

Puukerrostalon työmaavaiheen lämpö- ja kosteusolosuhteiden mittaukset

Anssi Laukkarinen¹, Sami Musakka², Olavi Penttilä², Olli Teriö¹ ja Juha Vinha¹

¹ Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikka

² Stora Enso

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa esitellään lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittauksia puukerrostalotyömaalta. Hankkeen yhtenä tavoitteena on ollut selvittää jatkuvan sääsuojauksen tarvetta tilanteessa, jossa kantavien puurakenteiden alkukosteuspitoisuus vastaa tehdaskuivaa tasoa ja työmaatoteutus pyritään viemään vesikattoon asti nopeasti. Tulosten perusteella puukerrostalon rakentaminen ilman jatkuvaa sääsuojauksia on mahdollista tutkituissa talviolosuhteissa, mutta edellyttää useiden tekijöiden yhtäaikaista huomioon ottamista.

1. Johdanto

1.1 Yleistä

Suomen asuinrakentamisessa puu on ollut yleinen rakennusmateriaali erityisesti pientalorakentamisessa, mutta viime vuosien aikana aktiivista kehitystyötä on tehty myös kerrostalorakentamisessa. Puukerrostalorakentamisella haetaan esimerkiksi Suomen metsien uusia käyttömahdollisuuksista, korkean teollisen esivalmistusasteen hyötyjä ja uusien vaihtoehtojen tuomista markkinoille. Uusia rakentamisen ratkaisuja kehitettäessä on tärkeää ottaa huomioon kunkin rakennusmateriaalin ja –ratkaisun erityispiirteet, jotta vastaavasti niiden vahvuudet saataisiin täysimääräisesti hyödynnettyä.

Tässä artikkelissa esitellään Jätkäsaaren Wood City -puukerrostalotyömaalla tehtyjä lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaustuloksia talvikaudelta. Työmaan yhtenä tavoitteena oli selvittää puukerrostalon toteuttamista ilman jatkuvaa ja kattavaa sääsuojauksia. Mittausjärjestelyjen yksityiskohtaisempi kuvaus ja laajempi katsaus tuloksiin esitetään Sami Musakan diplomityössä [1], minkä lisäksi hankkeen kosteudenhallintaprosesseja on tarkasteltu Olavi Penttilän diplomityössä [2].

1.2 Viilupuusta

LVL eli viilupuusta (laminated veneer lumber) on kolme millimetriä paksuja viiluja yhteen liimaamalla valmistettu puutuote, josta voidaan valmistaa esimerkiksi pilareja, palkkeja, välipohja- ja kattoelementtejä, ristikoita sekä massiivisia seinäelementtejä. Näistä viimeisimpiä on mahdollista valmistaa kerrannaisliimauksella 300 mm paksuuteen asti, mikä mahdollistaa niiden käytön esimerkiksi kerrostalon kantavana runkona.

Case-kohteessa käytetyt LVL-elementit olivat tyypillisesti 141 mm paksuja, huoneen korkuisia ja seinän pituisia levyjä. Rakennuksen runko muodostui pääosin näistä LVL-elementeistä, alapuoleltaan huoneilmaan avoimista avokotelo-välipohjaripalaatoista sekä muista täydentävistä rakenneosista, kuten jälkikäteen asennettavista lämmöneristetyistä julkisivuelementeistä.

LVL-elementtien kosteustekniseen käyttäytymiseen liittyy oleellisesti niiden kerroksellinen rakenne: Ohuet liimakerrokset hidastavat tehokkaasti kosteuden kulkeutumista sekä vesihöyrynä että vetenä elementtien pintaa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Sen sijaan elementtien päädyistä vesi pystyy tehokkaasti imeytymään viiluihin, joista taas kosteuden kuivuminen diffuusiolla on kapillaarista kosteuden siirtymistä huomattavasti hitaampaa.

2. Mittausmenetelmät ja datan analysointi

2.1 Perustietoja mittauksista

Ensimmäiset mittaukset käynnistettiin tammikuun lopussa ja helmikuun alussa 2017 ja niitä jatkettiin kesäkuun alkuun 2017 asti. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittauksissa käytettiin pääosin Rotronic-dataloggereita ja -antureita, joiden lisäksi hyödynnettiin Ilmatieteen laitoksen Avoin data -palvelua [3]. Mittauksissa käytettävät anturit kalibroitiin TTY:n rakennustekniikan laboratoriossa ennen kenttämittauksia ja testattiin uudestaan mittausten päätyttyä.

2.2 Datan analysointi

Kaavassa 1 on esitetty sisäilman kosteuslisän ja lämpötilaeron liittyminen työmaalta mitattaviin lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoihin.

$$\varphi_i = \frac{v_i}{v_{sat}(T_i)} = \frac{v_e + \Delta v}{v_{sat}(T_e + \Delta T)} \quad (1)$$

- missä φ_i = sisäilman suhteellinen kosteus, % RH
 v_i = sisäilman vesihöyrypitoisuus, kg/m³
 v_{sat} = lämpötilasta riippuva ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus [4], kg/m³
 v_e = ulkoilman vesihöyrypitoisuus, kg/m³
 Δv = sisäilman kosteuslisä, kg/m³
 T_i = sisäilman lämpötila, °C
 T_e = ulkoilman lämpötila, °C
 ΔT = lämpötilaero sisä- ja ulkoilman välillä, °C

Kaavassa 2 on esitetty lauseke kosteusvirran tiheydelle pinnan ja sitä ympäröivän ilman välillä.

$$g_{surf,i} = \beta_v \cdot (v_{surf} - v_i) \\ = \beta_v \cdot [\varphi_{surf} \cdot v_{sat}(T_{surf}) - \varphi_i \cdot v_{sat}(T_i)] \quad (2)$$

- missä $g_{surf,i}$ = kosteusvirta pinnan ja huoneilman välillä, positiivinen suunta pinnasta pois päin, kg/(m²s)
 β_v = pinnan kosteudensiirtokerroin (voidaan laskea pinnan konvektiivisesta lämmönsiirtokertoimesta Lewisin kaavalla), m/s
 v_{surf} = vesihöyrypitoisuus pinnalla, kg/m³
 T_{surf} = pinnan lämpötila, °C
 φ_{surf} = huokosilman suhteellinen kosteus materiaalin pinnalla (0...1), -
 v_i = vesihöyrypitoisuus ilmassa pinnan vieressä, kg/m³
 T_i = ympäröivän ilman lämpötila, °C
 φ_i = ympäröivän ilman suhteellinen kosteus (0...1), -.

Monet kosteuteen liittyvät vaurioitumismekanismit ovat kytköksissä korkeisiin suhteellisen

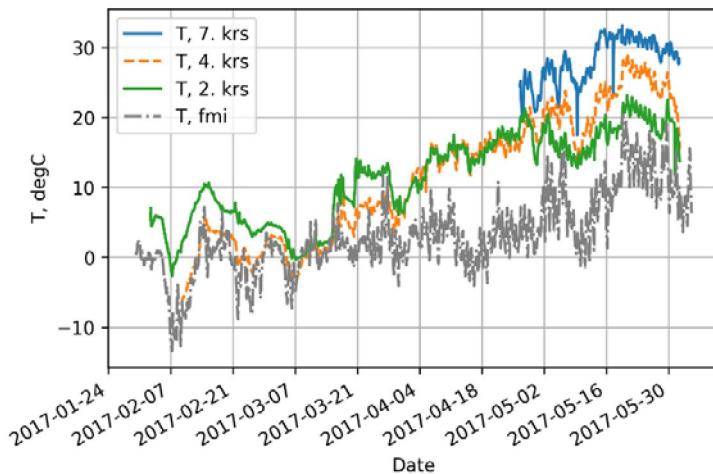
kosteuden arvoihin. Kaavan 1 perusteella pääasialliset tavat suhteellisen kosteuden pitämiseen alhaisella tasolla ovat kosteuslisän pitäminen alhaisella tasolla ja lämpötilan nostaminen.

Kaavan 2 perusteella pinnasta ilmaan siirtyvän kosteuden määrää eli rakenteen kuivumista nopeuttavat kosteudensiirtokertoimen kasvattaminen (ilmavirran nopeuden kasvattaminen pinnan vieressä), kuivatettavan rakenteen lämpötilan nostaminen sekä ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden laskeminen ja lämpötilan nostaminen. Käytännössä kaavojen 1 ja 2 mukaiset toimenpiteet tarkoittavat useimmiten kosteuskuormien minimointia, rakennusten lämmittämistä ja ilmanvaihdon järjestämistä.

3. Tulokset

3.1 Huonetilojen olosuhteet

Kuvassa 1 on esitetty toisen kerroksen huonetilan ja lähimmän sääaseman lämpötilat mittausjaksolta.



Kuva 1. Lämpötilat huone- ja ulkoilmassa. Huoneilma oli ulkoilmaa lämpimämpää erityisesti mittausjakson loppupuolella.

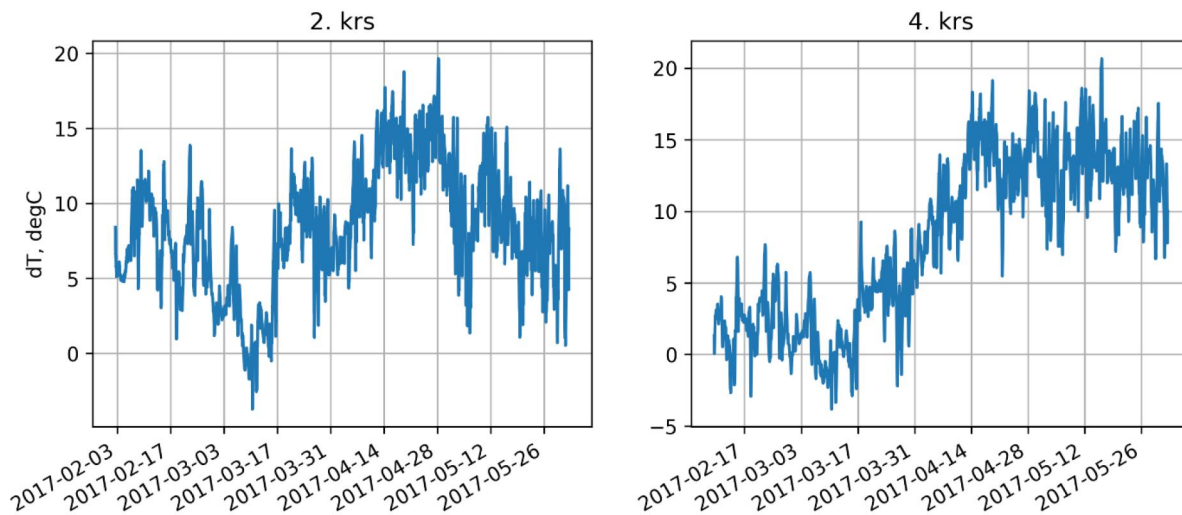
Lämpötila vaihteli talvella nollan molemmin puolin ja nousi pysyvämmiin nollan yläpuolelle maaliskuuhun aikana. Kuitenkin myös talvikuukausina esiintyi otollisia olosuhteita sekä lumetta vesisateelle sekä lumen sulamiselle.

Kuvassa 2 on esitetty huoneilman ja ulkoilman välinen lämpötilaero toisesta ja neljännessä kerroksesta mitattuna.

Jos rakennukseen lämmityslaitteilla ja sisäisistä lämpökuormista tulevan lämmitystehon suhde johtumisen, ilmanvaihdon ynnä muiden mekanismien lämpöhäviöihin pysyy ajan suhteen vakiona, pysyy tällöin myös lämpötilaero sisä- ja ulkoilman välillä vakiona. Lämpötilaerojen kuvaajien perusteella lämpötilaero on vaihdellut noin 0-15 degC välillä toisessa kerroksessa, kun taas neljännessä kerroksessa lämpötilaero on noussut maaliskuuhun aikana 0-5 degC arvosta noin 10-15 degC arvoon.

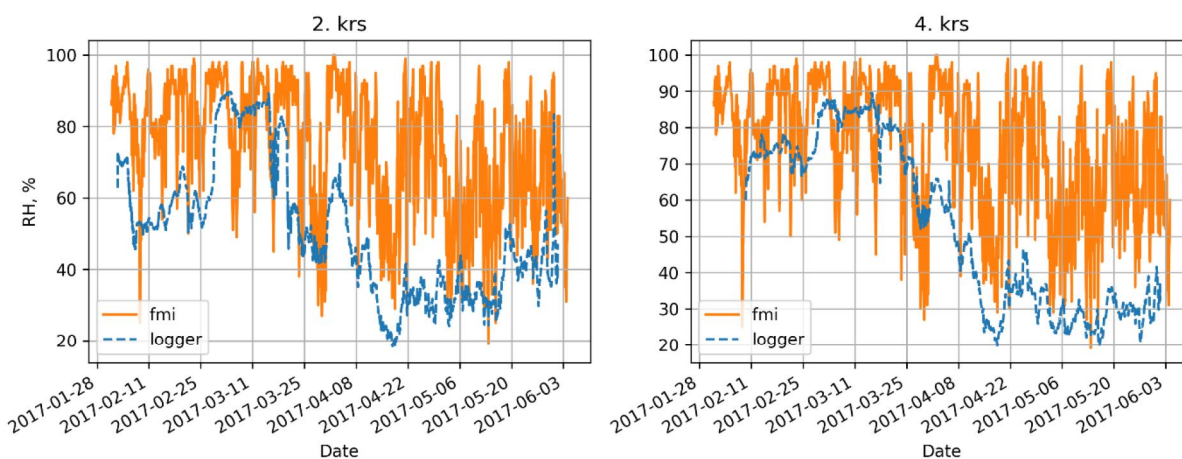
Vesihöyrypitoisuusero kuvien 1 ja 2 mukaisista mittauspisteistä käyttäytyi kuvaajien perusteella tasaisemmin, kuin lämpötilaero. Lasketut 5, 50 ja 95 % persentiilit sekä keskihajonta olivat toisen

kerroksen kosteuslisälle $-0,5, 0,5, 1,9$ ja $0,7 \text{ g/m}^3$, neljännen kerroksen kosteuslisälle $-0,9, 0,3, 1,6$ ja $0,8 \text{ g/m}^3$ ja seitsemännen kerroksen kosteuslisälle $-1,9, 0,0, 1,6$ ja $1,0 \text{ g/m}^3$. Näiden tulosten perusteella sisäilman kosteuslisä oli pienempi ylemmissä kerroksissa verrattuna alempiin kerroksiin.



Kuva 2. Lämpötilaero huone- ja ulkoilman välillä toisesta ja neljännestä kerroksesta. Vakiosuuruinen lämmitysteho suhteessa lämpöhäviöihin tuottaisi stationääritilanteessa vakiosuuruisen lämpötilaeron.

Jos rakennuksen sisätilat eivät ole juuri ulkoilmaa lämpimämpiä, pystyy pienikin kosteuslisä nostamaan suhteellisen kosteuden korkealle tasolla, jolloin rakenteissa mahdollisesti oleva kosteus ei pääse kuivumaan ja altistaa ne erilaisten kosteusvaurioille. Jos taas sisätilojen lämmitys on hyvin voimakasta, laskee sisäilman suhteellinen kosteus alhaiselle tasolle, mikä nopeuttaa kuivumista, mutta saattaa joissa tilanteissa aiheuttaa esimerkiksi puuosien halkeilua. Kuvassa 3 on esitetty suhteellinen kosteus ulkoilmassa sekä toisen ja neljännen kerroksen huonetilassa.



Kuva 3. Suhteellinen kosteus ulkoilmassa ja huonetiloissa. Rakennuksen lämmitys ja ilmanvaihto auttavat pitämään huonetilojen suhteellisen kosteuden alhaisella tasolla.

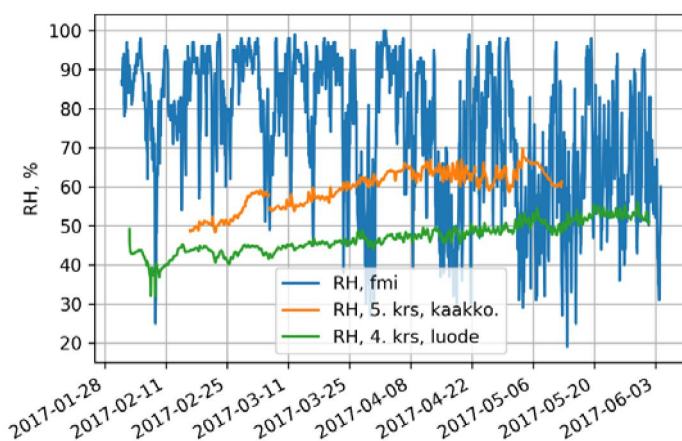
Suhteellinen kosteus oli kuvien 2 ja 3 perusteella huonetiloissa korkeammalla tasolla rakentamisen alkuvaiheessa, jonka jälkeen suuri lämpötilaero laski huonetilojen suhteellisen

kosteuden hyvin alhaiselle tasolle.

3.2 Porareikämittaukset seinäelementeistä

LVL-elementtien toimituskosteuspitoisuus tehtaalta on noin 8-10 paino-% [5], joka vastaa suhteellisen kosteuden 40-55 % RH mukaista tasapainokosteutta [1].

Ulkoseinän LVL-elementissä tehtiin porareikämittauksia ennen lämmöneristeitä sisältävien julkisivuelementtien asentamista. Sekä koilliseen että luoteeseen olevissa ulkoseinien mittauspisteissä lähekkäin olevien antureiden tulokset olivat hyvin samankaltaisia ($\overline{\Delta T} = 0,5-0,6$ degC; $\overline{\Delta v} = 0,6-0,8$ g/m³). Mittauspisteet olivat 5 ja 15 cm etäisyydellä ulkopuolelta vanerilla suljetun ikkuna-aukon reunoista.



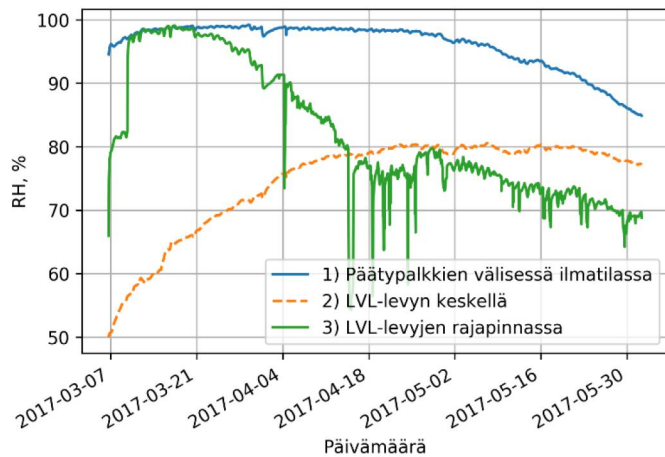
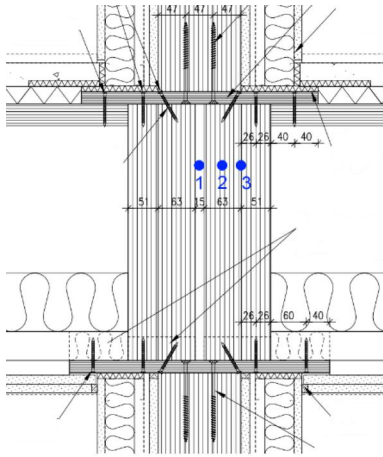
Kuva 4. Huokosilman vesihöyrypitoisuus LVL-elementin sisältä, porareiästä mitattuna.

Osassa ulkoseinien mittauspisteitä näkyi tilanne, jossa suhteellinen kosteus lähti ensin nousemaan, mutta lähti tämän jälkeen selvästi laskemaan. Tämän on todennäköisesti johtunut siitä, että mittausjakson alussa lämpötila on noussut nopeammin kuin huokosilman vesihöyrypitoisuus. Toisin sanoen, lämpötilan funktiona eksponentiaalisesti kasvava kyllästysvesihöyrypitoisuus pystyy aiheuttamaan suhteellisen kosteuden kasvun taittumisen, vaikka kosteuslisä samaan aikaan kasvaisi lineaarisesti.

3.3 Porareikämittaukset väliseinä-välipohjaliitoksista

Tehdyissä mittauksissa kosteustekniseltä toiminnaltaan kriittisiä kohtia olivat välipohja-väliseinä-liitokset. Välipohjana toimivien avokotelo-ripalaattojen päätypalkkien porarei'istä mitattiin paikoin korkeita suhteellisen kosteuden arvoja, jotka viittaavat siihen, että välipohjalle satanut vesi aiheutti keskittyneitä kosteusrasituksia ripalaattojen päiden liitoksiin.

Nyt tehtyjen mittausten perusteella ei vaikuttanut olevan järjestelmällistä vaikutusta, oliko päätypalkkien alapuolella ehjä väliseinäelementti, väliseinäelementin aukkokohta (ovi- tai muu kulkuaukko) tai ei väliseinäelementtiä ollenkaan. Lisäksi avokotelolaattojen päätypalkkien porareikämittausten tuloksissa oli selviä keskinäisiä eroavaisuuksia, vaikka rakennatarkkaisu- ja puolesta kosteusteknisestä käyttäytymisestä tulisi tulla hyvin samankaltaista. Tämä viittaisi siihen, että käytännössä kosteusolosuhteet vaihtelivat selvästi hyvin lähellä toisiaankin olevien mittauspisteiden välillä. Esimerkki päätypalkkien porareikämittausten tuloksista on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Suhteellisen kosteuden porareikämittauksien tuloksia 7. ja 8. kerroksen välisestä välipohjasta. Anturin 1 mittauspiste sijaitsi päätypalkkien välitilassa, anturin 2 paksunnan LVL-palkin keskellä ja anturin 3 kahden vierekkäin olevan LVL-palkin rajapinnassa.

Kuvan 5 tapauksessa päätypalkkien väliseen kapeaan ilmatilaan (mittauspiste 1) on ilmeisesti valunut vettä, jonka seurauksena suhteellinen kosteus on noussut lähelle arvoa 100 % RH. Suhteellinen kosteus on pysynyt pitkään korkealla tasolla, josta se on tämän jälkeen lähtenyt laskemaan. Päätypalkin sisällä porareikässä (mittauspiste 2) suhteellinen kosteus on lähtenyt nousemaan alkuperäisestä tehdaskuivasta tilanteesta ylöspäin, todennäköisesti saman kosteuskuormituksen seurauksena. Päätypalkin sisällä suhteellinen kosteus on kuitenkin tasaantunut alhaisemmalle tasolle, kuin päätypalkkien välissä. Huonetilasta 5 cm syvyydelle poratussa reiässä (kahden LVL-palkin rajapinnassa, mittauspiste 3) suhteellinen kosteus on myös noussut korkealle, mutta alkoi laskemaan nopeammin kuin päätypalkkien välissä.

4. Yhteenveto

Puukerrostalotyömaalla toteutettujen mittausten ja muiden selvitysten perusteella työmaatoteutus ilman jatkuvaa sääsuojaa on mahdollista, mutta edellyttää useiden seikkojen huomioon ottamista yhtä aikaa. Näitä ovat muun muassa: a) Nopea työmaatoteutus, joka pienentää rakenteisiin tulevien kosteuskuormien määrää b) Liitosten suunnitteleminen joko avoimiksi tehokkaan kuivumisen mahdollistamiseksi tai vaikeasti kuivuvien liitosten väliaikainen suojaaminen ja c) Työmaan lämmityksen ja ilmanvaihdon säätäminen hyvien kuivumisolosuhteiden järjestämiseksi.

Lähdeluettelo

- [1] Musakka, Sami (n.d.) Puukerrostalojen lämpötila- ja kosteusolosuhteiden mittaukset työmaavaiheessa, diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laboratorio.
- [2] Penttilä, Olavi (2017) Puukerrostalojen kosteudenhallintaprosessi ja sen kehittäminen, diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laboratorio. 52 s. + 11 liites. <http://dspace.cc.tut.fi/dpub/handle/123456789/24942>.
- [3] Ilmatieteen laitos, Avoin data. <https://ilmatieteenlaitos.fi/avoin-data>
- [4] SFS-EN ISO 13788:2013. 17 p. + 23 app. p. Finnish Standards Association SFS, Helsinki.
- [5] LVL by Stora Enso, tekninen esite. 32 s. Haettu 14.8.2017