

Puurankaisten koeseinärakenteiden laskennallinen analysointi

Petteri Huttunen, Ville Jokelainen ja Juha Vinha
Tampereen yliopisto, rakennustekniikka, rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa esitetään vertailuja lämpötilan ja suhteellisten kosteuden mittauksien ja mittauksia vastaavien numeeristen simulointitulosten välillä kahdesta koeseinärakenteesta Tampereen yliopiston Rakennusfysiikan tutkimusryhmän koerakennuksella. Artikkelin tarkoitus on tuoda esille nykyaikaisen rakennusfysikaalisen mallintamisen haasteita sekä tutkimustarpeita liittyen mallintamisen luotettavuuden ja tarkkuuden parantamiseksi. Koerakenteet rakennettiin alun perin vuonna 2018 BusinessFinlandin rahoittamaa kaksivuotista RapidU-hanketta varten, mutta varautuen pitempiin seurantamittauksiin, jotka jatkuvat edelleen ja joiden tuloksia hyödynnetään tällä hetkellä toisessa BF-hankkeessa nimeltä FutureSpaces. Tässä artikkelissa käsitellään tuuletusraollisia puurankaisia rakenteita, joiden lämmöneristyspaksuus vaihteli 150 mm ja 300 mm. Laskennallisten tulosten ja mittausten vertailu talven 2020–2021 osalta osoittaa, että pelkästään tuuletusraon olosuhteiden laskennallinen ennustaminen on haastavaa ilman mittauseräistä tietoa tuuletusraon ilmanvaihtuvuudesta. Sitä myötä myös muun rakenteen toiminnan arviointi laskennallisesti voi olla epäluotettavaa. Seinärakenteiden tuuletusrakojen fysikaalisen toiminnan tutkimukselle on selvästi lisätarvetta.

1. Johdanto

Rakennusfysikaaliseen tutkimukseen tarkoitettujen lämmön- ja kosteudensiirron numeeriset simulointityökalut ovat olleet merkittävässä asemassa 2000-luvun aikana sekä yhteiskunnallisesti vaikuttavissa suurissa tutkimushankkeissa (mm. [1]) että erilaisissa pienemmissä rakenneteknisissä kehitysprojekteissa. Ennen PC-tietokoneiden yleistymistä ja arkipäiväistymistä erilaisten rakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden arviointi on perustunut enimmäkseen aiempiin kokemuksiin erilaisista rakenteista tai esimerkiksi yksinkertaisiin käsinlaskuihin kondenssiriskin arvioimiseksi. Saatavilla olevien laskentaresurssien sekä fysikaalisessa simuloinnissa hyödynnettävien numeeristen menetelmien kehittyessä on rakennusfysiikan tutkimuksessa edistytty siten, että erilaisten rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä käyttäytymistä useiden vuosien aikaskaaloissa voidaan arvioida laskennallisesti varsin kohtuullisessa ajassa käyttäen laskennoissa eri alueilta ja eri vuosina mitattuja säädätoja. Laskentatuloksia voidaan visualisoida ja jälkikäsitellä eri tavoin esimerkiksi laskemalla laskennallisesti määritetyistä lämpötiloista ja suhteellisista kosteuksista kriittisissä rakenteiden kohdissa *Suomalaisen homemallin* mukainen homehtumisriskiä kuvaava homeindeksi, joka kuvaa kondenssitarkastelua tarkemmin rakenteen alttiutta vaurioitua kosteusperäisesti.

Tampereen yliopiston Rakennusfysiikan tutkimusryhmässä on pyritty yli 25 vuoden ajan kehittämään kokeellisiin mittauksiin perustuvia rakennusfysikaalisia tutkimusfasiliteetteja. Keskeinen työkalu kokeellisessa tutkimuksessa kahden vuosikymmenen ajan on ollut niin kutsuttu *rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto*, jota voi kuvata U-arvon kokeelliseen määrittämiseen perustuvan calibrated hot-box -menetelmän laajenuksena. Laitteistossa on 1,2 m x 1,2 m kokoinen aukko koerakennetta varten, jonka molemmille puolille voidaan säätää halutut olosuhteet, jotka tyypillisesti edustavat sisä- ja ulkoilman lämpö- ja kosteusolosuhteita (sadetta lukuun ottamatta). Laitteistoon asennettavan koerakenteen sisälle asennetaan tyypillisesti T/RH-antureita mielenkiintoisiin pisteisiin siten, kuin se materiaalien jäykkyyksien puolesta on

mahdollista ja toteutettavissa. Laitteistolla tehdyillä tutkimuksilla on pyritty selvittämään erilaisten rakenteiden kosteusteknistä toimintaa sinänsä, mutta myös tuottamaan dataa laskennallisten tarkastelujen validoimiseksi. Laskennan ja mittausten välisiä vertailuja on esitetty mm. lähteissä [2, 3], joista käy ilmi, että monilla rakenteilla nykyaikaisetkin laskentaohjelmat saattavat tuottaa tarkkuudeltaan epätyytyttäviä tuloksia, vaikka laskennassa käytetään huolellisesti mitattuja materiaaliominaisuuksia.



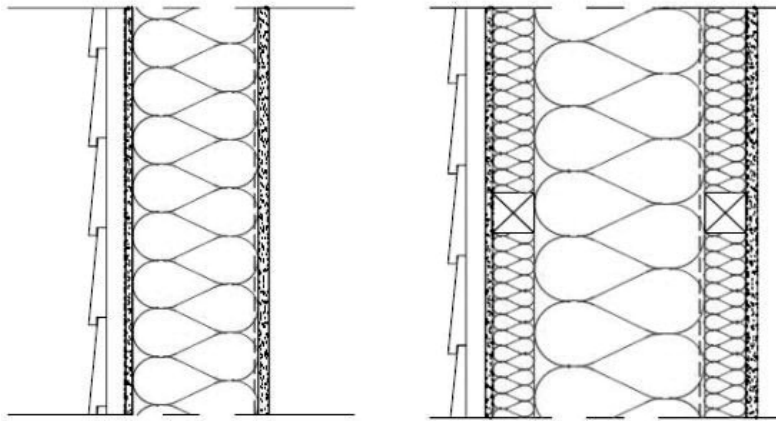
Kuva 1. Rakennusfysikaalinen koerakennus Tampereen Hervannassa. Pohjoisjulkisivu. Vasemmassa reunassa näkyvä masto on osa sääasemaa.

Näin ollen pitkäkestoisille kokeellisille rakennusfysikaalisille tutkimuksille on edelleen selvä tarve sekä rakenteiden tutkimusta varten sinänsä, mutta myös laskentamallien kehittämisen tueksi ja laskennallisesti ongelmallisten kohteiden tunnistamiseksi. Näitä tarkoituksia varten Rakennusfysiikan tutkimusryhmän käyttöön Hervantaan on valmistunut vuosina 2019-2020 kaksi rakennusfysikaalista koerakennusta. Suorakaiteen muotoiset rakennukset on sijoitettu siten, että toinen pitkä julkisivu on suunnattuna pohjoiseen ja toinen etelään. Molemmissa rakennuksissa pitkät julkisivut sisältävät 6 kpl 1,25 m x 2,3 m kokoisia tutkimusaukkoja koerakenteita varten. Rakennusten katot ovat rakennettu myös siten, että niihin voidaan asentaa tutkittavia yläpohjakoerakenteita. Koerakenteet altistuvat näin ulkopuoleltaan todelliselle säälle ja sisäpuolelta koerakennuksen sisäilmaolosuhteille, joita voidaan lämpötilan ja suhteellisen kosteuden osalta säätää halutun laisiksi. Rakennusten yhteydessä on Vaisalan toimittama sääasema ulkoilman olosuhteiden mittaamista varten sekä rakennusten seinillä sadekeräimiä ja auringonsäteilyä mittaavia pyranometrejä. Ensimmäinen tutkimusprojekti, jossa koerakennuksia alettiin käyttämään tutkimuksessa, oli BusinessFinlandin rahoittama suomalais-saksalainen hanke nimeltä Rapid U (2018-2020), jossa tutkittiin uuden tyyppistä nopeaa U-arvon in-situ-mittausmenetelmää. Hanketta on esitelty mm. lähteissä [4,5]. Hanketta varten rakennettiin yhteenä 10 koerakennetta, jotka koostuivat viidestä erilaisesta rakennetyypistä. Kaikkia rakennetyyppejä varten asennettiin yksi koerakenne pohjoisjulkisivulle ja yksi eteläjulkisivulle.

Rapid U -hankkeessa keskityttiin rakenteiden sisäpinnassa tehtäviin lämpövirran mittauksiin, mutta rakenteet anturoitiin hankkeen aikana myös mittaamaan lämpötiloja ja suhteellisia kosteuksia rakenteiden sisältä eri kohtaa lämmöneristyskerroksia sekä tuuletusrakojia. Hankkeen päätyttyä rakenteet jätettiin koerakennukseen ja jatkuvatoimisia mittauksia jatkettiin. Vuonna 2020 aloitetussa myös BusinessFinlandin rahoittamassa FutureSpaces-hankkeessa [6] aloitettiin koerakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen mittausdatan hyödyntäminen osana laskennallisia tarkasteluja, joilla hankkeessa pyritään tutkimaan kosteusturvallisia tapoja korjata tyypillisiä vanhoja rakenteita sekä selvittämään millaiset rakenteet ovat herkkiä vaurioitumaan.

2. Tutkitut rakenteet

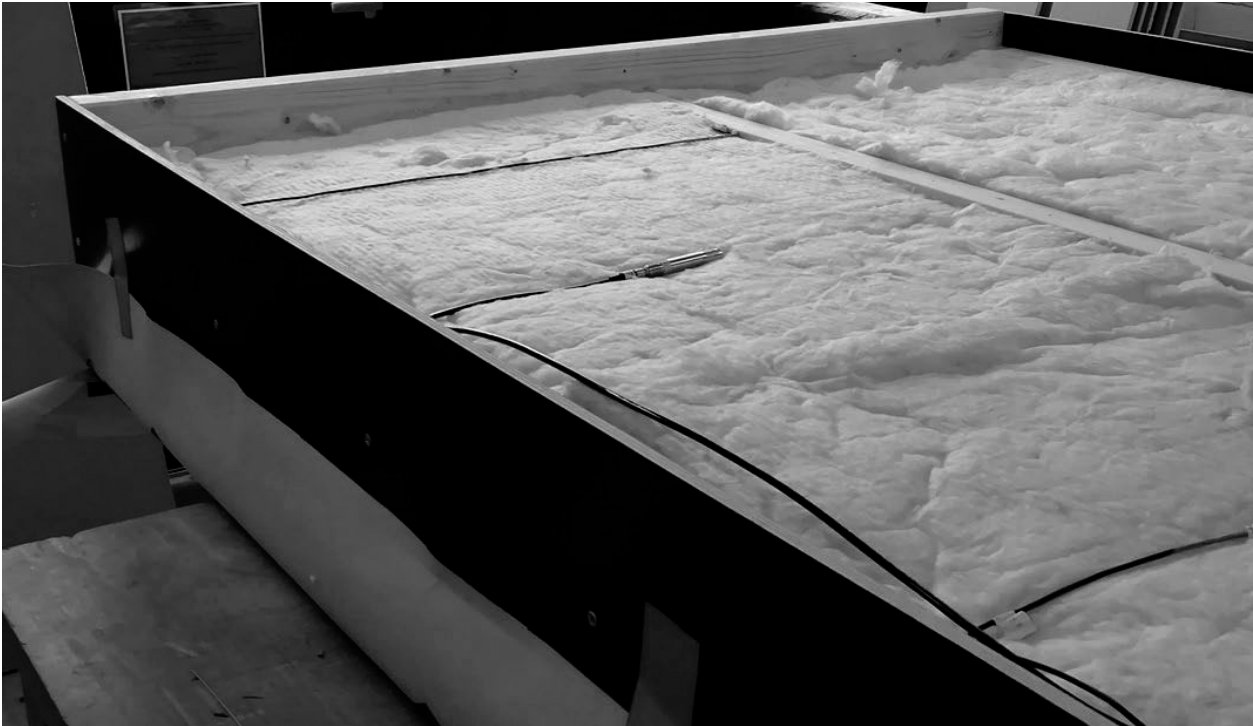
Tässä artikkelissa esitetään laskenta- ja mittaustuloksia kahdesta koeseinärakenteesta. Kyseisten rakenteiden rakennetyypit on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Tutkitut rakennetyypit, joista tässä artikkelissa esitetään tuloksia.

Rakenne 1:en materiaalikerrokset ulkoa sisään päin lueteltuna ovat: puuverhous (20 mm), tuuletusväli (30 mm), tuulensuojakipsilevy (9 mm), eristekerros ja runkotolpat (150 mm), höyrynsulkumuovi, kipsilevy (13 mm). Laskennallinen U-arvo rakenteella 1 on $0,265 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Rakenne 2:n materiaalikerrokset ulkoa sisään päin lueteltuna ovat: puuverhous (20 mm), tuuletusväli (30 mm), tuulensuojakipsilevy (9 mm), eristekerros ja vaakakoolaukset (50 mm), eristekerros ja runkotolpat (200 mm), eristekerros ja vaakakoolaus (50 mm), höyrynsulkumuovi, kipsilevy (13 mm). Laskennallinen U-arvo rakenteella 2 on $0,139 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Rakenteet ovat koerakennuksen pohjoisseinällä.

Mittausten aikaan koerakennuksen sisällä pyrittiin pitämään mahdollisimman tasaiset olosuhteet ($21 \text{ }^\circ\text{C}$, 50 \% RH). Simuloinneissa käytettiin pääasiassa lähteessä [1] taulukoituja geneerisiä lämpö- ja kosteusteknisiä materiaaliominaisuuksia. Vertailulaskennat suoritettiin Delphin 5.9.6 -laskentaohjelmalla. Esitettävät mittaukset ja niitä vastaavat laskentatulokset ovat ajalta 20.9.2020 –19.2.2021.

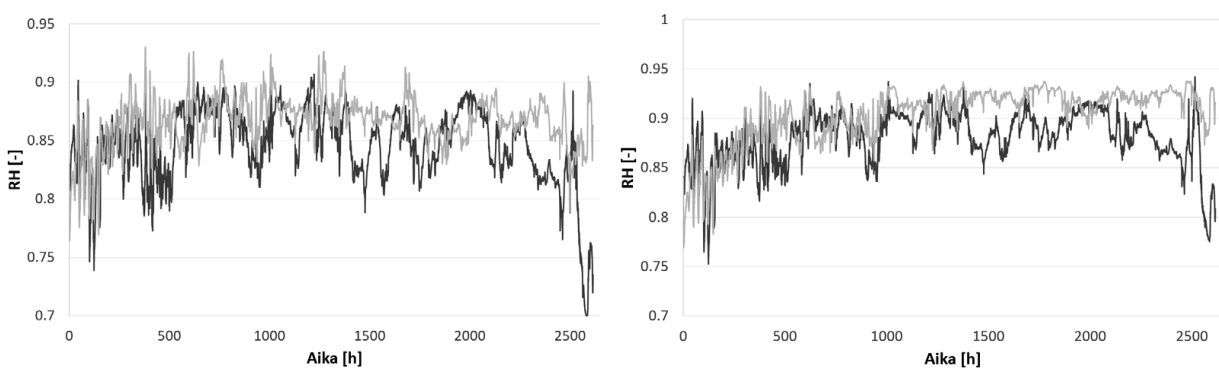


Kuva 3. Koerakenne valmistusvaiheessa. Eristekerroksen päällä näkyvissä mittausantureita johtoineen.

Kuvassa 3 on esitetty valokuva yhdestä koerakenteesta valmistusvaiheessa.

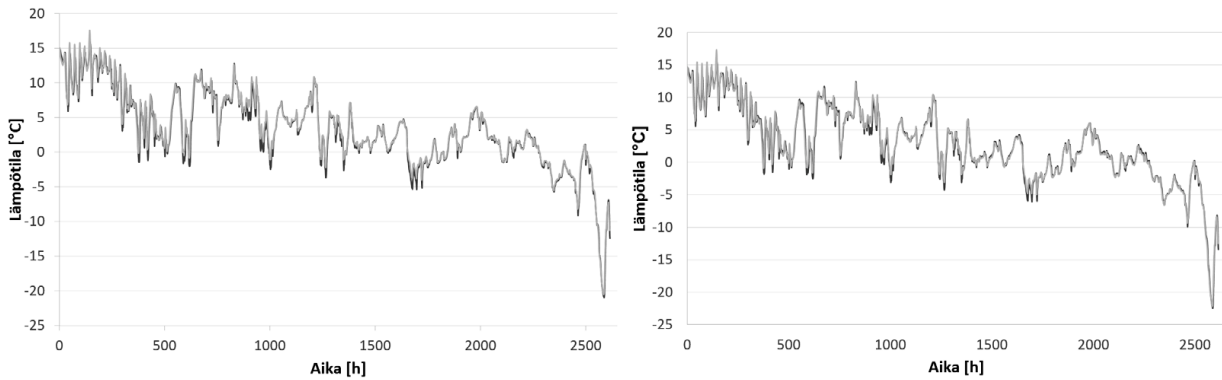
3. Laskentatulosten ja mittausten vertailu

Kuvassa 4 on esitetty mittaustulokset ja vertailulaskelmien mukaiset tulokset suhteellisesta kosteudesta rakenteiden 1 ja 2 tuuletusväleistä. Laskennassa tuuletusrakojen ilmanvaihtuvuus arvioitiin lämpötila- ja tuulimittauksista, joiden avulla voitiin soveltaa lähteessä [7] esitettyjä kaavoja ilmanvaihtuvuuden laskemiseksi. Laskennallisesti arvioitu keskimääräinen ilmanvaihtuvuus mittausjakson aikana rakenteessa 1 oli 5,1 1/h ja 4,5 1/h rakenteessa 2.



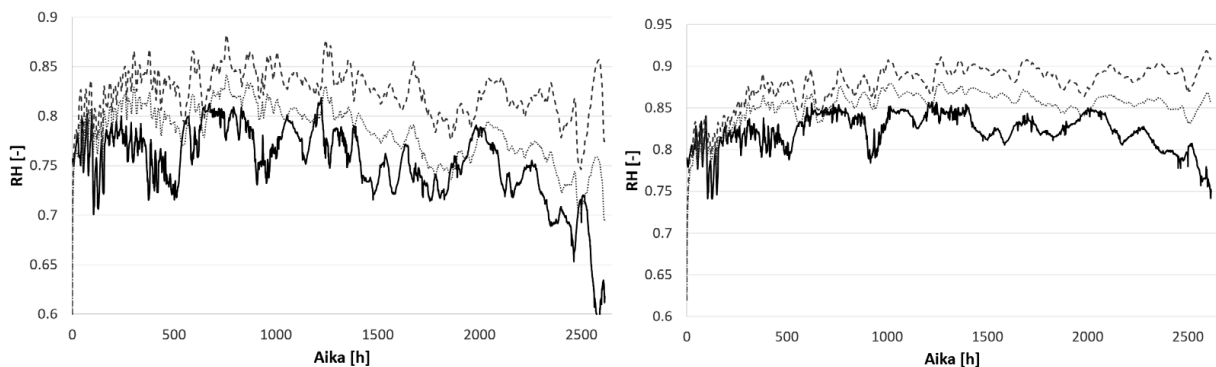
Kuva 4. Suhteellinen kosteus rakenteen 1 (vasemmalla) ja 2 (oikealla) tuuletusraossa. Tumma viiva = mittaus, vaalea = laskennallinen.

Kuvasta 4 nähdään, että suhteellisen kosteuden osalta vastaavuus laskennan ja mittausten välillä ei ole erityisen hyvä tuuletusraossa. Laskenta tuottaa keskimäärin korkeampia arvoja suhteelliselle kosteudelle. Kuvassa 5 on esitetty lämpötilojen osalta vastaavat käyrät. Kuvasta nähdään, että lämpötilojen osalta vastaavuus on erittäin hyvä. Ainoastaan jyrkkinä muutoshetkinä eroa on havaittavissa.

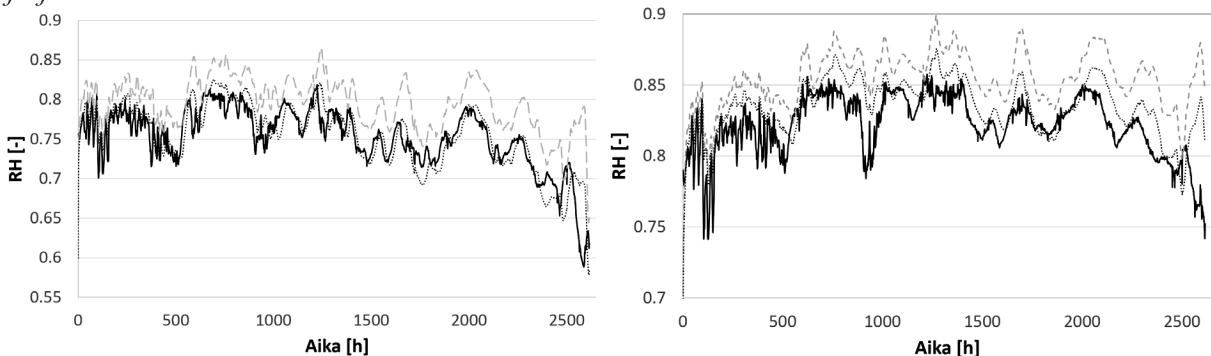


Kuva 5. Lämpötila rakenteen 1 (vasemmalla) ja 2 (oikealla) tuuletusraossa. Tumma viiva = mittaus, vaalea = laskennallinen.

Kuvissa 6 ja 7 on esitetty suhteellisen kosteuden kuvaajia tuulensuojakipsilevyn takaa, joka on kiinnostava piste siksi, että se on tyypillisesti olosuhteiltaan kriittinen. Ilman lämmöneristävää tuulensuojalevyä olosuhteet tässä rajapinnassa voivat olla kylmiä ja kosteita ja mahdollistaa homeen kasvun puurungon ulkopintaan. Koska mittausanturi ei ole pistemäinen, vaan n. 1 cm paksuinen kappale, vertailua varten on tyypillisesti otettu laskentatuloksista mittauksia vastaavat arvot 7 mm etäisyydeltä kyseisestä rajapinnasta.



Kuva 6. Suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn ja eristeen rajapinnan lähellä (rakenne 1 vasemmalla ja rakenne 2 oikealla). Tumma viiva = mittaus, vaalea = laskennallinen 14 mm rajapinnasta, katkoviiva = laskennallinen 7 mm rajapinnasta. Laskennassa mukana tuuletusrako ja julkisivulaudoitus.



Kuva 7. Suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn ja eristeen rajapinnan lähellä (rakenne 1 vasemmalla ja rakenne 2 oikealla). Tumma viiva = mittaus, vaalea = laskennallinen 14 mm rajapinnasta, katkoviiva = laskennallinen 7 mm rajapinnasta. Laskentamalli rajoittui tuulensuojalevyyn.

Tuulensuojalevyn ja eristeen välistä rajapintaa tarkasteltaessa mittauksia verrattiin myös laskennallisiin arvoihin 14 mm etäisyydellä rajapinnasta, jossa suhteellisten kosteuksien

vastaavuus mittauksiin on parempi, mutta on toisaalta kyseenalaista verrata arvoja näin kaukaa rajapinnasta, josta mittaustieto on pyritty saamaan. Paras vastaavuus mittausten ja laskennan välille odotetusti siten, että mallin geometriasta jätettiin tuuletusrako ja julkisivulaudoitus kokonaan pois ja mallin reunaehtoina käytettiin tuuletusraosta mitattuja arvoja (ks. kuva 7).

Sekä laskenta- että mittaustulokset vahvistavat käsitystä, jonka mukaan paksu lämmöneristys kerros ja matala U-arvo johtaa korkeisiin suhteellisen kosteuden arvoihin rakenteen ulko-osissa. Yleisesti ottaen laskenta tuottaa kyseisillä rakenteilla korkeampia suhteellisen kosteuden arvoja rakenteeseen kuin mittaukset, mikä voidaan tulkita siten, että laskennalliset tulokset ovat ns. varmalla puolella mitoitusmielessä. Vastaavuutta olisi kuitenkin tärkeää saada paremmaksi, jotta laskentaohjelmien käyttö ei johda ylikriittisiin arviointeihin eri rakenteista. FutureSpaces-hankkeessa tullaan jatkamaan Tampereen yliopiston koerakennuksella tehtävien mittausten analysointia ja laskentatyökalujen validointityötä mittausten avulla.

Lähdeluettelo

- [1] Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J. Köliö, A. Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A. ja Suonketo, J. (2013) Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tutkimusraportti 159. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka.
- [2] Kalamees, T. and Vinha, J. (2003) Hygrothermal calculations and laboratory tests on timber-framed wall structures. *Building and Environment* 38 (2003). 689-697.
- [3] Laukkarinen, A. and Vinha, J. (2011) Comparison of calculated and measured values of wall assembly tests using Delphin 5. 9th Nordic Symposium on Building Physics – NSB 2011.
- [4] Paronen, M., Hatsala, A. ja Schmitt, A. (2019) U-arvon mittausten markkinalähtöiset sovellutukset. Rakennusfysiikka 2019. Uusimmat tutkimustulokset ja käytännönratkaisut. 28.-30.10.2019, Tampere. Tampereen yliopisto. Rakennustekniikka. Rakennusfysiikka. Seminaarijulkaisu 6.
- [5] Hatsala, A., Paronen, M. ja Vihro, T. (2019) Rapid U -projektin tulokset Raksysteemin suorittamista kenttä U-arvomittauksista lämmityskaudella 2018-2019. Rakennusfysiikka 2019. Uusimmat tutkimustulokset ja käytännönratkaisut. 28.-30.10.2019, Tampere. Tampereen yliopisto. Rakennustekniikka. Rakennusfysiikka. Seminaarijulkaisu 6.
- [6] Internet-lähde: <https://www.futurespace.fi/> (Viitattu 4.10.2021)
- [7] Falk, J. and Sandin, K. (2013) Ventilated rainscreen cladding: Measurements of cavity air velocities, estimation of air change rates and evaluation of driving forces. *Building and Environment*, Vol. 59, pp. 164-176.