutut olosuhteet mihin aikaan vuodesta tahansa. Arctic Powerin laboratoriotilat sijaitsevat Rovaniemen lentoasemalle johtavan tien varressa. Arctic Powerin toimistot sijaitsevat tällä hetkellä Lapin ammattikorkeakoulun Viirinkankaan kampuksella. (ArcticPower, 2013.)

Rakennetestauksen kehittäminen projekti on osa hanketta; Kylmän ja talven osaamiskeskittymän kehittäminen (2011– 2013). Hankkeen tavoite on keskittää ja vahvistaa kylmä- ja talviteknologiapohjaista toimintaa. Hankkeessa Lapin AMK pyrkii osaamiskeskittymällä saavuttamaan keskitetyn osaamisen mukanaan tuomia hyötyjä. Monialaisen yhteistyön olennaisia osa-alueita ovat Lapin AMKin laboratorioden: Arctic Power laboratorion ja pLABin palveluiden edelleen kehittäminen ja tuotteistaminen sekä osaamis-intensiivisten palveluiden ja matkailun innovatiivisten ratkaisujen kehittäminen osana keskittymän toimintaa. Kansainvälistyminen ja alueellinen yhteistyö kuuluvat erottamattomasti toimivaan osaamiskeskittymään. (ArcticPower, 2013.)

3 RAKENNUSFYSIKAALINEN TUTKIMUS

3.1 Yleistä

Rakennusfysikaalisia tutkimuksia voidaan suorittaa yksittäisissä kohteissa ja olosuhteissa anturoimalla rakenne jo rakennusvaiheessa. Tutkimuksia voidaan tehdä myös jo valmiissa rakenteissa, kuten rakennusten tiiveysmittauksissa ja lämpökamerakuvauksissa tehdään. Mikäli halutaan tarkastella erilaisten rakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa samoissa lämpötila-, kosteus- ja paine-olosuhteissa, on tutkimukset suoritettava laboratoriossa. Vastaavasti rakenteita voidaan tutkia myös muuttuvissa olosuhteissa. Laboratoriossa tehtävien rakennusfysikaalisten tutkimusten tehtävänä on antaa tietoa rakenteiden toimivuudesta erilaisissa olosuhteissa, auttaa materiaalinvalmistajia tuotekehityksessä ja määrittää materiaalien ominaisuuksia.

3.2 Lämpö

Lämpö voi siirtyä kolmella eri tavalla rakenteiden tai tilojen välillä: johtumalla, säteilemällä tai virtaamalla eli konvektiolla. Johtuminen eli konduktio on molekyylien liike-energian siirtymistä molekyylistä toiseen. Lämpö pyrkii tasoittumaan väliaineessa ja virtaa lämpimästä kylmempään päin. Lämmön siirtyminen johtumalla tapahtuu kiinteissä ja nestemäisissä ainekerroksissa. ta-soittumisen nopeus eli lämpövirta voidaan esittää seuraavasti:

$$q = \lambda * \frac{t_1 - t_2}{d}$$

q on Lämpövirta (W/m²)

λ on lämmönjohtavuus (W /m*°C)

t₁ –t₂ on kappaleen yli vallitseva lämpötilaero (°C)

d on kappaleen / materiaalin paksuus (m). (Björkholtz, 1997.)

Säteilyssä eli emissiossa energia siirtyy sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä valon nopeudella. Kaikki kappaleet lähettävät säteilyä ja eniten lähettävät eli emittoivat mustat kappaleet. Auringonsäteily on lyhytaaltoista ja kappaleiden säteilemä lämpö pitkäaalloista. Rakennustekniikassa aallonpituudella on merkitystä muun muassa tarkasteltaessa ikkunoiden lämmönlä-

päisyä. Ikkunalasi läpäisee hyvin lyhytaaltoisen auringonsäteilyn, mutta huonosti sisältä ulos pyrkivää pitkäaaltoista säteilyä. (Siikanen, 1996.)

Konvektiossa lämpö siirtyy kaasun tai nesteen virtauksen mukana. Pakotetussa konvektiossa väliaine liikkuu jonkin ulkopuolisen voiman kuten ilmanvaihdon vaikutuksesta. Harvoin esiintyvässä luonnollisessa konvektiossa virtauksen synnyttää lämpötilaerojen aiheuttama tiheysero. Rakennusteknisestä näkökulmasta konvektio on huokoisten ja hyvin ilmaa läpäisevien ainekerrosten sekä rakennusosissa olevien rakojen lävitse tapahtuvaa ilman virtausta (Björkholtz, 1997.)

Lämmönjohtavuus λ on rakennustekniikassa tärkeä suure, sillä mitataan eri rakennusmateriaalien eristävyttä. Mitä pienempi lämmönjohtavuus eli λ -arvo sitä parempi eristävyys materiaalilla on. Lämmönjohtavuus ilmoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön pituisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen lämpötilaero on yksikön suuruinen. Lämmönjohtavuuden yksikkö on W/(mK). (Siikanen, 1996.)

Rakentamisessa käytettävä rakenteen lämmönläpäisykerroin eli U-arvo lasketaan kaavalla $U = 1 / R_t$, jossa R_t on rakenteen kokonaislämmönvastus ympäristöstä ympäristöön. R_t on ainekerrosten ja pintavastusten yhteenlaskettu kokonaislämmönvastus. Yksittäisen ainekerroksen lämmönvastus saadaan kun jaetaan ainekerroksen paksuus materiaalin lämmönjohtavuusarvolla, $R = (d / \lambda)$. (RakMK, 2010.)

3.3 Kosteus

Kaikki huokoiset materiaalit, rakenteet ja ilma sisältävät kosteutta. Kosteuden määrä riippuu materiaalin ominaisuuksista, ympäröivän ilman lämpötilasta ja kosteudesta. Kosteus rakenteessa voi muuttua rakentamisen ja käytön aikana ja näitä kosteuden muutoksia rakennusfysiikassa pyritään tutkimaan. Aineessa oleva kosteusmäärä ilmoitetaan yleensä kostean massan ja kuivan aineen massan välisenä suhteena prosentteina kuivapainosta. Aineen kosteus voidaan ilmaista myös kosteuden massan ja tilavuuden välisenä suhteena ($\text{kg/m}^3 = \text{tilavuus-\%}$). Kosteus liikkuu aineessa ulkoisten voimien vaikutuk-

sesta. Kosteuden kulkeutumista aineeseen kutsutaan absorptioksi, sen liik-
kumista aineessa sorptioksi ja poistumista desorptioksi. (Siikanen, 1996.)

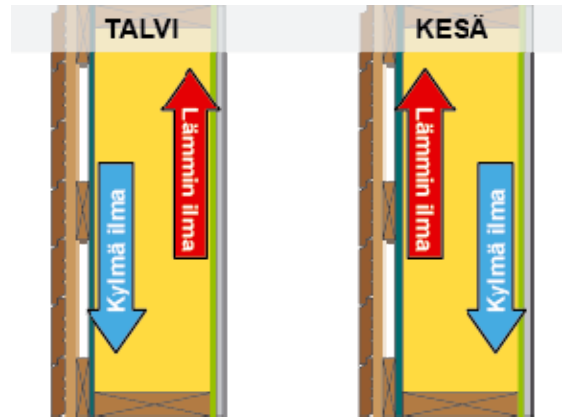
Hygroskooppinen kosteus on kosteutta, jonka huokoinen aine pystyy sito-
maan ja luovuttamaan ympäröivästä ilmasta. Aineen kosteus asettuu tasa-
painoon ympäristönsä kanssa, jolloin sillä on hygroskooppinen tasapainokos-
teus. Hygroskooppisuus vaihtelee eri materiaaleilla, esimerkiksi puupohjaisil-
la aineilla se on suuri ja mineraalivillalla pieni. Aineen kykyä sitoa ja luovuttaa
kosteutta kutsutaan aineen kosteuskapasiteetiksi. Ennen höyrynsulkumuovin
käyttöä eristeen hygroskooppisuudella oli enemmän merkitystä, koska puu-
pohjainen eriste pystyi tasaamaan kosteuden liikkeitä ja sitomaan kosteutta
rakenteissa. (Siikanen, 1996.)

Ilman kosteusmäärää voidaan ilmaista kolmella tavalla. Absoluuttinen koste-
us ilmoittaa ilman tietyssä tilanteessa sisältämän vesimäärän (kg/m^3 tai
 kg/kg). Vesihöyryn osapaine ilmaisee paineen, jonka ilman sisältämä vesi-
höyry aiheuttaa (Pa). Absoluuttisen kosteuden ja lämpötilan lisäys kasvatta-
vat vesihöyryn osapainetta. Suhteellinen kosteus RH ilmottaa absoluuttisen
kosteuden ja kyllästyskosteuden välisen suhteen prosentteina (%). Kyllästys-
kosteus ilmoittaa sen vesihöyryn määrän, jonka tietyn lämpöinen ilma voi
enimmillään sisältää (kg/m^3). Kastepiste kertoo lämpötilan, jossa ilmassa
oleva vesihöyry muuttuu vedeksi eli kondensoituu. Kastepisteessä ilman kos-
teus saavuttaa kyllästyskosteuden. (Siikanen, 1996.)

3.4 Ilmanpaine ja ilmavirtaukset

Rakenteiden kosteus- ja lämpötekniseen toimintaan vaikuttaa myös raken-
nuksessa esiintyvät ilmanpaineet ja niiden vaihtelut. Savupiippuvaikutus, LVI-
laitteet ja tuuli synnyttävät paine-eroa rakennuksen sisä- ja ulkopuolen välillä
ja tästä johtuvaa ilman virtausta rakenteiden läpi kutsutaan pakotetuksi kon-
vektioksi. Pakotetun konvektion esiintymien vaatii sellaista epätiiveyttä raken-
teissa, että ilmavirtaus rakenteen läpi on mahdollista. Luonnollinen konvektio
(Kuvio 1) syntyy esimerkiksi ulkoseinien huokoisessa lämmöneristeessä tai
ikkunan ilmaraossa. Pystyrakenteessa oleva ilma lämpenee sisäpinnan lä-
heisyydessä, jolloin tiheys pienenee ja se pyrkii virtaamaan ylöspäin. Lisäksi

kylmemmän ulkopinnan puolella ilma jäähtyy ja virtaa alaspäin. (Siikanen, 1996.)



Kuvio 1. Luonnollinen konvektio. (Tiivistalo, 2013.)

Rakennustekniikassa diffuusiolla tarkoitetaan kosteuden liikkumista vesihöyrynä rakenteen läpi. Yleisimmin diffuusion suunta on lämpimästä tilasta kylmempään päin, sillä kosteus pyrkii diffuntoitumaan tilaan, jossa vesihöyryn osapaine on pienempi. Liiallinen vesihöyryn tunkeutuminen rakenteisiin estetään riittävän vesihöyryntiiviillä kerroksella lämmöneristeen ja sisätilan välissä. (Siikanen, 1996.)

Rakennuksissa vallitsevilla ilmanpainesuhteilla on rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan kannalta merkitystä pääasiassa talvella, jolloin ilman olosuhteet sisällä ja ulkona eroavat eniten toisistaan. Pienestä reiästä höyrynsulkumuovissa voi konvektion toimesta virrata suuria ilmamääriä ja mikäli sisällä vallitsee ylipaine eli virtaus-suunta on sisältä ulos, voi rakenteen sisällä oleville kylmille pinnoille kondensoitua vettä. Diffuusioon reikä ei juuri vaikuta, sillä suuruus on prosentuaalinen suhde pinta-alaan. Vastaavasti alipaineessa ilma virtaa ulkoa sisälle ja kuivattaa rakenteita. Tästä syystä nykyään kaikki rakennukset suunnitellaan alipaineisiksi. (Siikanen, 1996.)

3.5 Kosteus vaipparakenteissa

Rakenteiden kosteus voi esiintyä näkyvänä vetenä, näkymättömänä vesihöyryinä tai materiaalien rakennekosteutena. Rakennuksen ulkopuolelta tulevia kosteusrasituksia ovat sade, pohjavesi ja kapillaarinen vedenliike. Vesivuodot voivat olla joko sisäisiä eli putkistovuotoja tai ulkoisia vuotoja, jotka syntyvät vaipan tai kattorakenteen huolimattomasta suunnittelusta tai toteutuksesta. (Björkholtz, 1997.)

Vesihöyrynkosteuden siirtyminen rakenteisiin syntyy huone- tai ulkoilman sisältämän kosteuden kulkeutuessa rakenteisiin joko vesihöyryn osapaineeron synnyttämän diffuusion muodossa tai rakenteen eri puolilla vallitsevien ilmapaine-erojen aiheuttaman ilmavirtauksen eli konvektion kuljettamana. Rakennekosteudella tarkoitetaan sitä vesimäärää, joka rakenteesta poistuu, ennen kuin rakenne on kosteustasapainossa ympäristön kanssa. Rakennekosteus perustuu eri materiaalien kykyyn sitoa ja luovuttaa kosteutta. Suuri rakennekosteus voi syntyä edellä mainituilla tavoilla tai esimerkiksi rakennusaikana huonosta suojaamisesta. (Siikanen, 1996.)

3.6 Vaipparakenteiden rakennusfysikaalinen suunnittelu

Rakennusfysiikan merkitys suunnittelussa on jatkuvasti kasvanut, koska suuri osa rakenteiden vauriosta liittyy kosteus- ja lämpötekniiseen toimintaan. Lisäksi myös kiristyvät lait ja määräykset ohjaavat suunnittelua. Rakennusfysikaalinen suunnittelu voidaan tehdä enimmäkseen ilman laskentatarkasteluja, silloin kun rakenteet ja liitokset suunnitellaan lämmön, kosteuden ja ilman osalta seuraavien periaatteiden mukaisesti. (Rakennustieto, 2011.)

Lämpö

- pienentää rakennuksen lämpöenergian kulutusta
- ehkäisee rakenteiden ja materiaalien turmeltumista
- parantaa sisätilojen lämpöviihtyisyyttä.

Kosteus

- estää ja rajoittaa ylimääräisen kosteuden tunkeutumista rakenteisiin

- varmistaa rakenteen riittävä kuivumiskyky
- ehkäistä rakenteiden ja materiaalien turmeltumista
- parantaa sisätilojen kosteusviihtyvyyttä.

Ilma

- parantaa rakennusvaipan ilmanpitävyyttä
- ehkäisee ilmavirtausten aiheuttamia haittavaikutuksia rakennuksen sisällä ja vaipparakenteissa
- parantaa sisäilman laatua.

Rakennusfysiikkaan luetaan näiden lisäksi akustiikka ja valaistus ja rakennusfysikaalisessa suunnittelussa huomioidaan myös työtekniset ja taloudelliset seikat sekä ympäristövaikutukset. Tulevaisuudessa entistä enemmän tarkastelua vaativat kasvavat lämmöneristyspaksuudet, sisä- ja ulkopuolen lämpötila- ja kosteusolosuhteet ja niiden vaihtelut sekä uudet materiaalit. Lisäksi myös korjausrakentaminen on iso haaste tulevaisuudessa, koska ratkaisut ovat aina jossain määrin kompromisseja. Hyvien suunnitteluratkaisujen ehdoton edellytys on, että suunnittelija tuntee käytettävien materiaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet ja käyttäytymisen riittävän hyvin. Materiaaliominaisuuksien tunteminen on tärkeimmässä osassa, mikäli rakenteita tarkastellaan laskennallisesti. Tulevaisuudessa laskentatarkastelujen tekeminen yleistyy ja vaatii tekijöiltä paljon kokemusta, ammattitaitoa ja laskentaohjelmistoja. (Rakennustieto, 2011.)

4 NYKYTILANNE SUOMESSA

4.1 Yleistä

Lämpö- ja kosteusteknisessä tutkimuksessa tutkittavan rakenteen eripuolille säädetään halutut sisä- ja ulkoilman lämpötila, kosteus ja paine olosuhteet. Tällä tavalla saadaan selville rakenteen läpi kulkeva kosteus-, lämpö- ja ilmavirta sekä lämpö- ja kosteusolosuhteet rakenteen eri kohdissa. Tutkimuksia voidaan tehdä vakio-olosuhteissa tai muunnella olosuhteita rakenteen kummallakin puolella. Näin voidaan mallintaa esimerkiksi ilmanvaihtokoneen, vuorokauden tai vuodenajan vaihteluita. (TTY, 2013.)

Säärasituslaitteistolla voidaan tutkia ilmaston aiheuttamaa rasitusta rakenteille. Tutkimukset voivat olla pitkäkestoisia tai lyhyitä kiihdytettyjä rasisuskokeita. Tutkittava rakenne voi olla mitä tahansa materiaalia. Voidaan tehdä jäähdytys ja sulatuskokeita sekä tutkia rakenteen kosteusteknistä käyttäytymistä. Tutkittavaa rakennetta voidaan rasittaa yhdellä tai useammalla rasisustekijällä. Rasisustekijöinä voivat olla esimerkiksi sadetus ja auringon säteily. (TTY, 2013.)

4.2 Vastaavia rakennetestausten menetelmiä

Tällä hetkellä laboratoriossa suoritettavaa rakennetestausta Suomessa tarjoavat Savonia ammattikorkeakoulu Kuopiossa ja Tampereen teknillinen yliopisto. Savoniassa toiminta TKI:n alaista asiantuntijapalvelua. Tampereen teknillinen yliopisto tarjoaa tutkimuspalveluja rakennustekniikan laitoksen puolelta. Lisäksi rakennusfysikaalisia tutkimuksia ja testauksia suorittaa Teknologian tutkimuskeskus VTT.

Savonia ammattikorkeakoulu tarjoaa asiantuntijapalveluna seinärakenteen rakennusfysikaalista tutkimusta ja olosuhdetestausta. Rakennusfysikaalisessa tutkimuksessa selvitetään vaipparakenteiden kosteusteknistä käyttäytymistä. Tutkimuksissa saadaan monipuolista tietoa seinärakenteen lämpö- ja kosteusolosuhteiden vaihteluista erilaisissa ulko- ja sisäilman olosuhteissa sekä voidaan tutkia olosuhteiden muutoksista aiheutuvaa riskialttiutta homeh- tumiselle tai kosteuden kondensoitumiselle.

Tutkimus tehdään kaksiosaisessa testauskammiossa, jonka pääosat ovat kylmä- ja lämminkammio, joiden väliin sijoitetaan testattava koekappale. Voidaan testata vakio-olosuhteissa tai mallintaa eri vuodenaikojen mukaista vaihtelua koekappaleelle. Tällä hetkellä tutkimuslaitteisto on opetuskäytössä ja vaatii panostusta paremman tarkkuuden ja muunneltavuuden saavuttamiseksi.

Olosuhteet säädettävissä

- tutkimusaukon mitat: 1000x1000mm
- testin kesto 1-2kk
- kylmäpuoli -25 ... +30 °C
- lämminpuoli +15 ... +55 °C
- paineet +/- 100 Pa
- suhteellinen kosteus 20 % ... 100 %.

Olosuhdetestaus selvittää tuotteen, pintakäsittelyn ja materiaalin luotettavuutta ja soveltuvuutta erilaisissa olosuhteissa, säätestauslaitteilla ja kenttäkokeilla. Muuttuvia parametreja ovat lämpötila, kosteus, UV-säteily ja sadetus.

Laitteiston ominaisuudet

- kuuma-, kylmä-, kosteus-, korroosio- ja UV-rasituskokeet
- lämpötila-alue -40 °C - +180 °C
- kosteusalue 10% - 100%
- testaustilan mitat (l*s*k) 800 x 800 x 950 mm. (Savonia, 2013.)

Tampereen Teknillisessä Yliopistossa on laitteistot rakennusfysikaaliseen tutkimukseen, lämmönjohtavuuden tutkimiseen ja säärasituksen vaikutusten tutkimiseen. TTY:llä rakennettiin ensimmäiseksi lämmönläpäisylaitteisto standardin ISO 8990 pohjalta. Laitteistoa käytetään seinä-, yläpohja- ja alapohjarakenteiden sekä ikkuna- ja ovirakenteiden U-arvon määrittäisiin. Kammioiden välille säädetään lämpötilaero, joka on standardikokeessa 20 °C. Kammioiden välille syntyy tällöin lämpövirta, jonka suuruus on verrannollinen tutkittavan rakenteen U-arvoon. U-arvo määritetään lämpimän kammion lämmittämiseen tarvittavan energian perusteella. Laitteisto kalibroidaan elementeillä, joiden U-arvo tunnetaan. (TTY, 2013.)

Laitteiston ominaisuudet

- tutkimusaukon mitat: 1200x1200mm
- koerakenteen paksuus 50-300mm
- ulkolämpötila -20 ... +20 °C
- sisälämpötila +10 ... +30 °C
- kokeen kesto noin 2 vrk
- mittaustarkkuus $\pm 5\%$.

Lämmönläpäisylaitteiston pohjalta kehitettiin rakennusfysikaaliseen tutkimukseen soveltuva laitteisto (Kuvio 2). Laitteistoa käytetään vaipparakenteiden kosteusteknisen toiminnan tutkimukseen. Koerakenne voidaan jakaa osiin, jolloin voidaan tutkia saman rakenteen eri variaatioita. Kokeessa voidaan säädellä lämpötila, kosteus ja paine olosuhteita rakenteen molemmilla puolilla. (TTY, 2013.)

Laitteiston ominaisuudet:

- tutkimusaukon mitat: 1200x1200mm
- Koerakenteen paksuus 50-400mm
- Ulkolämpötila -30 ... +20 °C
- Sisälämpötila +10 ... +30 °C
- Kokeen kesto noin 1-2kk
- Mittaustarkkuus $\pm 5\%$.

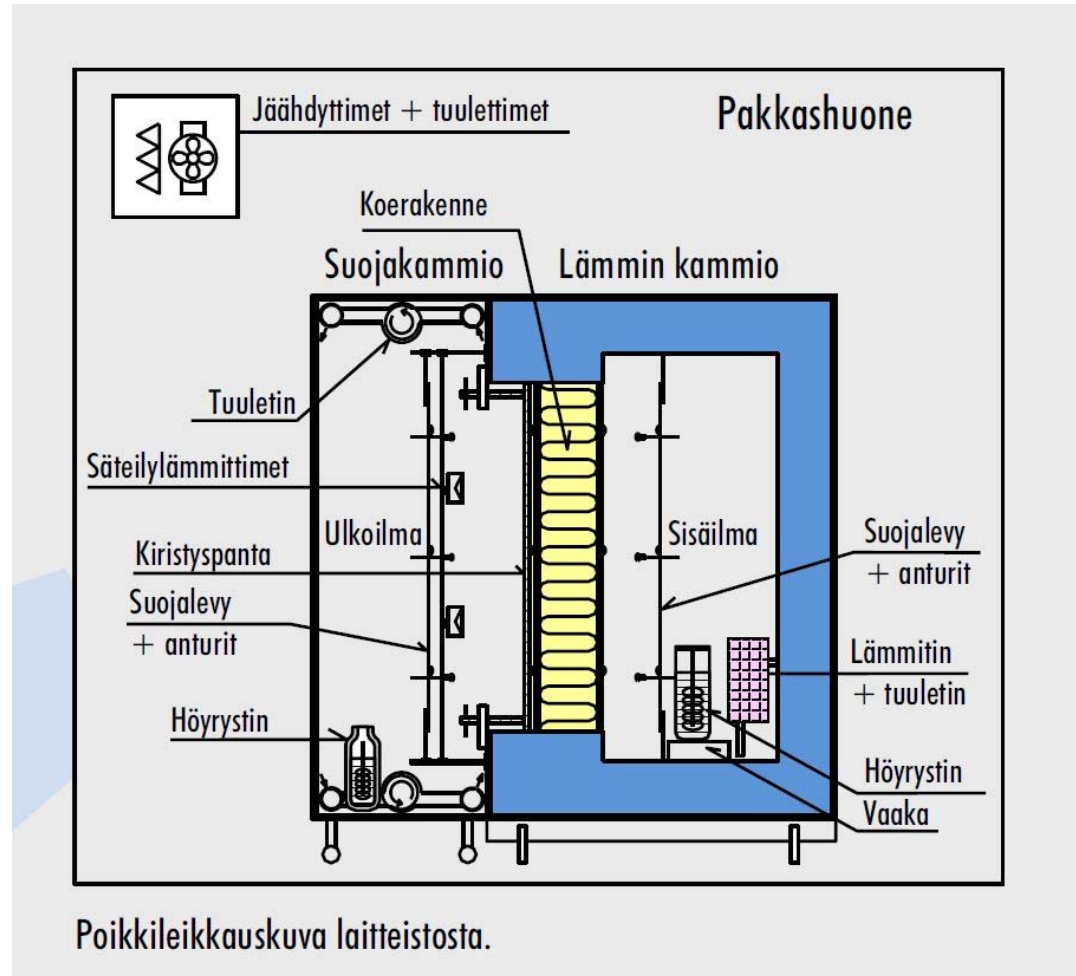
Laitteistolla mitattavia suureita:

- ilman tilavuusvirta
- johtumalla siirtyvä lämpövirta
- konvektiolla siirtyvä lämpövirta
- ilman virtausnopeus
- konvektiolla siirtyvä kosteusvirta
- diffuusiolla siirtyvä kosteusvirta.

Tutkimuksesta selviäviä asioita:

- kondensoitumisen voimakkuus
- kuivumisnopeus
- homehtumisriski
- materiaalien kosteuspitoisuus
- rakenteen lämmönläpäisykerroin
- rakenteen ilmanläpäisykerroin

- rakenteen vesihöyryn / kosteudenläpäisykerroin. (TTY, 2013.)



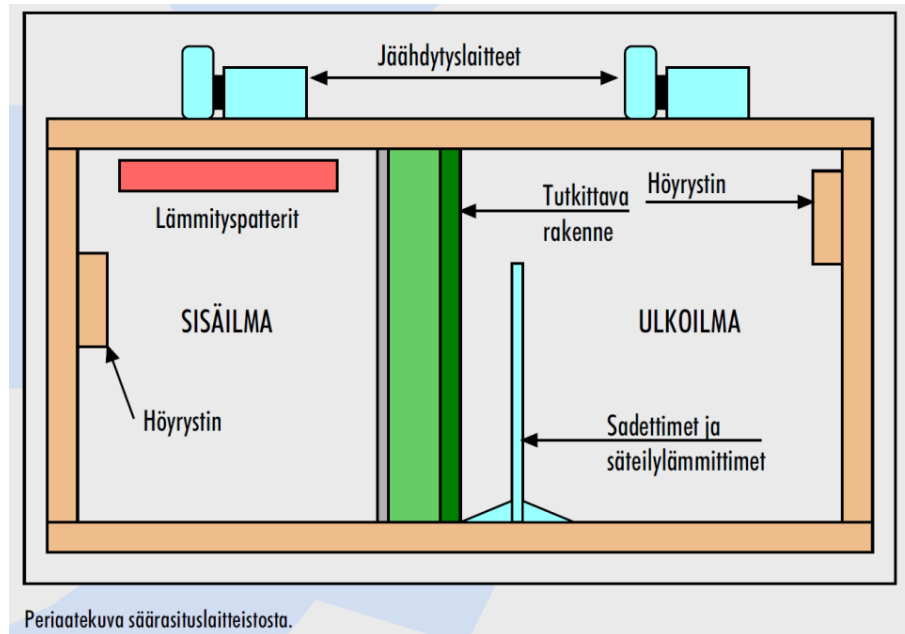
Kuvio 2. Poikkileikkaus TTY:n tutkimuslaitteistosta (TTY, 2013.)

Säärasituslaitteistolla (Kuvio 3) mallinnetaan ilmaston aiheuttamaa rasitusta seinärakenteelle. Koe soveltuu kaikkien rakennetyyppien testaukseen ja voidaan suorittaa pitkäaikaiskokeina tai kiihdytettyinä rasituskokeina. (TTY, 2013.)

Laitteiston ominaisuudet:

- tutkimusaukon mitat: 1980x2980mm,
- koerakenteen max paksuus 450mm ja paino 4000kg

- ulkolämpötila $-30 \dots +50 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- sisälämpötila $+10 \dots +30 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- sisäilman suhteellinen kosteus 40 – 90 % RH. (TTY, 2013.)



Kuvio 3. Periaatekuva säärasituslaitteistosta (TTY, 2013.)

4.3 Rakennusfysikaaliset laskentaohjelmat

Rakennusfysikaalinen suunnittelu voidaan tehdä usein ilman laskentatarkasteluja, mutta laskentaohjelmien käyttö on lisääntymässä seuraavista syistä. Rakennuksen lämpöteknisessä suunnittelussa laskentatarkastelujen osuus kasvaa ja laskentaa käytetään optimoimaan materiaalimenekkiä sekä vähentämään kustannuksia. Lisäksi korjausrakentaminen ja kiristyvät määräykset lisäävät laskentatarkastelujen kysyntää, sillä tarvitaan eri osatekijöiden aiempaa yksityiskohtaisempaa tarkastelua. Laskentatulokset riippuvat laskentaohjelman ominaisuuksista, sisä- ja ulkoilman ominaisuuksista ja laskenta-ajasta. Käyttäjän pitää osata havaita virheet, epä johdonmukaiset tulokset ja korjata laskentaa sekä osata tulkita tuloksia. (Rakennustieto, 2011.)

Rakennusfysikaalisilla laskentaohjelmilla voidaan selvittää uusien ratkaisujen toimivuus ennen niiden käyttöönottoa. Ohjelmilla rakenteiden analysointi on nopeampaa verrattuna kokeellisiin tutkimuksiin. Laskentaohjelmilla voidaan arvioida kondensoitumisriskiä, homehtumisriskiä ja rakennuksen energianku-

lutusta. Lisäksi voidaan selvittää materiaalien, rakenteiden ja rakennedetalji-
en lämpö- ja kosteustekninen toimivuus sekä U-arvot. Ilmavirtaustarkastelut
rakenteissa tai rakennuksissa on myös mahdollista mallintaa. (TTY, 2013.)

Käytössä olevat ohjelmat;

Epästationäärinen lämmön ja kosteudensiirron laskenta, jossa otetaan huo-
mioon muuttuvat sisä- ja ulkoilman olosuhteet.

- HEAT2
- HEAT3
- 1D-HAM
- WUFI Pro
- WUFI – 2D
- Delphin

Stationäärinen lämmön ja kosteudensiirron laskenta

- DOF-Lämpö

Virtauslaskenta

- COMSOL Multiphysics

Energiankulutuksen laskenta

- DOF-Energia (stationäärinen)
- IDA – ICE (epästationäärinen) (TTY, 2013.)

4.4 Standardit

Lämmönläpäisevyyslaitteistolle on standardi: ISO 8990 (1994) Thermal Insu-
lation – Determination of steady-state, thermal transmission properties, Cali-
brated and guarded hot box.

Lämmönläpäisevyyskokeessa selvitetään, millä lämmitysteholla kalorimetri-
kaapin sisällä pysyy haluttu lämpötilaero ulkopuoleen nähden. Standardien
mukaisessa U-arvokokeessa sisälämpötilaksi säädetään tavallisesti +20 °C
ja ulkolämpötilaksi 0 °C. Kun lämpötilojen ja sisäpuolella tarvittavan lämmi-
tystehon arvot eivät enää muutu, ovat kalorimetrikaappi ja tutkittava koe-

elementti saavuttaneet stationääritilan. Stationääritilassa lämpöä siirtyy vakiomäärä aikayksikössä kalorimetrikaapin sisäpuolelta ulos ts. kalorimetrikaapin ja koe-elementin läpi kulkeva lämpövirta (q) on vakio. Stationääritilassa mitattujen lämpötilojen ja kokonaislämmitystehon avulla saadaan laskettua tutkittavan rakenteen kaikki lämpötekniset arvot. Muut laskennassa tarvittavat suureet ovat ennakolta tiedossa. (Vinha, 1997.)

Standardin mukainen lämmönläpäisevyys tutkimus on erittäin vaikea toteuttaa Arctic Powerin laboratoriotiloissa, sillä lämpimälle puolelle syötettävää energiamäärää on lähes mahdoton mitata. Tila on kooltaan niin iso, että stationääritilan saavuttaminen on vaikeaa, lisäksi vaipan muun osan lämpöhäviöt on haastava selvittää.

5 MITTAUSJÄRJESTELYT

5.1 Kylmähuoneiden käyttö ja säätö

Arctic Powerilla on laboratoriotiloissa olosuhdehuone, jonka mitat ovat L=5,5 m, P=12 m ja K=3,5 m. Olosuhdehuoneen lämpötila on säädettävissä välille (-30...+20 °C) Olosuhdehuoneen ilmatilavuus on 231m³. Tilan perään on liitetty vaihtolämpöhuone, joka on kooltaan 2m x 2,3m x 4m. Vaihtolämpöhuoneen lämpötila on säädettävissä välille +70...-50 °C. Vaihtolämpöhuoneen ilmatilavuus 18,4m³ + konehuone 5m³ ja se on kaasutiivis tila. Tällä hetkellä tilojen välissä on seinä-elementillä suljettava noin 2m x 2m aukko. Aukon suuri koko voi tulla ongelmaksi, jos testattavaksi halutaan esimerkiksi betonielementtiseiniä.

Rakennetestauksessa lämpö- ja kosteus-säädeltävien tilojen väliin on tarkoitus asettaa testattava rakenne. Testausolosuhteet rakenteen molemmille puolille on voitava määrittää tarkasti haluttuihin arvoihin. Tärkeimpinä suureina ovat ilman lämpötila ja kosteus. Myös paine-eroa rakenteen yli pitäisi pystyä säätämään. Esimerkiksi rakenteen lämmönjohtavuutta tarkasteltaessa määritellään ainoastaan tilojen lämpötilat. Vaipparakenteiden kosteusteknistä toimintaa tarkasteltaessa testirakenteen molempia puolia on voitava säädellä lämpötilan lisäksi myös ilmankosteuden ja paine-eron osalta. Säätöolosuhteissa on säädeltävä lämpötilaa ja ilmankosteutta, lisäksi rakennetta rasitetaan esimerkiksi sadettamalla ja auringon säteilyllä.

Molemmissa tiloissa on mahdollisuus säätää lämpötila tarpeen mukaan ja asteikkokin on riittävä kaikkiin edellä mainittuihin tutkimuksiin. Ilman suhteellisen kosteuden säätö tapahtuu höyrystimellä. Tällä hetkellä käytettävissä on yksi höyrystin. Paineolosuhteiden määrittäminen pienemmässä vaihtolämpöhuoneessa ei varmaankaan ole ongelma, koska kyseessä on kaasutiivis tila ja suhteellisen pienikokoinen. Olosuhdehuoneen paineen säätely vaatii jonkun verran järjestelyjä jo pelkästään kokonsa takia.

Lähtökohtana on, että olosuhdehuone olisi tutkimuksissa jäähdytettynä ja pienempi, kaasutiivis vaihtolämpöhuone olisi normaalissa huonelämpötilassa eli noin 20 °C:ssa. Pienemmän tilan lämmittämiseen käytettävä energia saa-

daan tarkemmin mitattua ja sen tiiveys on olosuhdehuonetta parempi. Lisäksi kylmäpuolen suojakammion rakentamiselle jää tarvittaessa enemmän tilaa olosuhdehuoneen puolella.

5.2 Testirakenteen liittymä ja tiiveys

Rakenteiden testaamisen kannalta on ensiarvoisen tärkeää saada testiseinän ja olosuhdehuoneen väliset saumat tiiviiksi. Pää tarkoituksena olisi saada aikaan mahdollisimman tiivis ratkaisu, mutta helppo testirakenteen asennus ja purku olisi myös tavoiteltavaa varsinkin jos tehdään lyhytaikaisempia tutkimuksia. Testausympäristö pitää mahdollisesti myös kalibroida rakenteilla joiden rakennusfysikaaliset ominaisuudet tiedetään.

Tampereen teknillinen yliopisto käytti tutkimuksissaan vaneria elementin ja aukon kehyksinä. Vaneri valittiin kehysmateriaaliksi ilma- ja kosteushäviöiden eliminoimiseksi. Koe-elementti tiivistettiin tutkimusaukon reunaan täyttämällä asennusrako polypropeenieristeellä ja teippaamalla raon reunat. Tiivistämisen jälkeen elementti kiristettiin tutkimusaukon kumitiivistettyihin laippoihin kiristyspannan avulla. (Vinha;ym., 1999.)

Yksi nykyaikainen vaihtoehto tiivistämiseen voisi olla polyuretaanivaahdo ja höyrynsulkuteippi. Esimerkiksi vanerikehysten ja karmin väli olisi mahdollista tiivistää uretaanivaahdolla kätevästi ja kokeen päätyttyä sahata sauma auki. Huonona puolena on tietysti aukon kehykseen jäävät eristeet, jotka täytyisi puhdistaa pois, mutta ratkaisuna tähän voitaisiin kokeilla suojakelmua pintojen välissä. Ureetaanivaahdon asennus olisi helppoa ja sen tiiveysominaisuudet ovat hyvät. Menetelmän käyttöä voisi harkita ainakin pitkäkestoisissa tutkimuksissa.

Elementin siirtelyyn ja paikalle asentamiseen tarvittava apulaitteisto on välttämätöntä ainakin tutkittaessa betonielementtirakenteita. Betonielementti painaa noin 500 kg/m². Eräs vaihtoehto olisi rakentaa elementti noin 150mm matalammaksi kuin aukko, jotta testielementti saataisiin siirrettyä paikalleen pumppukärryllä. Elementin voisi tukea XPS-levyn päälle ja tiivistää uretaanivaahdolla. Tulevaisuudessa voisi rakentaa esimerkiksi kiskot lattiaan tai kattoon, jolla elementtiä voi siirrellä.

5.3 Suojakammio ja suojalevyt

TTY:illä suojakammio asetetaan tutkimuksessa tutkittavan rakenteen ulkopuolelle lämmintä seinää vasten tiiviisti. Koneellisesti jäähdytettyjen tilojen RH eli suhteellinen kosteus on normaalisti noin 60–80 %. Alhainen suhteellinen kosteus johtuu siitä, että ilmassa oleva vesihöyry pyrkii kondensoitumaan höyrystimen kylmille pinnoille. Kokeissa voidaan tarvita korkeampia RH:n arvoja, joten pakkashuoneen ilma ja säädettävä ilma saadaan erilleen toisistaan suojakammion avulla. Suojakammion seinät on tehty ohuista polykarbonaattilevyistä, joten lämpötilan säätö voidaan toteuttaa normaalisti pakkashuoneen lämpötilaa muuttamalla. Ulkoilman RH saadaan pysymään korkeana ohjatun ilmankierron ansiosta. Ilmankierto on toteutettu kahdella puhaltimella ja kammion pintoihin on kiinnitetty lämmitysfoliot pintojen mahdollista sulatustarvetta varten. (Vinha;ym., 1999.)

Tutkittavan elementin molemmin puolin asennettavat suojalevyt on valmistettu alumiinista. Niiden tarkoitus on suojata elementtiä suoralta lämpösäteilyltä, ohjata ilmavirtauksia ja toimia anturitelineenä. Levyt suojaavat elementtiä hetkellisiltä lämpötilanvaihteluilta ja tasaavat säteilylämmön heijastumisvaikutusta. Alumiini sopii suojaseinän materiaaliksi koska sillä on suuri lämmönjohtavuus ja mattamustaksi maalattuna suuri emissiviteetti. (Vinha;ym., 1999.)

5.4 Mitattavat suureet ja olosuhteiden säätäminen

- lämpötilan mittauss (sisällä, ulkona, rakenteessa ja pinnoilla)
- ilman suhteellisen kosteus (sisällä ulkona ja rakenteen huokostilassa)
- ilman virtausnopeus sisällä ulkona ja tuuletusraossa
- paine-ero rakenteen yli koe-elementin ylä- ja alaosasta
- ilman vesihöyrynpitoisuus sisällä ulkona ja rakenteen huokostilassa
- (ilman kokonaistilavuusvirta lämpimään kammioon tai sieltä pois)
- (kokonaiskosteusvirta, joka poistuu lämpimästä kammioista)
- (kokonaislämpövirta, joka poistuu lämpimästä kammioista)
- lämpötila-anturit
- kosteuslähettimet
- ilmavirtauslähettimet
- paine-ero lähettimet

- laminaariputket
- jännitteen mittauslaitteet.

Ohjausohjelman tehtävä on mitata sisä- ja ulkoilman olosuhteita kokeen aikana ja säätää ne halutuiksi mahdollisimman nopeasti.

- Sisä- ja ulkolämpötilan säätö
- Ilman suhteellisen kosteuden säätö
- Ilman virtausnopeuden säätö
- Paine-eron säätö. (TTY, 2013.)

6 RAKENNETESTAUKSEN PILOTOINTI JA TOTEUTUS

6.1 Pilotointi

Vaiheessa 1 asennetaan olosuhdehuoneen ja vaihtolämpöhuoneen väliin olemassa oleva elementtiseinä. Ajetaan pienempään vaihtolämpöhuoneeseen 0 °C ja isoon olosuhdehuoneeseen + 20 °C. Ajateltuun ulkoilmaan pyritään saamaan suhteellinen kosteus 90 % RH ja sisäilmaan 50 % RH. Ilman suhteellinen kosteus nostetaan höyrystimien avulla. Lämpötila ja kosteusolosuhteiden tarkastelun lisäksi testataan paineolosuhteiden säädeltävyyttä ja pysyvyyttä testirakenteen molemmilla puolilla. Tavoitteena olisi saada säädettyä paine-ero rakenteen yli siten, että sisäilmassa vallitsee alipaine suhteessa ulkoilmaan, kuten nykyrakentamisessa on tapana.

Vaiheessa 1 mitattavia suureita ovat sisä- ja ulkoilman lämpötila, suhteellinen kosteus ja paine-ero rakenteen yli. Elementtiseinää voidaan tiivistää saumoista lämpimältä puolelta höyrynsulkuteipillä, jotta rakenteesta saadaan riittävän tiivis. Vaiheessa 1 voidaan tehdä tiiveysmittaus molemmille puolille ja tarkastella mahdollisia vuotoja lämpökameralla. Vaiheen 1 tarkoituksena on selvittää nykyisen testausympäristön soveltuvuutta lämpö- ja kosteustekniseen vaipparakenteiden testaukseen. Lisäksi tarkastellaan mahdollisten suojakammioiden ja suojaseinien tarvetta, jotka helpottavat olosuhteiden säädettävyyttä ja toimivat anturointialustana.

Vaiheessa 2 rakennetaan puurankarakenteinen testiseinä, joka asennetaan olosuhdehuoneen ja vaihtolämpöhuoneen väliseen aukkoon. Aukon koko on 2000mm x 2100mm. testiseinä rakennetaan normaalisti ja asennetaan 15mm vanerikehyksen sisään. Rakenne on nykynormien mukainen ja täyttää U-arvo vaatimuksen 0,17 W/m²K, rakenneleikkaus liitteessä. Testirakenne tiivistetään aukkoon uretaanivaahdolla ja saumat teipataan höyrynsulkuteipillä.

Vaiheessa 2 mitattavia suureita ympäristön olosuhteiden lisäksi ovat lämpötila ja kosteusolosuhteet rakenteessa sekä ilman virtausnopeudet rakenteen molemmin puolin ja tuuletusraossa. Anturien sijoitus on esitetty liitteessä. Mittausjärjestelyille on myös kehitettävä ohjausohjelmisto, jolla voidaan sää-

tää olosuhteita rakenteen molemmilla puolilla sekä mitata ja tallentaa haluttuja tietoja testin aikana.

6.2 Toteutus

Pilotointi, vaiheen 1 mittausjärjestelyt, ensimmäinen testi

Vaiheessa 1 olemassa oleva elementti asetettiin paikoilleen testausaukkoon. Elementti tiivistettiin paikoilleen leveällä teipillä, jonka tarkoituksena on tukkia ilmavuodot saumoista. Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteus mitattiin ensimmäisessä vaiheessa olemassa olevalla kalustolla ja tässä tapauksessa Davis Vantage Pro 2 sää-asemalla. Ulkotilaan eli isompaan olosuhdehuoneeseen sijoitettiin sää-aseman ulkoyksikkö ja pienempään vaihtolämpöhuoneeseen eli sisätilaan vastaanotin, joka myös mittaa haluttuja suureita. Vastaanottimesta asennettiin kaapeli tietokoneeseen huoneen ulkopuolelle, joka tallentaa tiedot. Tietokoneeseen asennettiin sää-aseman ohjausohjelma Weatherlink 5.8.1. Sääaseman lämpötila ja kosteusarvot kalibroitiin TSI VelociCalc 9555 monitoimimittarilla.

Paine-eroa mitataan Swemaman 60 paine-ero mittarilla, jonka toinen mittapää on ulkotilassa, toinen sisätilassa ja vastaanotin tietokoneen vieressä. Paine-ero saadaan aikaan sisätilaan asennetulla Onnline Eco poistoilmahuuhtimella, jota säädetään portaattomalla tyristori-säätimellä. Paine-ero mittarista seurataan millä puhallinnopeudella paine-ero saadaan pysymään halutussa arvossa. Sisätilan lämmitys hoidetaan pienellä lämmittimellä, jonka termostaattia säätämällä saadaan sisätilaan haluttu lämpötila. Lämmitykseen käytettyä energiaa mitataan energiamäärämittarilla. Sisätilassa on lisäksi yksi lämpötila-anturi joka mittaa ilman lämpötilaa, jotta saadaan vertailuarvo sääaseman lukemalle. Tällä hetkellä testirakenteen karmissa ja lattiassa on rakenteen läpi kylmäsiilan aiheuttava metallipinta, joiden lämmönjohtuvuutta tarkastellaan lämpötila-antureilla sisä- ja ulkopuolella. Lämpötila-antureiden arvot saadaan dataloggerista ja niitä seurataan manuaalisesti, jotta saadaan tietoa kylmäsiltojen poistamisen tarpeellisuudesta.

Olosuhdehuoneeseen säädettiin lämpötilaksi 0 °C ja vaihtolämpöhuonetta lämmitetään pienellä lämmittimellä. Paine-ero pyrittiin säätämään arvoon –

10 Pa sisätilassa. Kosteuslisää ei käytetä aluksi kummallakaan puolella testirakennetta.

Pilotointi vaiheen 1 mittausjärjestelyt, 2 testi

Pilotointivaiheessa 1 suoritettiin myös toinen testiajo. Tässä testissä olemassa oleva elementtiseinä asennettiin paikoilleen ja anturoitiin ulkopuolelta, sisäpuolelta sekä rakenteen sisältä. Antureilla haluttiin mitata elementin pintalämpötiloja sekä lämmön johtumista rakenteen sisällä. Pienempään vaihtolämpöhuoneeseen asennettiin lisäksi 7 lämpötila-anturia mittaamaan ilman lämpötilaa. Lisäksi käytettiin sääasemaa suhteellisen kosteuden mittaamiseen sisä- ja ulkoilmassa. Paine-eroa rakenteen yli mitattiin edelleen Swemaman 60 paine-ero mittarilla. Toisessa testissä paine-eron synnyttämiseen ei käytetty poistopuhallinta vaan luotiin ulkoilmaan ylipaine sisäilmaan nähden, tämä oli mahdollista toteuttaa olosuhdehuoneen ohjausohjelmalla. Lämpötila-anturit kalibroitiin Beamex MC5 kalibrointilaitteella lämpötiloissa 0 °C, 100 °C, 66 °C ja 22 °C.

Testi aloitettiin 1.8.2013 klo 8.41. Ulkoilmalle asetettiin lämpötilaksi 0 °C ja asetettiin huomattavasti ylipainetta suhteessa sisäilmaan. Paine-ero rakenteen yli ei kuitenkaan noussut riittävästi ja paransimme tiivistystä teippaamalla elementin myös sisäpuolelta huolellisesti. Tämän jälkeen paine-ero alkoi pysyä arvossa -10 Pa ($\pm 2 \text{ Pa}$). Tällöin ylipainetta olosuhdehuoneessa oli noin 20 Pa ympäröivään tilaan nähden, joten ilmavuotoa oli edelleen. Testin alkaessa sisäilman lämpötila oli 20 °C eikä sitä lämmitetty vaan seurattiin lämpötilan laskua ilmavuotojen ja kylmäsiltojen johdosta. Lämmitys lisättiin 24 tunnin jälkeen, kun sisäilman lämpötila oli laskenut 4,2 °C, eli 15,8 °C:een. Laskimme tarvittavan lämmitystehon olevan noin 125 W ja lisäsimme kyseisen tehoisen lämmittimen sisäilmaan. Lämmitysteho oli kuitenkin liian suuri ja sisälämpötila lähti nousemaan hitaasti ylöspäin. Testi päättyi 2.8.2013 klo 13.00, jolloin sisälämpötila oli 17 °C. Paine-ero pysyi yli vuorokauden arvossa -10 Pa. Ilman suhteellinen kosteus oli testin alkaessa sisäilmassa 62 % ja ulkoilmassa 65 %. Testin päättyessä RH oli sisällä 50 % ja ulkona 64 %.

Pilotointivaihe 2 aloitettiin poistamalla kylmäsillat testausympäristöstä. Karmien ympärillä olevasta pellistä poistettiin yksi kappale, jotta lämmönjohtuminen pysähtyy. lattiasta poistettiin teräslevyt, joiden alta paljastuivat vanerilevyt. Kylmäsillojen poistamisen jälkeen aloitettiin testiseinän rakentaminen. Testiseinään (Kuvio 4) tehtiin 21 mm vanerista 280 mm syvät kehykset, joiden ulkomitat ovat korkeus 1950 mm ja leveys 1890 mm. Kehyksen sisälle rakennettiin toinen kehys jonka syvyys on 198 mm eli sama kuin runkotolpassa. Sisempään kehykseen asennettiin sisäpuolelle höyrynsulkumuovi, kiinnitettiin rakennusnitojalla ja tiivistettiin höyrynsulkuteipillä. Höyrynsulkumuovin ulkopuolelle samaan tasoon sisemmän vanerikehyksen kanssa asennettiin 3 kpl runkotolppia 48x198 ja muovin sisäpuolelle vaakakoolaukseksi 3 kpl 48x48. Kipsilevy asennettiin ulomman vanerikehyksen päälle ja tiivistettiin höyrynsulkuteipillä. Runkotolpan ulkopuolelle ulomman vanerikehyksen sisään laitettiin 12mm tuulensuojalevy ja 22x100 pystykoolauslaudat runkotolppien kohdalle. Ulkoverhouspaneeli kiinnitettiin ulomman vanerikehyksen reunojen päälle. Tuulensuojalevy tiivistettiin kehykseen höyrynsulkuteipillä. Koolauksesta ja ulkovuorilaudasta tehtiin ulkovuorielementti, joka voidaan asentaa helposti kokonaisuena.



Kuvio 4. Seinäelementin runko

Mittausjärjestelyt aloitettiin anturoimalla rakenne iButton langattomilla lämpö- ja kosteus antureilla. IButton digitaaliohjatut 1-wire anturit mittaavat lämpötilaa ja suhteellista kosteutta testin aikana, antureista luetaan mittausarvot testin jälkeen kytkemällä anturi lukijalla tietokoneeseen. Päädyttiin langattomiin antureihin asentamisen helppouden takia, vaikka rakenne pitää purkaa testin jälkeen. Anturit kiinnitettiin kiinnitysjalustan avulla joko ruuveilla tai teippaamalla, lisäksi muutamia antureita upotettiin puurakenteisiin. Antureita asennettiin erityisesti rajapintoihin, eli kohtiin joissa materiaali vaihtuu: esimerkiksi höyrynsulun molemmille puolille muovin pintaan, tuulensuojalevyn ja kipsilevyn taakse. Tarkemmin antureiden paikat löytyvät liitteestä.

Testiseinä koostuu runkoelementistä ja ulkovuorielementistä. Seinän paikalleen asennuksessa käytettiin pumppukärryä, jolla runkoelementti siirrettiin testausaukkoon. Runkoelementin alle laitettiin 3 kappaletta styrox 50 mm lattiaeristelevyä. Levyt asennettiin pumppukärryn molemmille puolille ja elementti laskettiin niiden päälle. pumppukärryn paikka täytettiin styrox-levyillä ja tiivistettiin uretaanilla. Elementin reunoille ja ylös jäi noin 6 cm tilaa, joka täy-

tettiin uretaanilla. Vaahdotusta varten elementtiin ja seinän reunoihin oli kiinnitetty ohut muovikalvo, joka helpottaisi elementin pois ottamista. Vaahdotuksen jälkeen huomattiin, että uretaani ei tarttunut riittävän hyvin muovin ja suuren raon takia. Tämän jälkeen vaahdotukset purettiin ja otimme seinän pois.

Toisella asennuskerralla (Kuvio 5) teimme alapuolen tiivistyksen samalla tavalla kuin aiemmin, mutta sivut ja yläreunan täytimme ensin 50 mm styrox levyllä ja vaahdotimme styrox levyn molemmilta puolilta. Karmiin tulevaan suojamuoviin teimme noin 50mm tartuntakaistaleen poistamalla muovia ja elementin puolelta suojamuovi poistettiin kokonaan. Näillä toimenpiteillä saimme elementin tiivistettyä aukkoon. Varmistukseksi vielä teippasimme saumat höyrynsulkuteipillä.



Kuvio 5. Seinäelementin kiinnitys

Perjantaina 23.8 aloitettiin testaus (Kuvio 6). Olosuhdehuoneeseen säädettiin lämpötilaksi 0 °C ja höyrystimen tavoitearvoksi asetettiin 90 % RH. Paineeron tavoitearvo oli -10 Pascalia alipainetta lämpimässä vaihtolämpöhuoneessa. Aluksi paine-ero oli -70 Pa, mutta myöhemmin saimme säädettyä sen noin -15 Pascaliin. Vaihtolämpöhuoneen ns. sisäilmaa ei lämmitetty lai-

sinkaan, koska sen laskennallinen lämmitystarve oli niin pieni. Päädyimme vain pitämään valot päällä huoneessa, joka lämmittäisi huonetta kuitenkin noin 60 W teholla. Tähän asti kaikki oli kunnossa viikon mittaista testiajota varten.

Maanantai-aamuna 26.8 totesimme, että olosuhdehuoneen jäähdytys oli pois päältä ja tilan valot olivat lämmittäneet huoneen noin + 30 °C:een. Häiriötila oli syntynyt laitteiston CO- anturin ilmoituksesta ja pysäyttänyt jäähdytyksen. Tiedossa oli, että anturi on antanut turhia hälytyksiä ennenkin, mutta ilmeisesti korkea suhteellinen kosteus olosuhdehuoneessa vaikutti herkkään anturiin. Lämpötila oli lähtenyt nousuun jo perjantai-iltana, joten testitulokisa ei juurikaan saatu. Anturi pysäytti testit vielä kahteen otteeseen, joten testiajan loputtua meillä oli käytössä muutama noin 10 tunnin jakso onnistunutta testiä.



Kuvio 6. Testaus käynnissä

7 TULOKSET

7.1 Pilotointivaiheet

Pilotoinnin 1 vaiheen ensimmäisestä testistä voidaan päätellä seuraavia asioita:

- Paine-ero rakenteen yli voidaan toteuttaa poistopuhaltimella.
- Lämmityksen tarve on erittäin pieni ja tarvitsee tarkat säätölaitteet
- Kylmäsiilat lattiassa ja karmissa on katkaistava
- Suhteellisen kosteuden arvot saatiin melko lähelle haluttuja, ilman lisäkostutusta
- Lämpövirtaa mitattaessa poistopuhaltimeen pitää asentaa ilman virtausmittaus, jotta sen kautta poistuva lämpöenergia voidaan laskea.

Pilotoinnin 1 vaiheen toisen testin jälkeen voidaan päätellä seuraavia asioita:

- Paine-ero rakenteen yli voidaan toteuttaa olosuhdehuoneen ylipaineella.
- Lämmityksen tarve on erittäin pieni ja tarvitsee tarkat säätölaitteet
- Ylipaineessa olosuhdehuoneen ulkoilma tarvitsee lisäkostutusta
- Olosuhteet molemmille puolille pystytään tekemään, mutta tarkkuuden parantamiseksi testausympäristöä pitää kehittää.
- Testausympäristöä voisi käyttää tällaisenaan säärasituskokeessa ja myös lämpö- ja kosteusteknisessä tutkimuksessa, mikäli osaa suureista ei pyrittäisi mittaamaan vaan tarkisteltaisiin vain rakenteessa tapahtuvaa lämmön ja kosteuden siirtymistä.

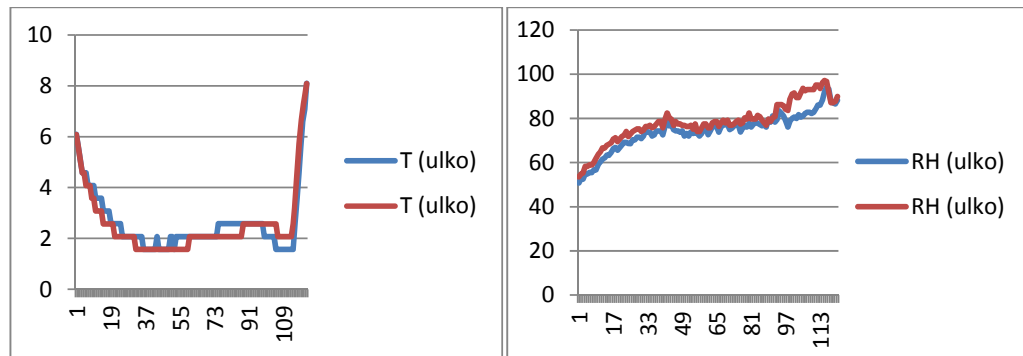
Pilotointivaiheen 2 jälkeen voidaan päätellä seuraavaa:

- Haluttu lämpötila ja suhteellinen kosteus saavutetaan olosuhdehuoneessa
- Sisäilman suhteellinen kosteus kaikissa testeissä on ollut noin 50 % ilman toimenpiteitä

- Paine-eroa rakenteen yli voidaan säätää olosuhdehuoneen ohjausohjelmalla
- Testielementin tiivistäminen onnistuu uretaanivaahdolla ja höyrynsulkueteipillä
- Elementin irrottaminen ja karmien puhdistus onnistui ilman ongelmia
- Anturointi iButtoneilla onnistui ja antureiden toiminta oli moitteetonta.

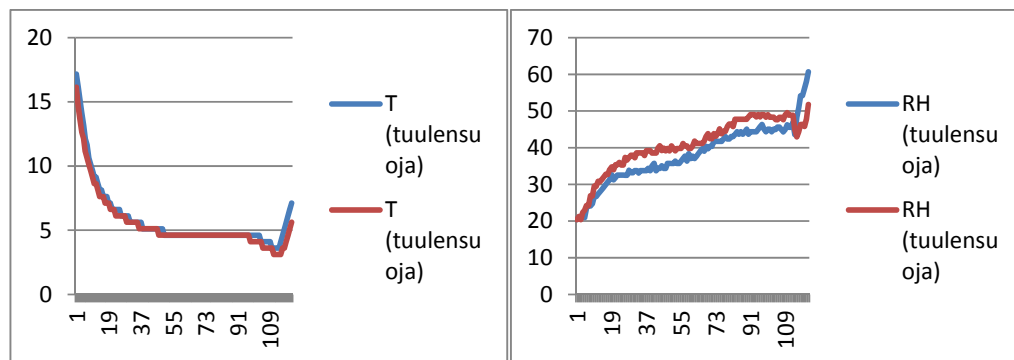
7.2 Mittaustulokset

Pilotointivaiheessa 2 rakenteeseen asennettiin 22 iButton anturia, jotka mittasivat sekä lämpötilaa että suhteellista kosteutta. Luotettavuusongelmien takia pisin testijakso oli noin 10h. Testijakso alkoi 26.8 klo. 10.00 ja päättyi 26.8 klo. 20.00. Antureiden mittaussväli oli 5 minuuttia. Paine-ero rakenteen yli oli noin -15 Pa sisäilmassa.



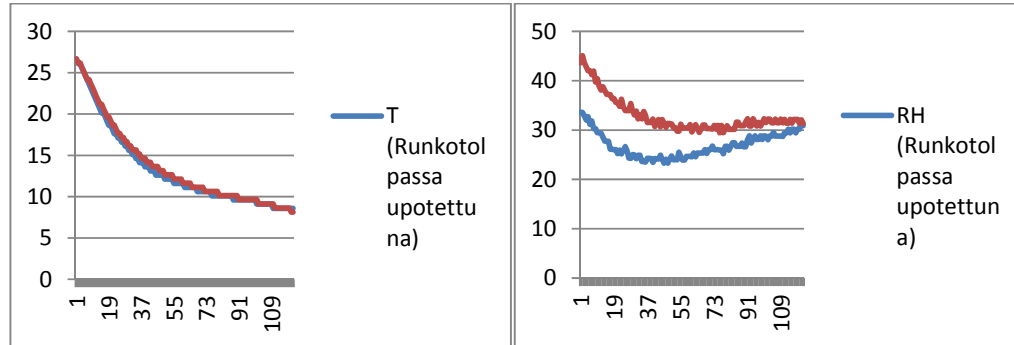
Kuvio 7. Lämpötila ja suhteellinen kosteus "ulkoilmassa"

Ulkolämpötila laski noin 2 °C:een ja suhteellinen kosteus nousi noin 90 %:iin, jolloin jäähdytyslaitteisto sammui ja lämpötila lähti nousemaan (Kuvio 7).



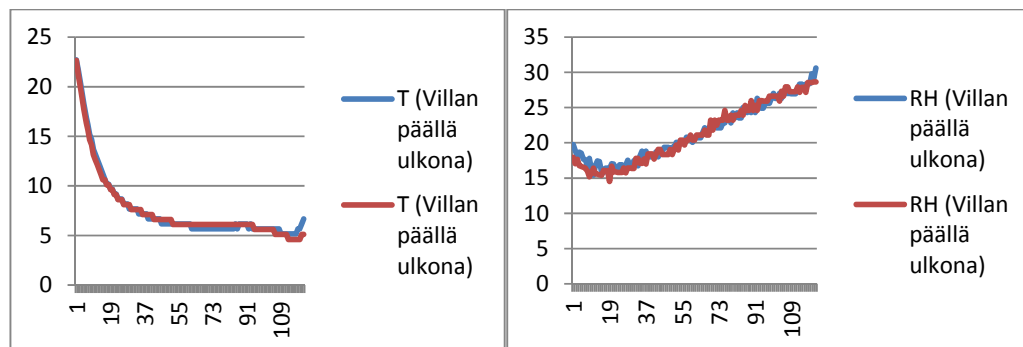
Kuvio 8. Lämpötila ja suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn ulkopinnassa.

Tuulensuojalevyn pinnassa olevissa antureissa lämpötila laski hieman alle 5 °C:een, mutta olisi jatkanut laskuaan testin edetessä. Suhteellinen kosteus pysyi alle 50 %:ssa (Kuvio 8).



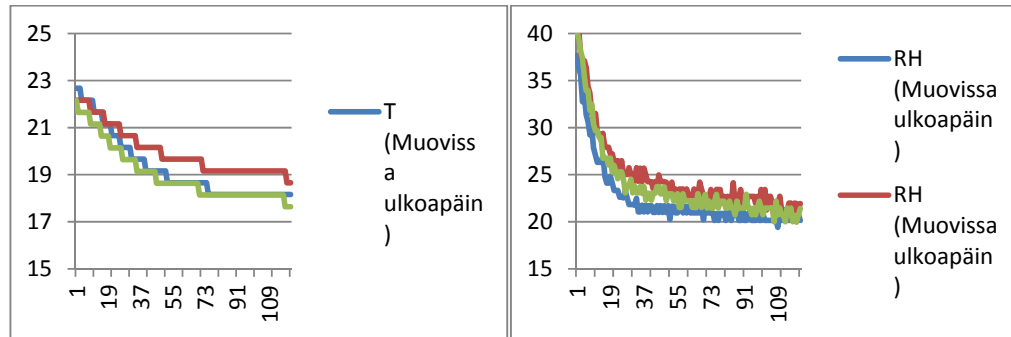
Kuvio 9. Lämpötila ja suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn alla runkotolppaan upotettuna

Tuulensuojalevyn alla runkotolpassa oli upotettuna kaksi iButton anturia. Lyhyen testijakson aikana lämpötila ei kuitenkaan ehtinyt tasaantua vaan laski koko jakson ajan. Suhteellinen kosteus oli testijakson lopulla noin 30 % (Kuvio 9).



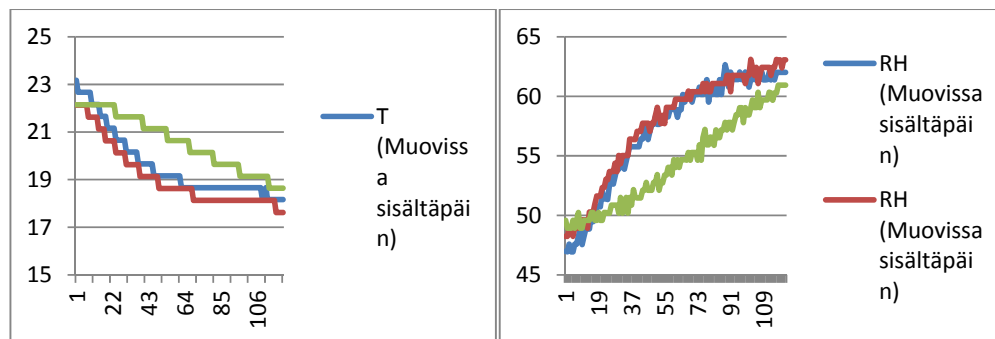
Kuvio 10. Lämpötila ja suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn sisäpinnassa villan kohdalla

Villatilan kohdalla tuulensuojalevyn alla lämpötila laski hieman nopeammin kuin vastaavalla syvyydellä olevat anturit upotettuna runkopuuhun. Suhteellinen kosteus oli testijakson lopulla noin 30 %. Runkotolpan kohdalla koolauslauta todennäköisesti hidasti jäähtymistä (Kuvio 10).



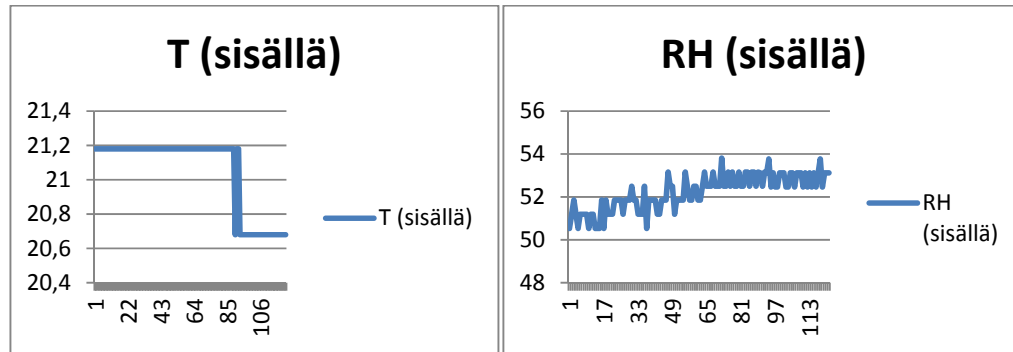
Kuvio 11. Lämpötila ja suhteellinen kosteus höyrynsulkumuovin ulkopinnassa

Höyrynsulkumuovin pinnassa oli ulkoapäin asennettuna kolme anturia, joista yksi oli muovin toisella puolen olevaa koolausrimaa vasten. Rimaa vasten oleva anturi reagoi jäähtymiseen hieman hitaammin kuin kaksi villatilan kohdalla olevaa anturia. Lämpötilan muutos oli melko pieni ja tarvittaisi paljon pidempi testijakso, että lämpötila tasaantuisi näin syvällä rakenteessa. Suhteellinen kosteus muovissa on erittäin matala noin 20 %, mikä johtuu ilman virtaamisesta kylmästä lämpimään päin ja lämmin ilma pystyy sitomaan enemmän kosteutta kuin kylmä (Kuvio 11).



Kuvio 12. Lämpötila ja suhteellinen kosteus höyrynsulkumuovin sisäpinnassa

Höyrynsulkumuovin sisäpuolella muovin pinnassa oli kolme anturia. Lämpötila laski hieman alle 19 °C:een ja suhteellinen kosteus nousi hieman yli 60 %:iin. Suhteellinen kosteus muodostuu sisäilman suhteellisesta kosteudesta ja muovin pinnassa olevasta lämpötilasta, joka ei ehtinyt kuitenkaan tasoittua testin aikana (Kuvio 12).



Kuvio 13. Lämpötila ja suhteellinen kosteus ”sisäilmassa”

Sisäilmassa lämpötila ja kosteus pysyivät melko tarkasti lähtöarvoissa, mikä johtuu etenkin testin lyhyestä kestosta sekä vaihtolämpöhuoneen isosta koosta (Kuvio 13).

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Pilotointivaiheen 1 jälkeen voidaan todeta, että testausympäristössä on potentiaalia lämpö- ja kosteustekniseen tutkimukseen. Tärkeimmät suureet eli lämpötila, suhteellinen kosteus ja paine-ero voidaan säätää rakenteen molemmille puolille. Ympäristö vaatii kuitenkin kehitystyötä ja hieman muutoksia rakenteisiin. Ensimmäisenä olisi katkaistava kylmäsiilat tutkittavan rakenteen ympäriltä eli karmista ja lattiasta. Tämän jälkeen tutkimusympäristöä voisi käyttää säärasituskokeessa, missä tutkitaan vain rakenteessa tapahtuvia muutoksia. Lisäksi voitaisiin myös tutkia lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa rakenteessa. Näissä tapauksissa rakenne tiivistettäisiin uretaanivaahdolla joka puolelta, jotta saadaan mahdollisimman tiivis rakenne.

Mikäli halutaan saada tarkkaa tietoa lämmön ja kosteuden siirtymisestä sekä paine-eron vaikutuksista, pitäisi testattavan rakenteen molemmille puolille rakentaa suojakammiot. Suojakammioilla pienennetään säädettävää ilmatilavuutta, jolloin tarkkuus ja mitattavuus saadaan paremmaksi. Ulkoilman puolella kammion tärkeimmät tehtävät ovat, että sen sisäpuolella suhteellinen kosteus saadaan nostettua arvoon 90 % ja lämpötila sekä paine-ero saadaan pidettyä tarkemmin halutussa arvossa. Sisäilman olosuhteita mallintava vaihtolämpöhuone näyttäisi olevan liian suuri tarkkoihin mittauksiin, sillä esimerkiksi lämmityksen tarve on erittäin pieni suhteessa huoneen kokoon.

Pilotointivaiheen 2 seinän rakentaminen onnistui suunnitelmien mukaan ja seinästä kehyksineen tuli toimiva. Seinän paikoilleen siirtäminen pumppukärjellä onnistui, mutta elementin alapuolinen eristelevykerros voisi olla yhtenäinen. Johtopäätöksenä tästä tulevaisuudessa aukon pohjalle laitettaisiin 100 mm eristelevy ja asennetaan elementin kehys sen päälle sekä ankkuroidaan paikalleen. Tämän jälkeen seinä rakennettaisiin loppuun molemmilta puolilta. Toimintatapa parantaa tiiveyttä ja helpottaa elementin saamista oikeaan paikkaan, lisäksi myös paksut vaahtokerrokset jäävät pois.

Sivujen ja yläpuolen rakojen vaahdottaminen epäonnistui, koska vaahdotettava rako oli liian suuri, lisäksi molemmilla pinnoilla oleva muovi esti vaahdon tarttumisen huokosiin. Jatkossa vaahdotettavat välit pitää tehdä sopivan ko-

koiksi eli noin 1-2 cm, sopiva väli saadaan kun asennetaan asennusvälin keskellä esimerkiksi eristelevy ja vaahdotetaan molemmilta puolilta. Karmissa olevat tiivistelaipat voitaisiin poistaa, mikäli niistä ei ole hyötyä toisenkaan elementin tiivistyksessä. Tulevaisuudessa voisi myös pohtia muita mahdollisuuksia elementin tiivistämiseksi, esimerkiksi ilmalla täytettävää kumia kehyksenä.

Olosuhteet ulkoilman puolella saatiin suunnitelmien mukaisiksi ja höyrystin toimi hyvin. Paine-eroa rakenteen yli pystyttiin muuttamaan olosuhdehuoneen ohjausohjelmalla. Testi epäonnistui luotettavuusongelmien takia, mutta tärkein tieto eli olosuhteiden säädeltävyys saatiin selvitettyä. Elementin rakentamisesta ja tiivistyksestä opimme myös paljon ja seuraavalla testikerralla voidaan saada varmuutta ratkaisuille. Sisäilman eli vaihtolämpöhuoneen olosuhteet tarvitsevat vielä lisätestiä. Tarvitaan tietoa siitä, pysyykö suhteellinen kosteus halutussa 50 % RH myös pitkäkestoisessa testissä ja miten sisälämpötila saadaan pidettyä vakiona. Tässä testissä sisälämpötila ei muuttunut lainkaan, koska ulkoilman lämpötila vaihteli liian nopeasti.

9 JATKOKEHITYS

Tulevaisuudessa tarvitaan lisää testiajoja, jotta saadaan varmistettua laitteiston toimintavarmuus ja pitkäkestoinen testi onnistumaan. Peruselementit eli lämpötila, suhteellinen kosteus ja paine-ero rakenteen yli ovat hallittavissa molemmilla puolilla. Kylmäsillat on poistettu ja elementin tiivistämistä harjoiteltu. Anturointi iButton antureilla toimi moitteettomasti eli anturit oli helppo asentaa ja lukea lisäksi mittaustarkkuus oli riittävä. Lopuksi vielä pohdintaa kolmesta rakennusfysikaalisesta tutkimuksesta, jotka määrittelimme jo tutkimuksen alussa sekä niiden mahdollisuuksista testausympäristössämme.

Säärasitus ja olosuhdetestaukseen testausympäristö soveltuu jo pelkästään tähän asti suoritetuilla toimenpiteillä. Säärasitus testissä ulkoilman olosuhteita muunnellaan ja sisäilman olosuhteet voidaan pitää vakiona. Tämä testi ei vaadi suurta tarkkuutta sisäilman lämmityksen suhteen, joka on haastavin toteuttaa. Sisäilman olosuhteita voisi ylläpitää esimerkiksi vaihtolämpöhuoneen omalla laitteistolla. Ulkoilman olosuhteiden mallintamiseen Arctic Powerilta löytyy monipuolisesti kalustoa.. Ulkoilma voidaan asettaa jopa -30°C :een, tällöin höyrystintä ei kuitenkaan voida käyttää ilman suhteellisen kosteuden nostamiseksi. Pakkasen lisäksi rakennetta voidaan rasittaa kovalla tuulella ja jäätävällä sateella. Toisaalta ulkoilma voidaan lämmittää $+30^{\circ}\text{C}$:een ja rasittaa rakennetta UV-säteilyllä. Testaukseen soveltuvat kaikki julkisivumateriaalit, kuten puuverhoukset, betonirappaus, maalit, pinnoitteet, tiilet, pellit sekä ovet ja ikkunat. Rakenne voidaan tietysti anturoida, jotta saadaan tietoa sen ominaisuuksista ja toiminnasta äärimmäisissä olosuhteissa.

Lämpö- ja kosteustekninen tutkimus onnistuu tällä hetkellä rakenteen osalta, mutta ei ympäristöjen osalta. Elementin molemmille puolille pystytään säätämään olosuhteet, mutta tilojen koon takia mitattavuus on hankalaa. Mikäli haluaisimme mitata esimerkiksi lämpövirtaa, meidän pitäisi tietää kuinka paljon lämpöenergiaa poistuu vaihtolämpöhuoneen muista seinistä, lisäksi pitäisi varmistua huoneen ilmatiiveydestä. Mikäli halutaan kehittää testausympäristöä, pitäisi rakenteen molemmille puolille rakentaa tiiviit suojakammiot, joiden sisällä olosuhteita säädetään. Tässäkin tapauksessa sisäilmaan syötet-

tävän lämpöenergian mittaaminen olisi vaikeaa, koska lämpöenergia karkaisi suojakammion seinistä.

Olisi mielenkiintoista suorittaa vaihtolämpöhuoneelle ilmatiiveysmittaus, kun testielementti on paikoillaan. Mikäli tila saataisiin tiiviiksi, voisi pitkäkestoises-
sa testissä selvittää tarvittava lämmitysteho. Tässä tapauksessa vaihtolämpö-
huoneen ympärillä oleva tila pitäisi olla samassa lämpötilassa sisäilman
kanssa, jotta muiden kuin testiseinän kautta syntyvä lämpöhäviö olisi nolla.
Tampereen Teknillisen Yliopiston malli eli kalorimetrikaappi sijoitettuna kyl-
mähuoneeseen olisi todennäköisesti helpompi toteuttaa, mutta molempia
tiloja ei voisi hyödyntää.

Standardin mukaista lämmönläpäisevyydestä ei ole mahdollista suorittaa
Arctic Powerin kahden tilan testausympäristössä. Tilat ovat liian suuria ja täs-
tä johtuen tarvittavaa mittaustarkkuutta ei voida saavuttaa. Lämmönlä-
päisevyydestä olisi myös järkevintä toteuttaa kalorimetrikaapilla, jolloin si-
säilman olosuhteita pystyttäisiin hallitsemaan parhaiten.

LÄHTEET

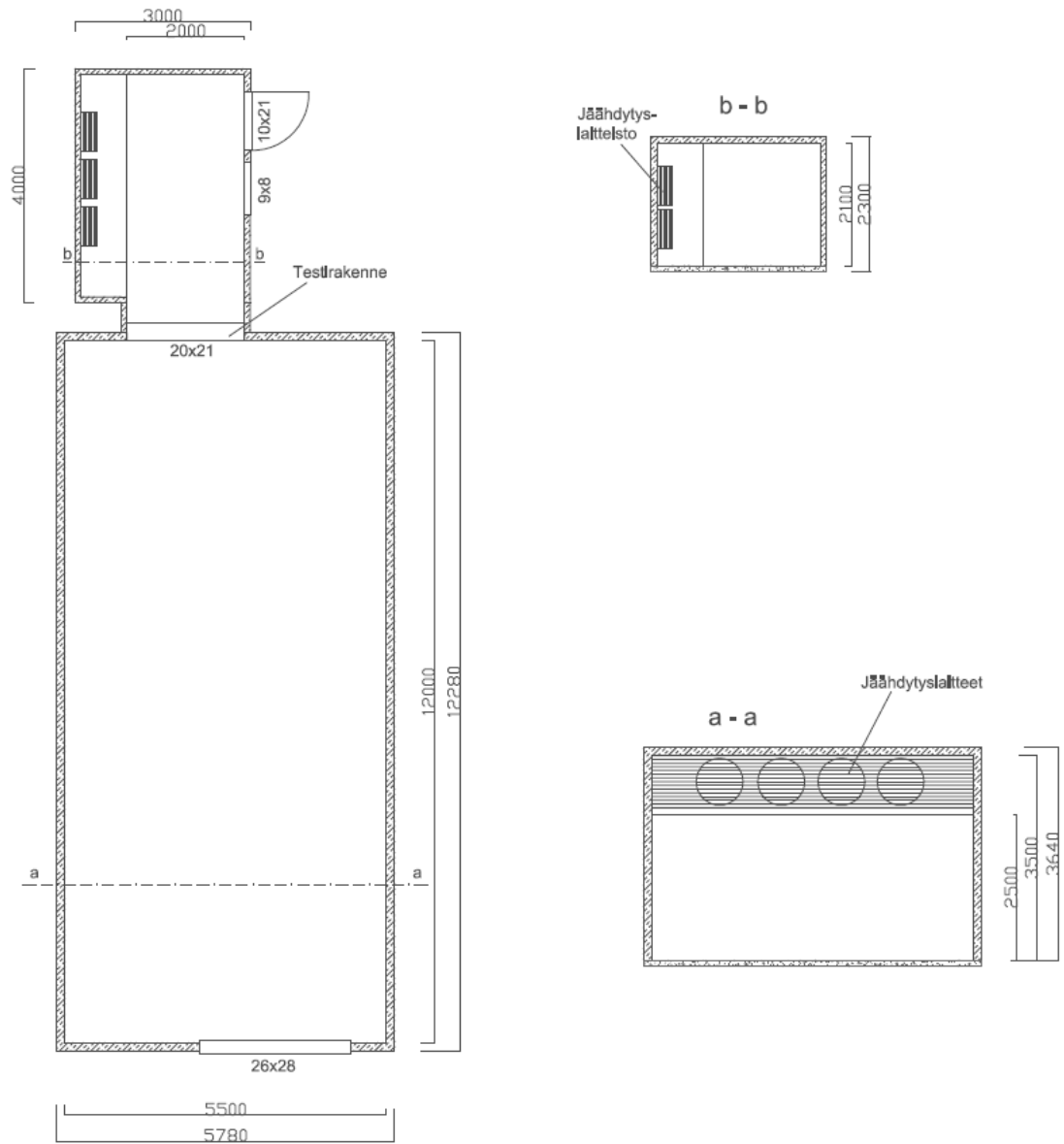
- Arctic Power 2013. Tilat ja laitteet. Osoitteessa <http://www.arcticpower.fi/fi/tilat-ja-laitteet/>. 10.7.2013.
- Björkholtz, D. 1997. Lämpö ja kosteus rakennusfysiikka. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- Rakennustieto 2011. Rakentajain kalenteri 2012. Hämeenlinna: Rakennustieto Oy.
- RakMK 2010 = Rakentamismääräyskokoelma C: Lämmöneristys, määräykset.
- Savonia 2013. Rakennustekniset tutkimukset. Osoitteessa <http://portal.savonia.fi/amk/fi/tki-ja-palvelut/asiantuntijapalvelut/rakennusalan-palvelut/rakennustekniset-tutkimukset>. 1.7.2013.
- Siikanen, U. 1996. Rakennustekniikka, perusteet ja sovellukset. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- Tiivistalo 2013. Konvektio. Osoitteessa <http://www.tiivistalo.fi/tiedostot/default.asp?sivu=tiivistaloWiki&otsikko=konvektio&tunnus=377> . 1.9.2013
- Tampereen teknillinen yliopisto 2013. Tutkimuspalvelut. Osoitteessa <http://www.tut.fi/fi/tietoa-yliopistosta/laitokset/rakennustekniikka/tutkimus/rakennetekniikka/rakennusfysiikka/tutkimuspalvelut/index.htm>. 20.7.2013
- Vinha, J. – Käkelä, P. 1999. Vesihöyryn siirtyminen seinärakenteissa diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu.
- Vinha, J. 1997. Lämmönläpäisevyyslaitteiston toiminnan tarkastelu. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu.

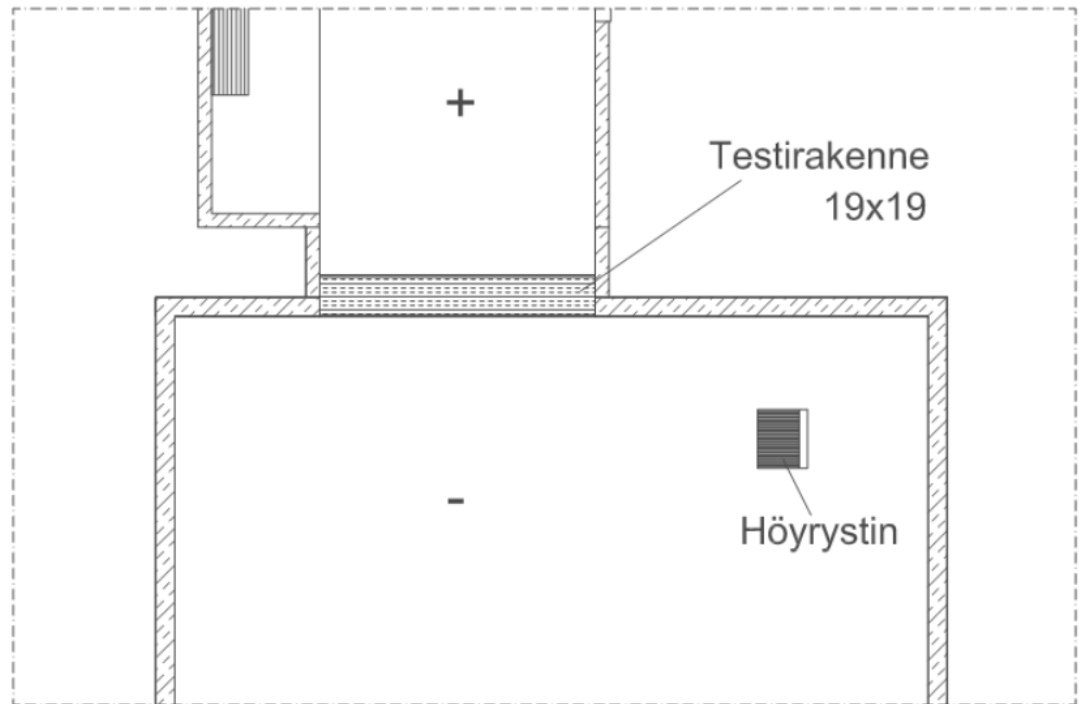
LIITTEET

Pohjapiirros laboratoriosta	Liite 1
Testausympäristö	Liite 2
Testiseinän leikkaus	Liite 3
Anturointi	Liite 4
Testaus-suunnitelma	Liite 5

Pohjapiirros laboratoriodista

Liite 1





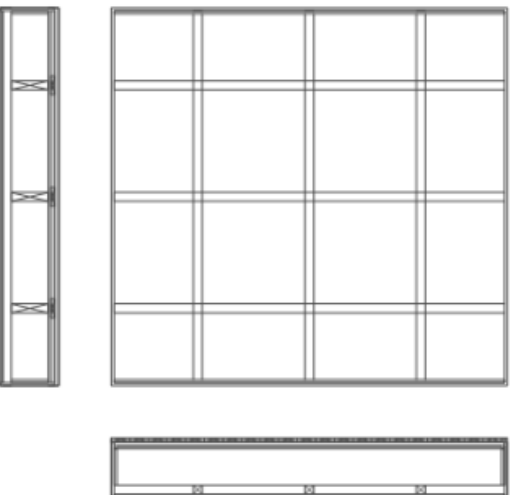
Testirakenne

Rakenne sisältäpäin

- Kipsilevy 13mm
- Koolaus 48mmx48mm, k600
- Mineraalivilla 50mm
- Höyrynsulkukalvo
- Pystyrunko 48mmx198mm, k600
- Mineraalivilla 200mm
- Puukuitulevy 12mm
- Pystykoolaus 22mm, k600
- Vaakaverhouk 23mm

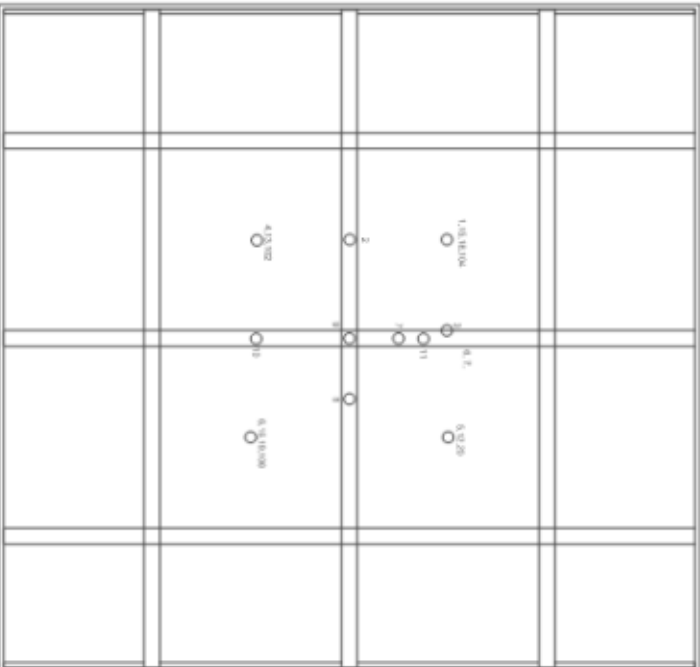
U-arvo: 0,15 W/m²K

Kehys: 15mm vaneri

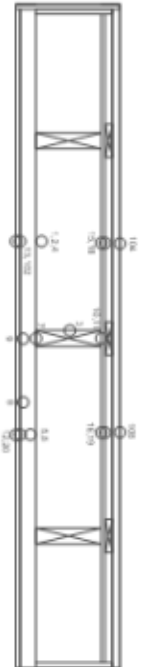


iButton anturien sijainti

Seinä ulkoapäin



1. Muovissa ulkoapäin
2. Muovissa koolausta vasten ulkoapäin
3. Runkotolpan sivussa villatilan puolivälissä
4. Muovissa ulkoapäin
5. Muovissa sisättäpäin
6. Muovissa sisättäpäin
7. Muovissa runkotolppaa vasten sisättäpäin
8. Koolausrimassa upotettuna sisättäpäin
9. Koolausrimassa upotettuna runkotolpan kohdalla
10. Runkotolpassa upotettuna tuulensuojan alla
11. Runkotolpassa upotettuna tuulensuojan alla
12. Villan päällä kipsilevyn alla
13. Villan päällä kipsilevyn alla
15. Villan päällä tuulensuojalevyn alla
16. Villan päällä tuulensuojalevyn alla
18. Tuulensuojalevyn päällä
19. Tuulensuojalevyn päällä
20. Kipsilevyn päällä
102. Kipsilevyn päällä
104. Ulkoverhouksen päällä
108. Ulkoverhouksen päällä
109. Vaihdotämpöhuoneen hyllyssä kiinni



Anturointi

Liite 4

Testaus-suunnitelma

Liite 5

Yleistä

- Tarkoituksena koekäyttää olosuhdehuonetta ja vaihtolämpöhuonetta rakennetestausta olosuhteissa.
- Tavoitteena saada tietoa lämpötilan säädettävyydestä ja pysyvyydestä.
- Kosteusolosuhteiden säädettävyydestä höyrystimellä ja ilman höyrystintä syntyvä normaalitila sekä kylmällä että lämpimällä puolella
- Tarkkaillaan paine olosuhteita rakenteen yli ja mahdollisuuksia niiden säätelyyn.
- Mahdollisuuksien mukaan ilmatiheys ja lämpökamera tutkimuksia vuotokohtien löytämiseksi.

Tavoiteolosuhteet

- Vaihtolämpöhuoneessa sisäilma: Lämpötila + 20 °C, suhteellinen kosteus RH 50 %, alipaine suhteessa ulkoilmaan
- Olosuhdehuoneessa ulkoilma: Lämpötila 0 °C, suhteellinen kosteus 90%, ylipaine suhteessa sisäilmaan

Testausjärjestelyt

- Asennetaan olemassa oleva elementtiseinä aukkoon ja tiivistetään saumat villalla ja höyrönsulkuteipillä.
- Anturoidaan sisä- ja ulkopuoli lämpötila- ja kosteusantureilla.
- Antureita sekä testirakenteen pintaan että ympäröivään ilmatilaan eri korkeuksille.
- Mitataan suhteellista kosteutta ympäröivästä ilmasta sekä sisä- että ulkopuolelta, ensin ilman höyrystintä ja lisäksi höyrystimen avustamana.
- Mitataan paine-eroa rakenteen yli ja säädetään mikäli mahdollista.

Tulokset

- Testausympäristön soveltuvuus vaipparakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen tutkimukseen
- Lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja paine-eron säädettävyys ja pysyvyys.
- Suojakammion ja lisäkostutuksen tarpeellisuuden määrittäminen