

1.10.2020

Korjaus artikkeliin:

Jokela, T, Laukkarinen, A & Vinha, J 2019, Ilmakehän pitkäaaltoinen säteily rakennusfysikaalisissa laskentatarkasteluissa. in J Vinha & T Raunima (eds), Rakennusfysiikka 2019: Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut. 28.-30.10.2019, Tampere. vol. Seminaarijulkaisu 6, Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Tampere, pp. 55-60, Tampere, Finland, 28/10/19.

Alkuperäisen version kaavasta (3) puuttuivat pintojen pitkäaaltoisen säteilyn absorptiokertoimet $\alpha_{lw,surf}$, jotka on nyt lisätty selitteineen mukaan tekstiin. Lisäksi on korjattu yksi kirjoitusvirhe (ilmekehä -> ilmakehä) ja lisätty maininta Kirchhoffin lain käyttämisestä.

Virhe kohdistui ainoastaan artikkelin tekstiin, ei sen taustalla oleviin laskelmiin.

Muutokset on korjattu myös alla olevaan julkaisuun.

Alkuperäinen versio:

$$q_{lw,net} = F_{surf,gr}LW_{gr} + F_{surf,sky}LW_{sky} - \epsilon_{surf}\sigma T_{surf}^4 \quad (3)$$

missä

Esimerkiksi täysin tasaisella maalla olevalle, esteettömälle seinäpinnalle $F_{surf,gr} = F_{surf,sky} = 0,5$ ja vain ilmekehää näkevälle katolle $F_{surf,sky} = 1$.

Korjattu versio:

$$q_{lw,net} = \alpha_{lw,surf}F_{surf,gr}LW_{gr} + \alpha_{lw,surf}F_{surf,sky}LW_{sky} - \epsilon_{surf}\sigma T_{surf}^4 \quad (3)$$

missä

$\alpha_{lw,surf}$ on tarkasteltavan pinnan absorptiokerroin tulevalle pitkäaaltoiselle säteilylle, -

Esimerkiksi täysin tasaisella maalla olevalle, esteettömälle seinäpinnalle $F_{surf,gr} = F_{surf,sky} = 0,5$ ja vain ilmekehää näkevälle katolle $F_{surf,sky} = 1$. Kirchhoffin lain perusteella kaavassa (3) voidaan asettaa: $\alpha_{lw,surf} = \epsilon_{surf}$.

Ilmakehän pitkäaaltoinen säteily rakennusfysikaalisissa laskentatarkasteluissa

Teemu Jokela, Anssi Laukkarinen ja Juha Vinha
Tampereen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta, rakennustekniikka, rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa esitellään menetelmä pitkäaaltoisen säteilyn huomioon ottamiseksi rakennusfysikaalisissa laskentatarkasteluissa. Lisäksi esitellään otteita viimeaikaisista tutkimuksista, joissa on vertailtu kirjallisuudessa esitettyjen pitkäaaltoisen säteilyn laskentamallien valinnan vaikutuksia eri rakennusfysikaalisiin ilmiöihin.

1. Johdanto

Rakennusfysiikan sovellutuksissa lämmön katsotaan siirtyvän kolmella tavalla: Johtumalla, konvektiolla ja säteilemällä. Säteily yleisesti ottaen jaetaan useisiin eri aallonpituusalueisiin, mutta rakennusfysiikassa jako tehdään tyypillisesti vain kahteen, eli lyhyt- ja pitkäaaltoiseen säteilyyn. [1]

Rakennusfysikaalisissa ajasta riippuvissa laskentatarkasteluissa on pitkään käytetty ulkoilman olosuhteiden lähtötiedoissa tunnittaista dataa lyhytaaltoisesta säteilystä, joka on ollut esimerkiksi Suomessa saatavilla Ilmatieteen laitoksen mittaamana. Rakennuksen ulkopinnoille saapuvaa pitkäaaltoista säteilyä ei sen sijaan useinkaan ole ollut laskentatarkasteluissa mukana pitkäaaltoisen säteilyn kattavan mittausdatan puuttumisen vuoksi. Pitkäaaltoista säteilyä ei esimerkiksi ole ollut mukana rakennusfysikaalisten testivuosien valinnassa tai valittujen testivuosien osana [2, 3]. Tässä artikkelissa esitetään kirjallisuudessa esitettyihin laskennallisiin menetelmiin perustuva kokonaisuus pitkäaaltoisen säteilyn huomioon ottamiseksi rakennusfysikaalisten simulointien osana. Tarkempi kuvaus tästä aiheesta on esitetty kipsilevytuulensuojallisten puurankarakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa käsittelevässä diplomityössä [4], jossa vertailtiin eri pitkäaaltoisen säteilyn malleja niistä saatavien ilmakehää kuvaavien olosuhteiden sekä rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan kohdistuvien vaikutusten näkökulmasta. Diplomityö sai rahoitusta Knauf Oy:ltä.

2. Rakennuksen pintaan kohdistuvan pitkäaaltoisen säteilyn laskenta

2.1 Peruseriaatteet

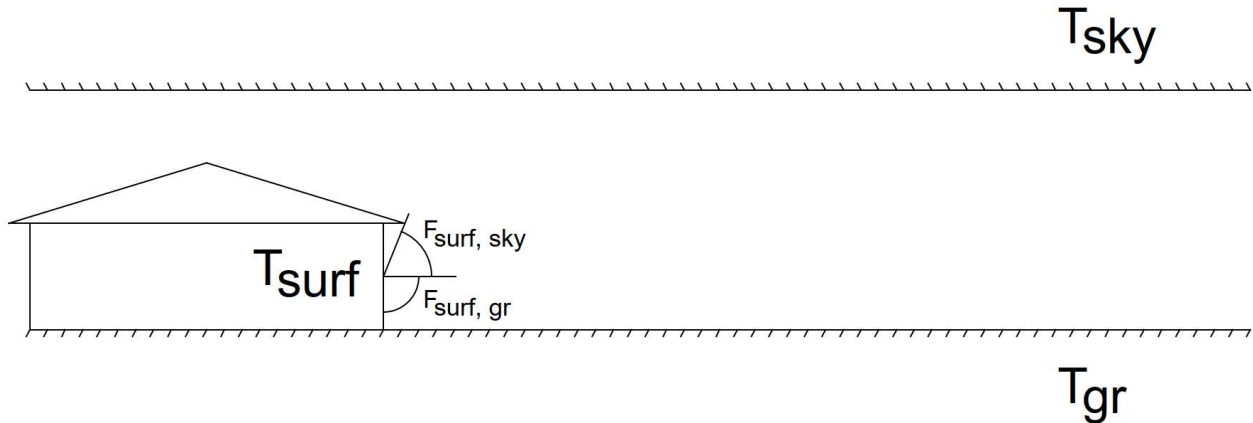
Tässä esitetyn menettelyn lähtökohtana on, että kaikki pinnat - ilmakehä mukaan lukien - oletetaan niin kutsutuiksi harmaiksi pinnoiksi, joiden säteilyintensiteetti ja muut ominaisuudet pysyvät suuntakulman suhteen vakioina. Tällöin pinnan lähettämä säteilyteho lasketaan kaavan (1) mukaisesti.

$$LW = \varepsilon\sigma T^4 \quad (1)$$

missä

- LW on pinnasta lähtevä lämpövirran tiheys, W/m^2
 ε on pinnan emissiviteetti, $0 \dots 1$
 σ on Stefan-Boltzmannin vakio, $5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2K^4)$
 T on pinnan lämpötila, K .

Seuraavassa kuvassa on esitetty rakennuksen ulkoseinän tai ikkunan kannalta keskeiset pitkäaaltoisen säteilyn pinnat, niiden teholliset lämpötilat ja niihin liittyvät näkyvyyskertoimet.



Kuva 1. Pitkäaaltoisen säteilyn laskentaa varten tehty oletus vallitsevasta geometrisestä tilanteesta sekä laskentaan liittyvät lämpötilat ja näkyvyyskertoimet tarkasteltavasta pinnasta taivaalle ja maahan.

Pitkäaaltoisen säteilyn komponentit määritetään kirjoittamalla tarkasteltavan pinnan lämpövirtojen taseyhtälö (kaava 2), jonka jälkeen yksittäisten lämpövirtojen lausekkeet voidaan kirjoittaa auki. Sieventämisen jälkeen rakennuksen ulkopintaan vaikuttava nettomääräinen pitkäaaltoisen säteilyn lämpövirran tiheys on esitetty kaavassa (3).

$$q_{lw,net} = q_{gr,surf} + q_{sky,surf} - q_{surf} \quad (2)$$

$$q_{lw,net} = \alpha_{lw,surf} F_{surf,gr} LW_{gr} + \alpha_{lw,surf} F_{surf,sky} LW_{sky} - \varepsilon_{surf} \sigma T_{surf}^4 \quad (3)$$

missä

- $q_{lw,net}$ on tarkasteltavan pinnan lämpötilaan vaikuttava pitkäaaltoisen säteilyn nettoaikutus (pintaan tuleva lämpövirta positiivisena), W/m^2
 $\alpha_{lw,surf}$ on tarkasteltavan pinnan absorptiokerroin tulevalle pitkäaaltoiselle säteilylle, -
 $q_{gr,surf}$ on maasta tarkasteltavaan pintaan kohdistuva säteilyteho, W/m^2
 $q_{sky,surf}$ on ilmakehästä tarkasteltavaan pintaan kohdistuva säteilyteho, W/m^2
 q_{surf} on tarkasteltavasta pinnasta lähtevä säteilyteho, W/m^2
 $F_{surf,gr}$ on näkyvyyskerroin tarkasteltavasta pinnasta maahan, $0 \dots 1$
 $F_{surf,sky}$ on näkyvyyskerroin tarkasteltavasta pinnasta ilmakehään, $0 \dots 1$.

Näkyvyyskertoimet pintojen välillä saadaan laskettua säteilyn lämmönsiirtoa käsittelevissä oppikirjoissa esitettyjen lausekkeiden avulla. Esimerkiksi täysin tasaisella maalla olevalle, esteettömälle seinäpinnalle $F_{surf,gr} = F_{surf,sky} = 0,5$ ja vain ilmakehää näkeväälle katolle $F_{surf,sky} = 1$. Kirchhoffin lain perusteella kaavassa (3) voidaan asettaa: $\alpha_{lw,surf} = \varepsilon_{surf}$.

Tässä artikkelissa tarkastellaan vain ilmakehän pitkäaaltoista säteilyä. Jos laskennassa ei ole mukana maasta pintaan tulevaa pitkäaaltoista säteilyä, tulee tällöin kaavoista (2) ja (3) jättää pois

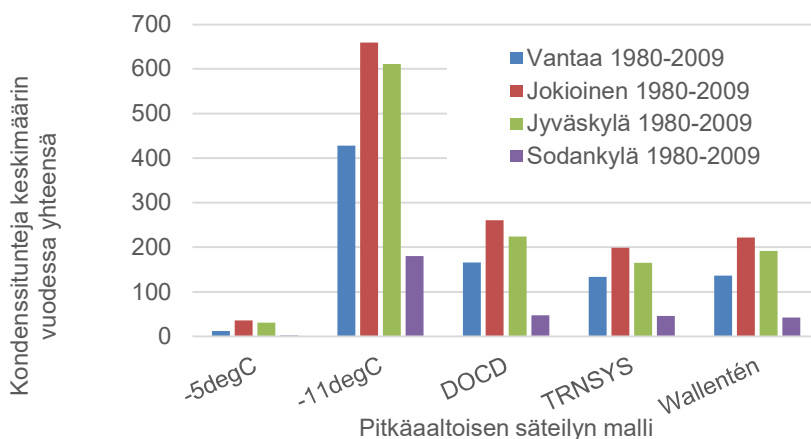
myös pinnasta maahan lähtevän säteilyn osuus. Tämä onnistuu jakamalla pinnasta lähtevä lämpösäteily kahteen osaan ($F_{surf,gr} + F_{surf,sky} = 1$) ja asettamalla pinnan ja maan väliset säteilykomponentit molemmat nolliksi.

2.2 Ilmakehästä alaspäin suuntautuva pitkäaaltoinen säteily

Ilmakehästä alaspäin suuntautuvan säteilyn laskemiseksi kirjallisuudessa on esitetty useita kokeellisiin tuloksiin perustuvia malleja, jotka jakautuvat kahteen pääasialliseen ryhmään, eli tehollisen emissiviteetin tai tehollisen lämpötilan malleihin. Tehollisen emissiviteetin malleissa taivaan lämpötilaksi asetetaan kahden metrin korkeudelta maan pinnasta mitattu ilman lämpötila ja ilmakehästä peräisin oleva pitkäaaltoinen säteily lasketaan käyttämällä saatavilla olevista havaintosuureista laskettua tehollista emissiviteettiä. Tehollisen lämpötilan malleissa emissiviteetti oletetaan tunnetuksi ja eri muuttujien vaikutukset otetaan huomioon tehollista lämpötilaa kuvaavissa lausekkeissa.

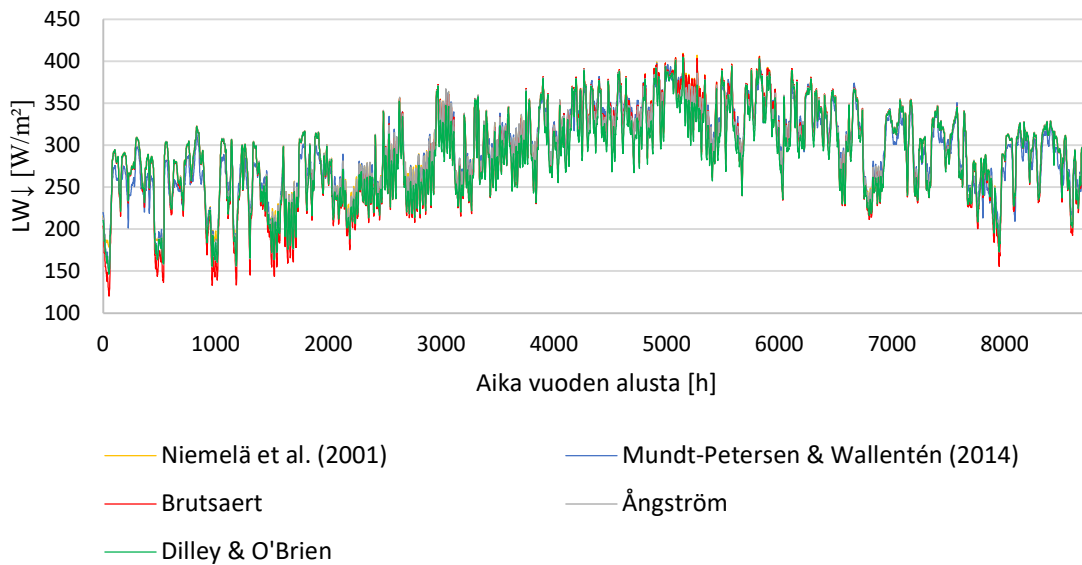
Ilmakehästä alaspäin suuntautuvan pitkäaaltoisen säteilyn kokeellisista malleista huomattavan suuri osa tarkastelee erikseen kirkkaan (clear sky) ja pilvisen (cloudy) taivaan tilanteita. Tyypillisesti lasketaan ensin arvio kirkkaan taivaan olosuhteista, jonka jälkeen niitä korjataan pilvisyyttä kuvaavilla korjauskertoimilla.

Ikkunoiden ulkopinnan kondenssia tarkastelevassa tutkimuksessa [5] kirjallisuudessa esitetyt vakiosuuriset lämpötilaerot -5 °C ja -11 °C maanpintaa lähellä olevan ilman lämpötilan ja taivaan tehollisen lämpötilan välillä tuottivat tarkempiin malleihin verrattuna selvästi pienemmät ja suuremmat ikkunan ulkopinnan kondenssintuntien määrät (kuva 2). Näiden tarkastelujen perusteella on suositeltavaa käyttää ennemmin kirjallisuudessa esitettyjä kokeellisia malleja (kuin vakiosuurista lämpötilaeroa), koska ne pystyvät ottamaan myös havaintosuureissa esiintyvää keskinäistä dynamiikkaa huomioon. Kolme kyseisessä tutkimuksessa testattua pitkäaaltoisen säteilyn kokeellista mallia antoivat verrattain samankaltaisia tuloksia ikkunoiden ulkopinnan kondenssin näkökulmasta arvioituna.



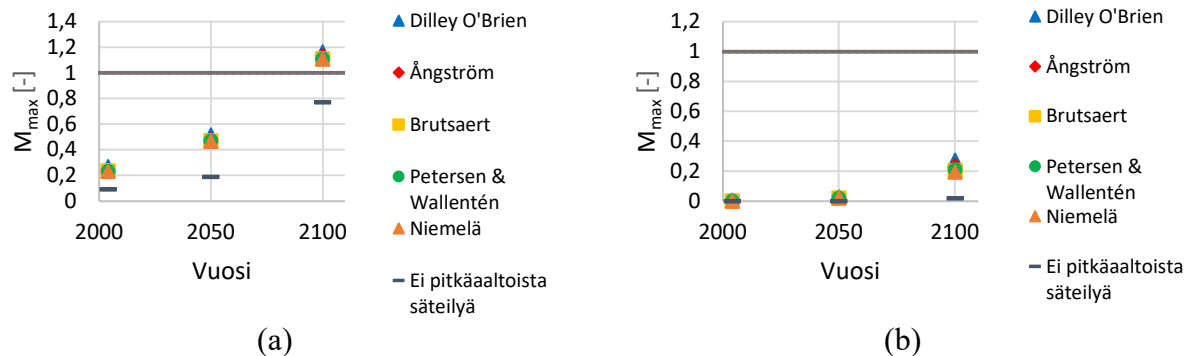
Kuva 2. Ilmakehän pitkäaaltoisen säteilyn eri mallien valinnan vaikutus ikkunan ulkopinnan kondenssintunteihin [5].

Seuraavassa kuvassa on esitetty viiden eri pitkäaaltoisen säteilyn mallin antamat tulokset. Tulokset perustuvat diplomityössä [4] tehtyyn vertailulaskentaan.



Kuva 3. Ilmakehästä alaspäin suuntautuva pitkäaaltoinen säteily viidellä eri kokeellisella mallilla laskettuna [4].

Kuvan perusteella testattujen mallien tulokset olivat melko samankaltaisia keskenään. Seuraavassa kuvassa on esitetty puurankaseinän kipsilevytuulensuojan sisäpinnalle lasketut homeindeksin maksimi-arvot, käytettäessä eri ilmakehän pitkäaaltoisen säteilyn laskentamalleja.



Kuva 4. Pitkäaaltoisen säteilyn eri mallien vaikutus tuulensuojalevyn sisäpinnan (a) ja runkotolpan ulkonurkan (b) homeindeksiin puurankaseinässä [4].

Myös homeindeksin maksimi-arvon näkökulmasta katsottuna eri mallien antamat tulokset olivat keskenään hyvin samankaltaisia. Tulosten luotettavuuden kannalta tämä on hyvä asia, koska se pienentää sopivimman mallin valitsemiseen liittyvää virhettä. Kuvaajista on hyvä huomata, että ilman pitkäaaltoista säteilyä lasketut tapaukset antoivat muita tapauksia matalampia arvoja. Pitkäaaltoisen säteilyn puuttuminen laskennasta antaa siis rakenteiden toimivuuden kannalta epävarmalla puolella olevia tuloksia.

Diplomityön osana tehtyjen vertailujen perusteella päädyttiin rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan laskentatarkasteluissa käyttämään kirkaalle taivaalle niin kutsuttua Brutsaertin mallia [6], johon tehtiin pilvisuuskorjaus lähteen [7] mukaisesti. Pitkäaaltoisen säteilyn laskentaa on käyty läpi esimerkiksi lähteissä [4,6,7,8,9,10]. Seuraavaksi esitetään pitkäaaltoisen säteilyn kaava (4) [10], jolla voidaan arvioida ilmakehästä alaspäin suuntautuvaa

pitkääaltoisen säteilyn määrää. Kyseistä kaavaa (4) ei käytetty diplomityön lopullisissa laskentatarkasteluissa mutta tuotti mallien vertailussa hyvin samankaltaiset tulokset diplomityössä käytettyyn malliin nähden ja on siinä käytettyä menetelmää yksinkertaisempi.

$$\varepsilon_{sky} = 1,5357 + 0,5981 \left(\frac{T_d}{100} \right) - 0,5687 \left(\frac{T_a}{273,15} \right) - 0,2799 K_t \quad (4)$$

missä

- T_d on kastepistelämpötila, °C
 T_a on maanpinnasta kahden metrin korkeudelta mitattu ilman lämpötila, K.
 K_t on ilmakehän kirkkautta kuvaava selkeysindeksi (clearness index), ≥ 0

Selkeysindeksi K_t määritellään vaakapinnalta mitatun globaalien säteilyn sekä samalle vaakapinnalle tulevan suurimman auringon säteilytehon osamääränä, kun jälkimmäisessä ei oteta huomioon ilmakehän vaikutusta.

$$K_t = \frac{I_{glob}}{I_0} \quad (5)$$

$$I_0 = r I_{sc} \cdot (\cos L \cos \delta \cos \omega + \sin L \sin \delta) \quad (6)$$

$$r = 1,00011 + 0,034221 \cos \Gamma + 0,00128 \sin \Gamma + 0,000719 \cos 2\Gamma + 0,000077 \sin 2\Gamma \quad (7)$$

$$\omega = 15 \cdot (AST - 12) \quad (8)$$

$$AST = CL + \frac{(LON-30)}{15} + \frac{ET}{60} \quad (9)$$

$$ET = 2,292 \cdot (0,0075 + 0,1868 \cos \Gamma - 3,2077 \sin \Gamma - 1,4615 \cos 2\Gamma - 4,089 \sin 2\Gamma) \quad (10)$$

missä

- I_{glob} on vaakapinnalta mitattu globaali säteily, W/m^2
 I_0 on auringon säteilyteho vaakapinnalle, kun ilmakehää ei ole, W/m^2
 r on Maan kiertoradan eksentrisyyden huomioon ottava kerroin, -
 L on paikkakunnan leveyspiiri, °
 δ on auringon deklinaatiokulma, $\delta = 23,45^\circ \cdot \sin \left(2\pi \cdot \frac{t-1944}{8760} \right)$, °
 ω on auringon tuntikulma, °
 AST on aurinkoaika (apparent solar time), h
 CL on kellonaika, h
 LON on mittauspaikkakunnan pituuspiiri, °
 ET on ajantasaus (equation of time), min
 I_{sc} on aurinkovakio, $1367 W/m^2$
 t on laskennan aika-askel vuoden alusta, $0 \dots 8759$ h
 Γ on päiväkulma, $\Gamma = 2\pi \cdot t/8760$, rad

Selkeysindeksin yöaikaiset arvot määritettiin laskemalla aamu- ja iltapäivien keskiarvot ja tämän jälkeen interpoloimalla tunnittaiset arvot näistä. Yksittäisinä ajanhetkinä voi trigonometrinen funktioiden käytöstä seurata hyvin suuria arvoja termille K_t , joten nämä tilanteet tulee erikseen tunnistaa laskelmissa ja korjata oikeaan suuruusluokkaan kuuluviksi, käyttämällä esimerkiksi sopivia katkaisurajoja kaavan (7) osoittajalle ja nimittäjälle.

3. Yhteenveto

Pitkääaltainen säteily on yksi tärkeä rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen käyttäytymiseen vaikuttavista fysikaalisista ilmiöistä, mutta siihen liittyviä lähtötietoja ei rakennusfysikaalisissa laskentatarkasteluissa ole aina käytetty. Tämän artikkelin tavoitteena on lisätä rakennusfysikaalisia laskelmia tekevien ihmisten tietoutta pitkääaltoisesta säteilystä ja helpottaa kyseisen suureen mukaan ottamista laskentamalleihin.

Esitettyihin menetelmiin perustuen on määritetty ilmakehästä alaspäin suuntautuvan pitkääaltoisen säteilyn tunnitaiset arvot nykyisen ja tulevaisuuden ilmaston rakennusfysikaalisille testivuosille ja nämä datat ovat vapaasti saatavilla Tampereen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmän kotisivuilta.

Lähdeluettelo

- [1] Hagendoft, C.-E. (2001) Introduction to building physics. Studentlitteratur, Lund, Sweden. 422 p.
- [2] 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 & Suonketo, J 2013, Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka., no. 159, Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos, Tampere.
- [3] Ilmatieteen laitos, rakennusfysikaaliset testivuodet. Saatavissa: <https://ilmatieteenlaitos.fi/rakennusfysiikan-ilmastolliset-testivuodet>, viitattu 23.9.2019.
- [4] Teemu Jokela (2018) Kipsilevytuulensuojallisten puurunkoisten ulkoseinien rakennusfysikaalinen toiminta. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma, rakennesuunnittelu. 113 s. + 29 liites. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201811262762>
- [5] Laukkarinen, A., Kero, P. & Vinha, J. (2018) Condensation at the exterior surface of windows. Journal of Building Engineering, vol. 19, pp. 592-601. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.06.014>
- [6] Venäläinen, A., Solantie, R. & Laine, V. (1998). Mean long-term surface energy balance components in Finland during the summertime, Boreal Environment Research 3, Vol 3, pp. 171-180.
- [7] Niemelä, S., Räisänen, P. & Savijärvi, H. (2001). Comparison of surface radiative flux parameterizations: Part I: Longwave radiation, Atmospheric Research, Vol. 58(1), pp. 1-18.
- [8] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2009). 2009 ASHRAE handbook: Fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers.
- [9] Flerchinger, G.N., Xaio, W., Marks, D., Sauer, T.J. & Yu, Q. (2009). Comparison of algorithms for incoming atmospheric long-wave radiation, Water Resources Research, Vol. 45, W03423, 13 p.
- [10] Mundt-Petersen, S. & Wallentén, P. (2014). Methods for compensate lack of climate boundary data, Proceedings XIII DBMC – XIII International Conference on Durability of Building Materials and Components, pp. 632-639.