

Puurunkoisten tuuletettujen yläpohjien kosteustekninen toiminta

Hannanoora Junttila, Anssi Laukkarinen ja Juha Vinha
Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos

Tiivistelmä

Tämä artikkeli esittelee Tampereen teknillisessä yliopistossa keväällä 2015 valmistuneen pientalojen puurakenteisten tuulettuvien yläpohjien lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa käsittelevän diplomityön [1] tuloksia. Diplomityö on osa Honkarakenne Oyj:n hirsitalojen tutkimus- ja kehitysprojektia. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää puurunkoisten tuuletettujen yläpohjien kosteusteknistä toimintaa laskennallisesti tietokonemallinnuksen avulla. Tavoitteena oli tarvittaessa tehdä rakenteisiin niiden rakennusfysikaalista toimintaa parantavia muutoksia. Tutkimuksessa tarkasteltiin ideaalisesti toimivien rakenteiden lisäksi tilanteita, joissa rakenteisiin kohdistui ylimääräistä kosteuskuormitusta sade- ja ilmapuotojen seurauksena.

1. Johdanto

Tuulettuva yläpohja on rakenne, jonka kosteustekniseen toimintaan vaikuttavat monimutkaisena kokonaisuutena mm. vesikatteen vesitiiveys, rakenteen sisäpinnan vesihöyrytiiveys, lämmöneristekerroksen ja rakenteen ulko-osan lämmönvastus, materiaalien kosteudensitomiskyky sekä tuuletuksen määrä. Nykyisin kosteusteknisiä ongelmia yläpohjissa aiheuttavat yleisimmin erilaiset vesikatteen vuodot, riittämätön tuuletus ja eri syistä johtuva vesihöyryn kondensoituminen rakenteen sisään. Uusimpana haasteena ovat nykyisten energiatehokkuusvaatimusten edellyttämät jopa yli 500 mm paksuiset lämmöneristekerrokset, jotka aiheuttavat ongelmia rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta. Tehokkaiden lämmöneristekerrosten ulkopuolella rakenteet ovat väistämättä entistä viileämpiä ja kosteampia ja siten alttiimpia myös homeen kasvuille. [2] Homehtumisen ja lahoamisen välttämiseksi yläpohjien puurakenteet edellyttävätkin tuuletuksella aikaansaattavia riittävän kuivia olosuhteita. Tuulettuvassa yläpohjassa ilman on vaihdettava tarpeeksi mutta ei liikaa, sillä liiallinen tuuletus tuo yläpohjaan ajoittain tarpeettomasti kosteutta ulkoilmasta. Tulevaisuudessa Suomen ilmaston on ennustettu muuttuvan lämpimämmäksi ja kosteammaksi, mikä heikentää yläpohjarakenteiden kosteusteknistä toimintaa ja vikasietoisuutta entisestään [2].

2. Tutkimuksen toteutus

Tutkimus perustui rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan tietokonesimulointiin Delphin 5.8.1 -ohjelmalla, ja rakenteita tutkittiin TTY:llä kehitetyn rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmän mukaisesti. Kosteusteknisiksi toimintakriteereiksi valittiin homeen kasvu ja kosteuden kondensoituminen rakenteessa. Homeen kasvua rakenteessa tutkittiin VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämän parannetun homemallin avulla ja homeindeksin raja-arvoksi asetettiin $M_{\max} \leq 1,0$, mikä tarkoittaa, että homeen kasvua tarkastelupisteissä ei sallittu lainkaan. Suhteellisen kosteuden maksimiarvoksi tarkastelupisteissä määritettiin $RH_{\max} \leq 98 \%$, millä pyrittiin estämään kosteuden kondensoitumisen rakenteelle aiheuttamat haitat.

Laskentatarkastelut tehtiin FRAME-projektin yhteydessä määritettyjen Jokioisen testivuosien 2004 ja 2050 ilmastossa. Tutkimuksessa tarkasteltiin myös tilanteita, joissa rakenteisiin kohdistui ilma- tai sadevuodon aiheuttamaa ylimääräistä kosteuskuormitusta. Sadevuotona käytettiin 1 %:a

sateen kokonaismäärästä ja ilmavuodon sisätilasta rakenteeseen mallinnettiin tapahtuvan 1 mm levyisen raon kautta 5 Pa:n paine-erolla. Tarkastelupisteet sijoitettiin kaikissa tapauksissa materiaalikerrosten välisiin rajapintoihin. Laskenta-aika oli kaksi vuotta tammikuun alusta alkaen ja rakenteen toimintaa analysoitiin jälkimmäisen vuoden datan perusteella.

Tutkimuksessa tarkasteltiin viittä rakennetyyppiä: kahta harjakattorakennetta ja kolmea tasakattorakennetta. Harjakatoissa lämmöneristemateriaalina oli puhallettu puukuitueriste ja eristekerroksen paksuutena 400 mm ja 500 mm. Tasakattorakenteista tarkasteltiin tavanomaista huopakatteista rakennetta sekä viherkattoa ja terrassikattoa. Lämmöneristeenä tasakatoissa käytettiin puhallettua puukuitueristettä ja polyuretaanilevyeristettä. Harjakatoilla tuuletustilan korkeus oli 1000–1100 mm ja ilmanvaihtuvuus 0,5 1/h. Tasakattojen tuuletusvälin korkeus oli 150–300 mm ja ilmanvaihtuvuus 0,2 1/h.

3. Tutkimustulokset

3.1 Tarkasteltujen yläpohjarakenteiden toiminta

Taulukossa 1 on esitetty esimerkinomaisesti laskentatulokset yhdelle tutkitulle harjakattorakenteelle, jossa lämmöneristeenä olevan puukuitueristeen paksuus on 500 mm, tuuletustilan korkeus 1000 mm ja ilmanvaihtokerroin on 0,5 1/h.

Taulukko 1. Harjakattorakenteen homeindeksin maksimi-arvot M_{max} ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot RH_{max} , kun rakenteessa ei ole kosteusvuotoja ja kun rakenteessa on sade- tai ilmavuoto. Tarkastelupisteet 1-6 sijaitsevat kattoristikon alapaarten alanurkassa, alapaarten ylänurkassa, lämmöneristekerroksen yläpinnassa, yläpaarten alanurkassa, yläpaarten ylänurkassa ja aluskatteen alapinnassa yläpaarteiden k-jaon keskellä. Raja-arvojen ylittyminen on merkitty taulukkoon lihavoimalla.

tarkastelu- piste	Jokioinen 2004						Jokioinen 2050	
	ei vuotoja		sadevuoto		ilmavuoto		ei vuotoja	
	M_{max} [-]	RH_{max} [%]	M_{max} [-]	RH_{max} [%]	M_{max} [-]	RH_{max} [%]	M_{max} [-]	RH_{max} [%]
1	0	54.7	0	67.0	0.006	83.6	0	59.8
2	0	53.9	0	67.4	0	59.5	0	57.9
3	0.092	98.5	5.662	99.3	0.366	98.7	0.504	98.5
4	0.016	94.2	5.511	99.2	0.031	94.6	0.087	94.9
5	0.016	92.4	4.988	98.6	0.031	92.9	0.062	93.5
6	0.002	96.4	0.389	100.0	0.003	96.8	0.010	96.7

Tutkitut harjakattorakenteet eivät täyttäneet asetettuja kriteereitä sellaisenaan. Homeindeksin maksimi-arvo oli selvästi alle raja-arvon $M_{max} \leq 1,0$ vuosien 2004 ja 2050 ilmastoissa, mutta suhteellisen kosteuden maksimi-arvo oli talvella lämmöneristeen yläpinnassa noin kahden kuukauden ajan yli 98 % RH maksimi-arvon ollessa 98,5 % RH. Toisaalta ylimääräisestä kosteudesta ei aiheudu tässä kohdassa rakennetta todennäköisesti merkittävää haittaa, koska kosteus voi sitoutua lämmöneristeenä käytettävään puukuitueristeeseen. Harjakattorakenteiden, joissa puhalletun puukuitueristeen paksuus oli 500 mm ja 400 mm, tuloksissa ei ollut suurta eroa. Molemmat rakenteet saatiin paremmin toimiviksi lisäämällä aluskatteen ja ristikon yläpaarten väliin lämmöneristeeksi 20 mm polyuretaanilevy, jolloin suhteellisen kosteuden maksimi-arvo jäi alle 98 % RH kaikissa tarkastelupisteissä. Harjakattorakenteisiin mallinnettu ilmavuoto ei tuottanut sallittua korkeampia homeindeksin maksimi-arvoja tarkastelupisteissä. Suhteellinen kosteus oli ilmavuodon tapauksessa lämmöneristeen yläpinnassa yli 98 % RH talvella noin neljän

kuukauden ajan. Sadevuoto sen sijaan aiheutti erittäin runsasta homekasvua lämmöneristeen yläpinnan ja aluskatteen väliselle alueelle, jossa myös suhteellinen kosteus oli yli 98 % RH yhtäjaksoisesti noin puolen vuoden ajan maksimiarvon ollessa 100 % RH.

Taulukossa 2 on esitetty vastaavasti laskentatulokset yhdelle tasakattorakenteelle, jossa lämmöneristeenä olevan puukuitueristeen paksuus on 500 mm, tuuletustilan korkeus 200 mm ja ilmanvaihokerroin on 0,2 1/h.

Taulukko 2. Tasakattorakenteen homeindeksin maksimiarvot M_{max} ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot RH_{max} , kun rakenteessa ei ole kosteusvuotoja ja kun rakenteessa on sade- tai ilmavuoto. Tarkastelupisteet 1-7 sijaitsevat kattoristikon alapaarten alanurkassa, alapaarten ylänurkassa, lämmöneristekerroksen yläpinnassa, tuulensuojalevyn yläpinnassa, yläpaarten alanurkassa, yläpaarten ylänurkassa ja vesikattovanerin alapinnassa yläpaarteiden k-jaon keskellä. Raja-arvojen ylittyminen on merkitty taulukkoon lihavoimalla.

tarkastelu- piste	Jokioinen 2004						Jokioinen 2050	
	ei vuotoja		sadevuoto		ilmavuoto		ei vuotoja	
	M_{max} [-]	RH_{max} [%]	M_{max} [-]	RH_{max} [%]	M_{max} [-]	RH_{max} [%]	M_{max} [-]	RH_{max} [%]
1	0	68.6	0	77.7	0.014	85.8	0	72.9
2	0	68.9	0	79.6	0	71.3	0	72.3
3	0.608	94.2	5.864	99.4	2.015	96.5	0.627	92.9
4	0.715	92.3	5.995	100.0	2.115	95.0	0.696	91.5
5	0.734	92.5	5.990	99.9	2.164	95.2	0.703	91.7
6	0.781	91.3	5.940	99.7	2.029	93.6	0.695	90.8
7	0.309	93.1	5.257	99.9	0.790	95.7	0.324	92.1

Kaikki tarkastellut tasakattorakenteet osoittautuivat toimiviksi ilman kosteus- ja ilmavuotoja vuosien 2004 ja 2050 ilmastoissa, joten niihin ei ollut tarpeen tehdä parannuksia. Puhalletulla puukuitueristeellä toteutetuissa tasakatoissa homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot olivat jonkin verran korkeampia kuin polyuretaanilevyllä eristetyissä rakenteissa. Puukuitueristeellä toteutetuissa tasakatoissa ilmavuoto tuotti homeindeksin maksimiarvoksi noin 1,5–2 lämmöneristeen ulkopinnan ja vesikattovanerin välisellä alueella, joten rakenteissa esiintyy mikroskoopilla havaittavaa homekasvua. Suhteellinen kosteus ei kuitenkaan ilmavuodon tapauksessa ylittänyt asetettua yläraja-arvoa, joten kosteuden kondensoitumisen riskiä ei esiinny ilmavuototapauksessa. Sadevuoto aiheutti homeindeksin maksimiarvoksi lähes 6 lämmöneristeen ulko-osan ja vesikattovanerin välillä, mikä tarkoittaa, että tällä alueella esiintyy erittäin runsasta homekasvua. Suhteellinen kosteus ylitti samalla alueella 98 % RH noin puolen vuoden kuluttua laskennan alkuhetkestä eikä laskenut enää lainkaan sen alle laskenta-ajan ollessa 2 vuotta.

3.2 Yläpohjarakenteiden kosteustekniseen toimintaan vaikuttavat tekijät

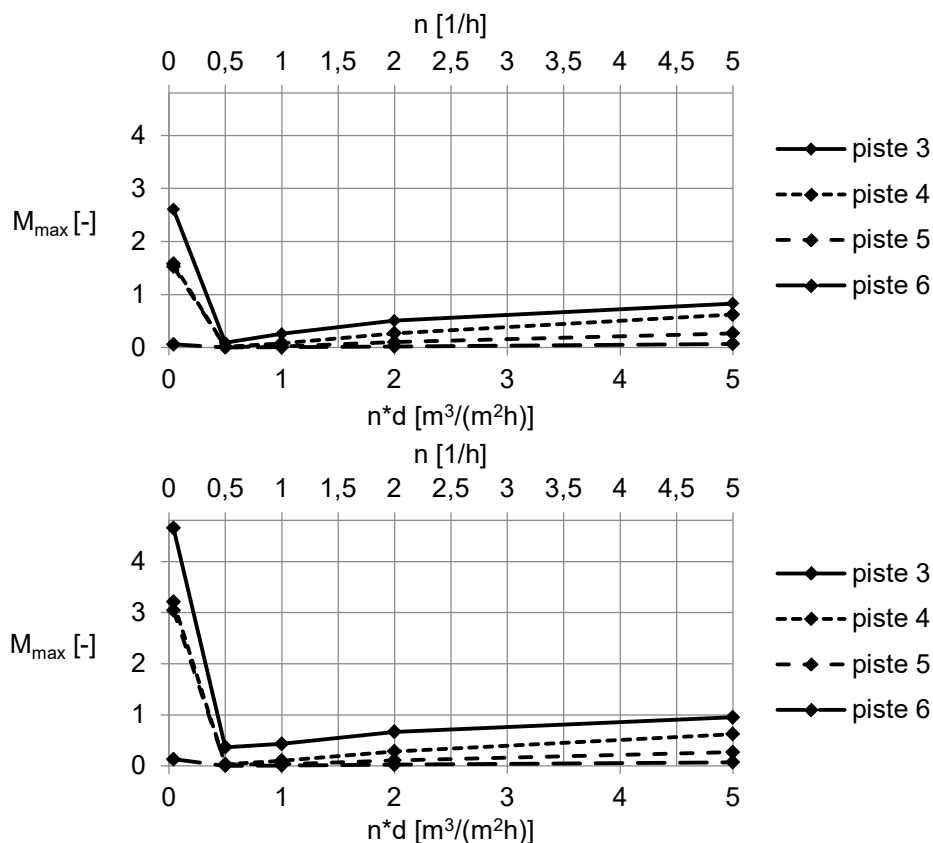
3.2.1 Kosteusvuodot

Tehtyjen ilma- ja sadevuototarkastelujen perusteella yläpohjarakenteiden toiminta heikkenee luvussa 3.1 esitetyllä tavalla, jos rakenteeseen kohdistuu ylimääräistä kosteuskuormitusta. Sadevuodon vaikutus on selvästi suurempi kuin ilmavuodon. Ilmavuoto heikentää olosuhteita eniten lähellä rakenteen sisäpintaa ja tiloja, joissa rakennuksen käyttäjät oleskelevat. Sadevuoto sen sijaan vaikuttaa eniten olosuhteisiin yläpohjarakenteen ulko-osissa. Laskentatarkastelujen perusteella ilmavuodon rakenteen kosteusteknistä toimintaa heikentävä vaikutus voidaan kompensoida lisäämällä yläpohjan tuuletusta. Sadevuoto taas heikentää yläpohjarakenteiden

kosteusolosuhteita niin paljon, että rakenteista ei saada toimivia pelkästään ilmanvaihtoa kasvattamalla tai lisäämällä lämmöneristettä rakenteen ulko-osaan.

3.2.2 Rakenteen tuuletus

Ilmanvaihtuvuuden havaittiin olevan yläpohjarakenteen toiminnan kannalta hyvin kriittinen tekijä. Jotta rakenne toimisi optimaalisella tavalla, tulee ilmanvaihtuvuuden olla riittävä mutta ei liian suuri. Kuvassa 1 on esitetty esimerkinomaisesti yhden harjakattorakenteen homeindeksin maksimi-arvot eri tarkastelupisteissä eri ilmanvaihtuvuuksilla, kun rakenteessa ei ole vuotoja ja kun rakenteessa on ilmavuoto.



Kuva 1. Harjakattorakenteen homeindeksin maksimi-arvot tarkastelupisteissä 3–6 eri ilmanvaihtuvuuksilla Jokioisen 2004 ilmastossa, kun rakenteessa ei ole vuotoja (ylärivi) ja kun rakenteessa on ilmavuoto (alarivi). Tarkastelupisteet 3–6 sijaitsevat lämmöneristekerroksen yläpinnassa, kattoristikon yläpaarten alanurkassa, yläpaarten ylänurkassa ja aluskatteen alapinnassa yläpaarteiden k -jaon keskellä. Kuvaajien x -akselille on merkitty ilmanvaihtokerroin (n) sekä ilmanvaihtomäärä ($n \cdot d$), missä tuuletustilan korkeus $d=1000$ mm.

Kuvan 1 mukaisesti täysin ideaaliselle, vuotamattomalle yläpohjarakenteelle riittää pienempi ilmanvaihtuvuus kuin rakenteelle, jossa on kosteusvuotoja. Tutkimuksen perusteella ihanteellinen ilmanvaihtomäärä sekä harjakattoiselle että tasakattoiselle yläpohjarakenteelle olisi noin 0,5–1 m³/(m²h) mikä harjakatolla tuuletustilan korkeuden ollessa 1000 mm vastaa ilmanvaihtokerrointa 0,5–1 1/h. Tämä ilmanvaihtokerroin on toimiva myös silloin, kun yläpohjarakenteessa on pienehkö ilmavuoto. Tällä ilmanvaihtuvuudella homeen kasvua ei tapahdu myöskään varjossa olevassa yläpohjassa.

3.2.3 Hygroskooppinen materiaali

Tutkimuksessa havaittiin, että hygroskooppinen puumateriaali tasoittaa yläpohjarakenteessa vallitsevien kosteusolosuhteiden vaihtelua ennakoitua enemmän. Homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot jäivät jonkin verran matalammiksi niissä rakenteissa, joiden puuosien kosteuskapasiteetti oli huomioitu laskentatarkasteluissa. Puumateriaalin rakenteen suhteellista kosteutta tasoittava vaikutus perustuu puun hygroskooppisuuteen, eli kykyyn sitoa itseensä kosteutta ilmasta ja luovuttaa sitä takaisin ilmaan. Tasoittava vaikutus näyttäisi olevan sitä merkittävämpi mitä suurempi pinta-ala hygroskooppista materiaalia rakenteessa on kontaktissa ilman kanssa.

3.2.4 Aluskatteen lämmönvastus

Tutkimustulosten perusteella voidaan todeta, että yläpohjarakenteen ulko-osan lämmönvastusta kasvattamalla voidaan tarvittaessa parantaa rakenteen toimivuutta. Käytännössä parannus voidaan toteuttaa lisäämällä pienehkö määrä levymäistä lämmöneristettä kattoristikoiden yläpaarteiden yläpuolelle. Taulukossa 3 on esitetty laskentatulokset yhdelle tutkitulle harjakattorakenteelle, jota parannettiin lisäämällä aluskatteen ja ristikoiden yläpaarteiden väliin lämmöneristeeksi 20 mm polyuretaanilevy ($R=0,83 \text{ m}^2\text{K/W}$).

Taulukko 3. Harjakattorakenteen homeindeksin maksimiarvot M_{max} ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot RH_{max} nykyisessä ilmastossa, kun aluskatteen lämmönvastus on $R=0 \text{ m}^2\text{K/W}$ ja $R=0,83 \text{ m}^2\text{K/W}$.

tarkastelu- piste	$R=0 \text{ m}^2\text{K/W}$		$R=0,83 \text{ m}^2\text{K/W}$	
	M_{max} [-]	RH_{max} [%]	M_{max} [-]	RH_{max} [%]
1	0	54.7	0	53.5
2	0	53.9	0	52.8
3	0.092	98.5	0.042	96.4
4	0.016	94.2	0.007	91.0
5	0.016	92.4	0.004	89.9
6	0.002	96.4	0.001	93.3

Lämmöneristeen lisääminen ei kuitenkaan ole taloudellisesti järkevää, jos tuuletustilan ilmanvaihtuvuus on hyvin pieni ja rakenteessa on samanaikaisesti ilmavuoto. Tutkimustulosten perusteella tehokkain tapa varmistaa yläpohjarakenteen kosteustekninen toimivuus on ensisijaisesti pyrkiä estämään ilma- ja sadevuodot rakenteeseen, sen jälkeen tarvittaessa lisätä rakenteen tuuletusta kohtuulliselle tasolle ja vasta tämän jälkeen kasvattaa rakenteen ulko-osan lämmönvastusta. Vesikaton vesitiiviyyden ja yläpohjarakenteen ilmatiiviyyden huolellinen varmistaminen on sitä olennaisempaa, mitä heikommin rakenne tuulettaa.

3.3 Tulosten luotettavuus

Yläpohjarakenteen lämpö- ja kosteustekninen toiminta on monimutkainen kokonaisuus, johon vaikuttavat hyvin monet ilmiöt ja tekijät. Tällaisia tekijöitä ovat muun muassa kaikki lämmön ja kosteuden siirtymistavat, todellista rakennetta ympäröivät olosuhteet vaihteluineen, rakennusmateriaalien lukuisat ominaisuudet ja todellisten rakenteiden epäideaalisuudet, kuten kylmäsillat, liitokset ja vuotokohdat. Kaikkia näitä muuttujia on vaikea huomioida tutkittaessa rakenteita laskennallisesti. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin yksittäisiä yläpohjarakenteita käyttäen tiettyjä materiaaliominaisuuksia ja määrättyjä ulkoilman olosuhteita. Rakenteiden välisiä liitoskohtia tai muita perusrakennetyypistä poikkeavia kohtia ei mallinnettu. Siten edellä esitetyt

yläpohjarakenteiden laskennalliseen mallinnukseen perustuvat tulokset antavat arvion tutkittujen rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisestä toiminnasta mutta eivät välttämättä päde sellaisenaan muille yläpohjarakenteille tai toisenlaisissa olosuhteissa oleville rakenteille.

Tutkimuksessa käytetyn rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmän ohella myös laskentaohjelma sekä VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämä parannettu homemalli sisältävät erilaisia yksinkertaistuksia, joiden vuoksi laskennan tulokset eivät välttämättä kaikissa tapauksissa kuvaa täydellisesti todellisen yläpohjarakenteen toimintaa. Todellisissa yläpohjarakenteissa esiintyviä ilmanvaihtuvuuksia ja ilma- sekä sadevuotojen suuruuksia mittaamalla saataisiin lisää tietoa laskennallisen mallinnuksen luotettavuudesta.

4. Yhteenveto

Kaikki tutkitut tasakattorakenteet todettiin kosteusteknisesti toimiviksi nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa, kun niissä ei esiintynyt kosteusvuotoja. Vuotamattomat harjakattorakenteet korjattiin toimiviksi lisäämällä lämmöneristettä aluskatteen alapuolelle. Ilmastomuutos heikensi olosuhteita enemmän harjakatoissa kuin tasakatoissa. Kosteusvuodot heikensivät kaikkien rakenteiden toimintaa: ilmavuoto erityisesti lähellä rakenteen sisäpintaa ja sadevuoto rakenteen ulko-osassa aiheuttaen jopa erittäin runsasta homekasvua lämmöneristekerroksen kylmällä puolella. Vähemmän tuulettuvien tasakattojen toiminta heikkeni kosteusrasituksen kasvaessa vielä enemmän kuin enemmän tuulettuvien harjakattojen. Ilmanvaihtuvuuden todettiin vaikuttavan ratkaisevasti kaikkien rakenteiden toimintaan. Laskentatulosten perusteella yläpohjarakenteet on erittäin tärkeää suunnitella ja toteuttaa siten, että kosteusvuodoilta vältyttäisiin.

Lähdeluettelo

- [1] Junttila, H. 2015. Pientalojen puurakenteisten tuulettuvien yläpohjien lämpö- ja kosteustekninen toiminta. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos.
- [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., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A. ja Palolahti, T. 2013. Ilmastomuutoksen ja lämmöneristykseen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tutkimusraportti 159. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka. 354 s. + 43 liites.