



Eristemateriaalien ominaiskäyttäytymisen ja vertailu puu-sandwich-elementissä

Sami Tyynelä

Opinnäytetyö, AMK

Toukokuu 2025

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka (AMK)

Tyynelä Sami

Eristemateriaalien ominaiskäyttäytyminen ja vertailu puu-sandwich-elementissä

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. **Toukokuu 2025**, 58 sivua.

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: Kyllä

Tiivistelmä

Opinnäytetyön tarkoituksena oli analysoida eri eristemateriaalien soveltuvuutta puu-sandwich-elementtiin vertailemalla niiden vaadittavaa paksuutta ja kosteusteknistä toimivuutta. Tehtävänä oli tutkia lämmöneristevaihtoehtoja DOF-LÄMPÖ-sovelluksella ja kosteusteknisiä ominaisuuksia WUFI-ohjelmalla, jonka tuloksilla arvioitiin myös homehtumisriskiä. Tavoitteena oli selvittää, mitkä lämmöneristeet soveltuvat tuulettumattomaan puu-sandwich-elementtiin lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden perusteella. Vertailuun valittiin puukuitueriste, mineraalivilla sekä polyuretaanipohjainen PIR-eriste, jotka edustavat erilaisia materiaaliperheitä ja ominaisuuksia. Erityistä huomiota kiinnitettiin materiaalien vesihöyrynläpäisevyyteen, lämmönjohtavuuteen ja homehtumisherkkyteen, koska ne vaikuttavat ratkaisevasti rakenteen pitkäaikaiseen kestävyteen ja sisäilman laatuun.

Työ toteutettiin tuotteen kehitystyönä. Työ perustui käytännönläheiseen rakenteen mallinnukseen ja eristemateriaalien soveltuvuuden arviointiin todellisia sääolosuhteita vastaavissa olosuhteissa. Simuloinnit suoritettiin vakioituilla lähtöarvoilla, jotta eri materiaalien vertailtavuus säilyi luotettavana. Laskennallisilla menetelmillä pyrittiin ennakoimaan rakenteen käyttäytymistä ajan myötä, erityisesti kosteuden kertymistä ja kuivumista.

Tulosten pohjalta huomataan, että tuulettumattomissa puu-sandwich-elementeissä eristemateriaalin valinnalla on olennainen merkitys rakenteen toimivuuden ja pitkäikäisyyden kannalta. Huomataan myös, että rakenteen homeindeksiin vaikuttaa isosti homehtumisherkkyysluokka.

Suomessa rakentamisen ohjeistus ohjaa tekemään rakenteista tuulettuvia, sillä tällä hetkellä tuuletus katsotaan rakennetta kuivattavaksi, eli edulliseksi ratkaisuksi. Epävarmuutta simulaatioihin loi lämpömodifioitujen puulevyjen tutkimattomuus.

Avainsanat (asiasanat)

Tuulettumaton rakenne, Puu-sandwich-elementti, eristemateriaalit, kosteustekninen toimivuus, homehtumisriski, Lämpömodifioitu puu

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

-

Tyynelä Sami

The characteristic behavior and comparison of insulation materials in a wood sandwich element

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2025, 58 pages.

Degree Programme in Construction and Civil Engineering. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The purpose of the thesis was to analyze the suitability of different insulation materials for use in a timber sandwich element by comparing their required thickness and hygrothermal performance. The task involved examining insulation options using the DOF-LÄMPÖ application and assessing hygrothermal properties with the WUFI software, which was also used to evaluate the risk of mold growth. The objective was to determine which insulation materials are suitable for non-ventilated timber sandwich elements based on their thermal and moisture performance. The comparison included wood fiber-, mineral wool-, and polyurethane-based PIR insulation, each representing different material families and characteristics. Special attention was paid to vapor permeability, thermal conductivity, and mold sensitivity, as these factors significantly affect the long-term durability of the structure and the quality of indoor air.

The study was carried out as a product development project. It was based on practical modeling of the structure and evaluating the suitability of insulation materials under realistic weather conditions. Simulations were conducted using standardized initial values to ensure reliable comparability between materials. The computational methods aimed to predict the structure's performance over time, particularly moisture accumulation and drying behavior.

The results showed that in non-ventilated timber sandwich elements, the choice of insulation material plays a critical role in ensuring the functionality and longevity of the structure. It was also observed that the mold index of the structure is heavily influenced by the mold sensitivity class of the material.

In Finland, construction guidelines currently favor ventilated structures, as ventilation is considered a beneficial factor that promotes drying. Uncertainty in simulation results was caused by the lack of research on thermally modified wood panels.

Keywords/tags (subjects)

Non-ventilated structure, timber sandwich element, insulation materials, hygrothermal performance, mold growth risk, thermally modified wood

Miscellaneous (Confidential information)

-

Sisältö

1	Johdanto	7
1.1	Työn taustaa.....	7
1.2	Toimeksiantaja - Siparila Oy.....	8
1.3	Kestävä kehitys.....	8
1.4	Työn tavoitteet.....	10
2	Kosteus rakenteissa ja vauriomekanismit.....	10
2.1	Rakenteiden homehtuminen	11
2.2	Kosteus rakenteessa.....	14
2.3	Lämpö rakenteessa	19
2.4	Lämmöneristeet	22
2.5	Lämpömodifioitu puutavara	24
3	Opinnäytetyön tavoitteet ja rajaukset.....	25
3.1	Työn tavoitteet.....	25
3.2	Rajaukset	25
3.3	Tutkimustapa.....	26
3.4	Tutkimuskysymykset	27
4	Käytetyt menetelmät.....	27
4.1	DOF-LÄMPÖ.....	27
4.2	WUFI 2D	31
4.3	Suomalainen homemalli.....	35
5	Tulokset, arviointi, johtopäätökset ja hyödynnettävyys.....	36
6	Pohdinta.....	43
	Lähteet	46
	Liitteet	52
	Liite 1. Puukuitueristeen laskut.....	52
	Liite 2. Puukuitueristeinen rakenne tulokset	53
	Liite 3. Mineraalivillaeristeinen rakenne tulokset.....	55
	Liite 4. Polyuretaanieristeinen rakenne tulokset	57
	Kuviot	
	Kuvio 1. Mikrobit (RIL 250-2020 2020).	11
	Kuvio 2. Materiaalien vaurioitumisen kriittiset tekijät. (RIL 250-2020 2020).....	12

Kuvio 3. Suomalaisen homemallin homeindeksiluokitus (Tampereen yliopisto N.d.).	13
Kuvio 4. Homehtumisherkkyyssluokat (Tampereen yliopisto N.d.).	14
Kuvio 5. Kosteuden siirtyminen materiaalissa (Siikanen 2014, 77).	17
Kuvio 6. Insinööritieteiden suuntauksia ja lopputuloksia (Tang 2021, 24).	26
Kuvio 7. Kosteuskuvaaja; puukuitueriste, tammikuu	29
Kuvio 8. Kosteuskuvaaja; kivivilla, tammikuu	30
Kuvio 9. Kosteuskuvaaja; PU PIR, mitoitustilanne	30
Kuvio 10. Ilmansuunta kallistus ja korkeus	32
Kuvio 11. Komponenttien alkuarvot	33
Kuvio 12. Alkuolosuhteet	33
Kuvio 13. Säämalli, Jyväskylä	34
Kuvio 14. Sisäilmasto, ISO 13788	35
Kuvio 15. Kondensaatioisuuden kuvio.	37
Kuvio 16. Suhteellinen kosteus.	38
Kuvio 17. Homeindeksi, Puukuitueriste. Eristeen ulkopinnassa.	40
Kuvio 18. Homeindeksi, mineraalivillaeriste. Eristeen ulkopinnassa.	40
Kuvio 19. Homeindeksi, Polyuretaanieriste. Eristeen ulkopinnassa.	40
Kuvio 20. Kosteuslähteet (RIL 250-2020 2020).	43

Työssä käytetyt käsitteet

Alipaine paine, joka on pienempi kuin ulkona vallitseva ilmanpaine (Denut 2023).

Absorptio Nesteen tai kaasun sitoutuminen toisen aineen sisäosiin (Tieteen termipankki 2025).

Sorptio kaasun tai nesteen liikkuminen toisesta aineesta (Siikanen 2014).

Desorptio kaasun tai nesteen poistuminen toisesta aineesta (Siikanen 2014).

Diffuusio Diffuusiossa kaasut pyrkivät tasoittamaan pitoisuutensa rakenteen läpi, ja nopeus kasvaa lämpötilan mukana. Ilmanpaine-ero ei vaikuta diffuusioon. Rakenteissa vesihöyry on yleisin ongelmakaasu, mutta myös CO₂ voi sitoutua rakenteisiin (Siikanen 2014, 70–71; L Lindberg, Niemelä, Vinha 1996, IV, 4.)

Hygroskooppisuus Huokoisen materiaalin ominaisuus sitoa ilmankosteutta itseensä (Tieteen termipankki 2025).

Hengittävä rakenne Hygroskooppinen rakenne, joka suurella tehollisella kosteuskapasiteetillaan kykenee tasaamaan ilmankosteutta, vastaanottamaan ja luovuttamaan (Siikanen 2012, 87).

Höyrynsulku Ainekerros, joka on tarkoitettu estämään vesihöyryn haitallinen siirtyminen diffuusiolla sisätiloista rakenteiden läpi ulospäin. Höyrynsulkuna voi toimia mikä tahansa tiivis ja yhtenäinen materiaali, kunhan sillä on riittävän suuri vesihöyrynvastus. Tarkoituksellinen höyrynsulku tehdään rakennuksissa sisäpuolelle. (RIL 255-1-2014 2014, 41.)

Ilmanläpäisykerroin Kuvaa ilman tilavuusvirtaa, joka kulkee kohtisuorasti pinta-alayksikön läpi, kun paine-ero ainekerroksen molemmilla puolilla on 1 pascal. Sen yksikkö on m³/(m²sPa).

Ilmansulku Ainekerros, joka estää haitallisia ilmavirtoja rakenteen läpi (RIL 107-2022, 217).

Konvektio on lämmön siirtymistä liikkuvan nesteen tai kaasun, kuten ilman, mukana (RIL 107-2022, 24).

Kyllästymiskosteus materiaalin suurin mahdollinen kosteuspitoisuus (Siikanen 2014).

Lämmönjohtavuus, λ-arvo Kuvaa materiaalin kykyä johtaa lämpöä. Materiaalit, joilla on matala lämmönjohtavuus, toimivat eristeinä ja estävät lämmön siirtymistä, mikä parantaa energiatehokkuutta (Siikanen 2012, 78.)

Lämmönläpäisykerroin, U-arvo Kertoo, kuinka paljon lämpöä siirtyy rakenteen läpi pinta-alayksikköä kohti (Siikanen 2012, 79).

Tuuletusväli Rakenteessa oleva yhtenäinen rako, jossa ilma pääsee kulkemaan. Raon maksimi paksuus on 0,2 m (RIL 250-2020 2020, 111.)

Vesihöyrynläpäisevyys Kertoo, kuinka paljon vesihöyryä kulkee materiaalin läpi tietyssä ajassa (RIL 107-2022, 222).

Vesihöyrynläpäisykerroin, Air permeability coefficient Kertoo, kuinka helposti vesihöyry pääsee materiaalin läpi. Mitä suurempi kerroin, sitä helpommin höyry kulkee. Osapaineeseen perustuvan kertoimen yksikkö on $\text{kg}/(\text{m}^2\text{sPa})$. (RIL 107-2022, 222.)

Vesihöyryvastus kertoo, kuinka hyvin materiaali estää vesihöyryn kulun sen läpi. Se on vesihöyrynläpäisykertoimen käänteisarvo (RIL 107-2022, 222–223.)

Ylipaine paine, joka on suurempi kuin ulkona vallitseva ilmanpaine (Denut 2023).

R&D Research and Development eli tutkimus- ja kehitystoiminta viittaa systemaattiseen toimintaan, jonka tavoitteena on uuden tiedon tuottaminen sekä innovaatioiden kehittäminen tai parantaminen (OECD 2015, 44).

1 Johdanto

1.1 Työn taustaa

Rakennusten energiatehokkuus, kosteustekninen toimivuus ja pitkäikäisyys ovat keskeisiä vaatimuksia nykyaikaisessa rakentamisessa. Väestön määrän kasvaessa on rakentamisen oltava myös nopeaa. Eristemateriaalien valinnalla ja niiden teknisillä ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus tuulettumattoman, eli tuuletusvälittömän rakenteen toimintaan sekä lämpöteknisestä että kosteusteknisestä näkökulmasta. On nähty tarpeelliseksi tutkia kolmen eri eristemateriaalin – puukuitueristeen, kivivillan ja polyuretaanipohjaisen PIR-eristeen käyttäytymistä osana puu-sandwich-elementtirakennetta.

Rakenteen tuulettumattomuus asettaa erityisiä vaatimuksia käytettävälle lämmöneristeelle, sillä ilmanvaihdon puuttuessa kosteuden hallinta ja lämmöneristyksen tehokkuus korostuvat. Virheellisesti valittu toimiva eristemateriaali voi johtaa kosteuden kertymiseen rakenteeseen, mikä puolestaan lisää homehtumis- ja kosteusvaurioriskiä, jotka voivat heikentää sisäilman laatua ja rakenteen kestävyyttä. Siksi on tärkeää tarkastella eristemateriaalien teknisiä ominaisuuksia sekä niiden käyttäytymistä osana kokonaisuutta eri vuodenaikojen vaihtelevissa olosuhteissa.

1.2 Toimeksiantaja - Siparila Oy

Siparila Oy on puunjalostusteollisuuden osakeyhtiö. Toimialaan kuuluu puun sahaus, höyläys ja kyllästämisen. Yritys on perustettu vuonna 2003, ja sen tavoitteena on kehittää rakentamista helpottavia ja kestävä kehityksen mukaisia puutuotteita. Siparila on erikoistunut valmiiksi pintakäsiteltyihin sisustus- ja ulkoverhouspaneeliin, joista tunnetuimpia ovat piilokiinnitettävät TOPCOAT®-ulkoverhouspaneelit ja Vire-sisustuspaneelit.

Yritys panostaa vahvasti laatuun, työyhteisön hyvinvointiin ja asiakaslähtöiseen tuotekehitykseen. Siparila on ollut edelläkävijä palosuojattujen puupaneelien ja täysin valmiiksi maalattujen tuotteiden valmistuksessa. Vuonna 2020 Siparila yhdisti voimansa virolaisen Thermory AS:n kanssa vahvistaakseen kansainvälistä kilpailukykyään ja laajentaakseen tuotevalikoimaansa.

Yritys on laajentanut toimintaansa Vaajakosken pääkonttorin lisäksi muualle Suomeen. Parkanossa sijaitsee tehdas, jossa valmistetaan erityisesti sisustuspaneeleita ja listoja. Lisäksi Siparila osti vuonna 2010 Parkanon Höyläämön, mikä vahvisti sen asemaa massiivipuulistojen valmistuksessa. Yrityksen kasvu ja kansainvälistyminen ovat lisänneet myös vientitoimintaa, ja suomalainen tiheäsyinen puu on herättänyt kiinnostusta muun muassa Kanadassa ja Euroopassa. (Siparila N.d..)

1.3 Kestävä kehitys

Kestävä kehitys on jatkuvaa ja ohjattua yhteiskunnallista muutosta ja toimintamalleja, joiden tavoitteena on turvata hyvät elinolosuhteet nykyisille ja tuleville sukupolville. Kestäväkehitys pyrkii huomioimaan tasavertaisesti ympäristön, ihmiset ja talouden. Käsitettä käsiteltiin ensimmäisen kerran YK:n Brundtlandin komissiossa vuonna 1987, minkä jälkeen se on kehittynyt ja laajentunut kansainvälisesti, valtioissa ja kunnissa. (Ympäristöministeriö 2023.)

Siparilan Oy:n puu- ja lämpöpuutuotteet edistää Agenda 2030 tavoita monilta osin. Siparilan sandwich-elementti tukee **ekologisesti** kestävä kehitystä pyrkiessään kestäviin rakennusratkaisuihin tuottamalla rakennusmateriaaleja, joiden ympäristökuorma on pieni ja haittojen syntyä on vähennetty, kuten lämpöpuu, sillä sen valmistuksessa ei käytetä kemikaaleja ja on itsessään hiilinegatiivinen tuote. Materiaalina puu on kestävässä käytössä hiilinielun lisäksi uusiutuva materiaali. Siparilan tukit tulevat PEFC-järjestelmän metsistä. (ympäristöministeriö 2023; Siparila N.d..)

Sandwich-elementin ideana on pystyä tuottamaan myös nopeasti edullisia rakennuksia, jolloin asuntoja ja taloja voidaan saada vähävaraisimmillekin sosiaalisesti kestävä kehityksen mukaisesti (ympäristöministeriö 2023; Sojakka 2025).

CE-merkityillä korkealaatuisilla puutuotteilla pyritään saamaan pitkäikäinen turvallinen ja pitkän käyttöiän omaavia materiaaleja, joiden korjaus- ja huoltokustannukset ovat alhaiset, jolloin tuote on taloudellisesti kestävä. Myös kehittyneet pintakäsittely ja lämpömodifiointitavat pidentävät puun käyttöikä ja parantavat säänkestävyyttä, jolloin huollon tarve pienenee.

Vastuullisena toimijana Siparila Oy keskittyy innovatiivisten rakennusratkaisujen kehittämiseen, joiden avulla rakentamisen kustannuksia voidaan vähentää. Yrityksen tavoitteena on paitsi laskea hintatasoa, myös lyhentää työmaiden kestoja. Lyhyemmät rakentamisajat auttavat vähentämään pitkäaikaisten työmaiden aiheuttamia haittoja, kuten kosteusvaurioita, jotka syntyvät rakennusmateriaalien liiallisesta kastumisesta.

Lisäksi Siparila Oy panostaa siihen, että sen tuotteet täyttävät tiukat EU:n turvallisuusvaatimukset – tämä näkyy muun muassa CE-merkinnässä. CE-merkintä varmistaa, että tuotteet ovat testattuja ja luotettavia sekä suojaavat rakentajia ja rakennusten käyttäjiä mahdollisilta turvallisuusriskeiltä. Näin yritys edistää turvallista rakentamista ja huolehtii sekä asiakkaiden että työntekijöiden hyvinvoinnista.

Siparila Oy:n vastuullinen lähestymistapa yhdistää innovatiiviset teknologiset ratkaisut ja vastuullisen tuotannon, mikä tukee kestävä kehityksen periaatteita sekä ympäristön että talouden osalta. Tämä kokonaisvaltainen strategia tekee yrityksestä merkittävän toimijan alalla, joka toimii sekä kustannustehokkaasti että turvallisuutta edistäen. (Siparila N.d..)

Sandwich-elementin vastuullisuus resonoi vahvasti Agenda 2030 useamman tavoitteen kanssa, erityisesti tavoitteilla: 9. kestävä infrastruktuuri, edistää osallistumista ja kestävä teollistumista sekä kannustaa innovaatioihin ja 12. kestävä kulutus ja toiminta mallit (United Nations General Assembly 2015, 14, 20, 22).

1.4 Työn tavoitteet

Työn tavoitteena on selvittää tarkastella ja vertailla eri eristemateriaalien soveltuvuutta sandwich-elementissä. Tavoitteena on selvittää pyydettyjen eristemateriaalien lämpö- ja kosteusteknistä toimivuutta. Työllä pyritään tuottamaan tietoa, joka tukee materiaalivalintoja ja rakenteiden suunnittelua. Työn tavoitteet kerrotaan tarkemmin kappaleessa 3.1 ja rajaukset kappaleessa 3.2.

Opinnäytetyön tarkoituksena on tuottaa vertailukelpoinen analyysi eri eristemateriaalien soveltuvuudesta osaksi puu-sandwich-elementtiä. Tulosten pohjalta työn tilaaja voi halutessaan tehdä perusteltuja päätöksiä rakenteen kehityksen ja jatkokehityksen suuntaan.

2 Kosteus rakenteissa ja vauriomekanismit

Rakenteissa liian korkea kosteuspitoisuus sekä suhteellinen kosteus yhdessä lämpimien rakennusten lämpötilan kanssa liian pitkänä aikoina muodostaa kohonneen riskin mikrobi- ja homekasvustolle. Mikrobit ja homeet voivat vahingoittaa rakenteita sekä niiden aineenvaihdunnasta aiheutuvat emissiot heikentävät sisäilmaa ja voivat olla terveydelle äärimäisen haitallisia (RIL 250-2020 2020, 209).

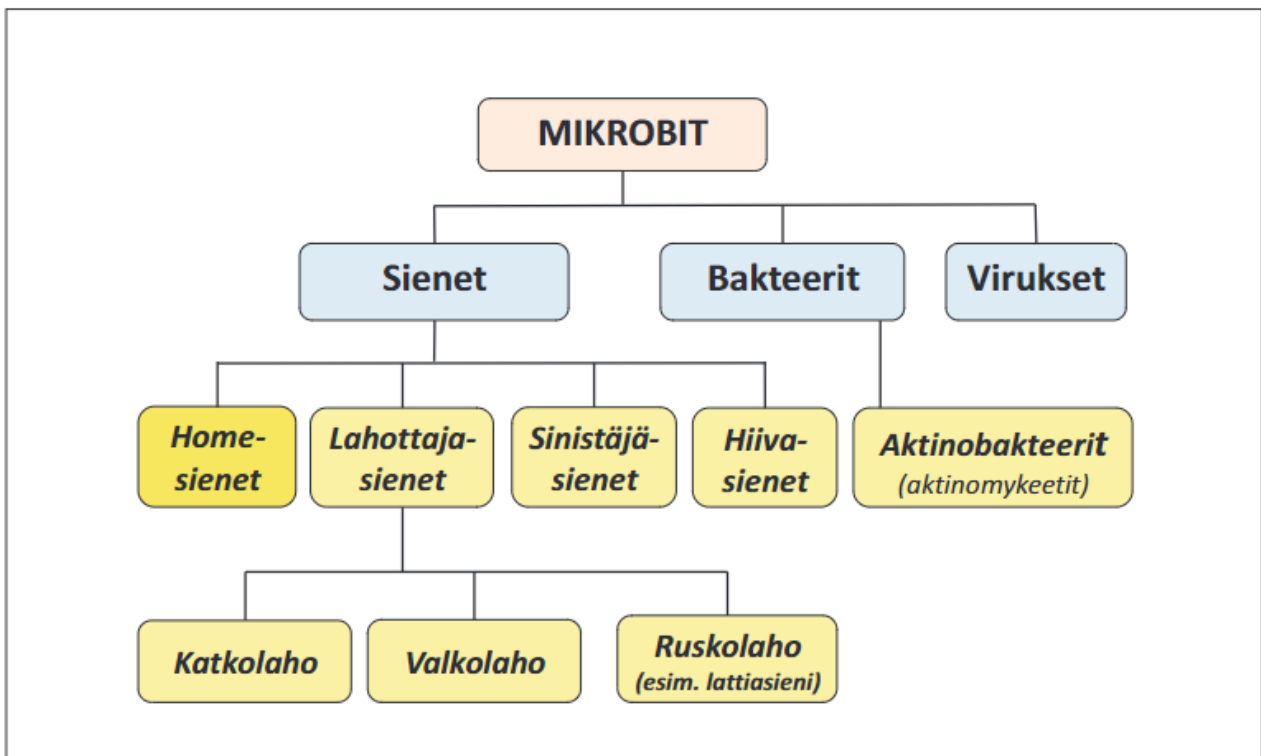
Ilmastonmuutoksen ennustettuna seurauksena rakenteille haitallisten sääolosuhteiden oletetaan kasva lisääntyvän suomessa. Lisääntyvä sade, lämpötilan nousu erityisesti talvella ja useammat sään ääriolosuhteet lisäävät absoluuttista kosteutta ilmassa (Vinha, Laukkarinen, Mäkitalo, Nurmi, Huttunen, Pakkanen, Kero, Manelius, Lahdensivu, Köliö, Lähdesmäki, Piironen, Kuhno, Pirinen, Aaltonen, Suonketo, Jokisalo, Koskenvesa & palolahti 2023, 2; Ilmatieteenlaitos N.d.).

Energiavaatimuksista johtuva lämmöneristeen lisäys ja ilmastonmuutoksen aiheuttama suhteellisen kosteuden nousu heikentävät monien nykyisten rakennetyyppien kosteusteknistä toimivuutta ja lisäävät kosteudesta johtuvien vikojen määriä. Paksummat eristekerrokset lisäävät kondensoitumisriskiä, mikä kasvattaa homehtumisriskiä. Kosteuden ollessa ulkopinnasta katsottuna syvemmällä eristeessä myös rakenteisiin tiivistyneen ja absorptoituneen kosteuden kuivuminen hidastuu (Vinha ym. 2023, 2).

Rakenteiden käyttöikätaavoitteen ollessa kantavilta osilta vähintään 50 vuotta on rakenteen toimivuus syytä arvioida toimimaan myös tulevaisuudessa sääolosuhteissa. On arvioitu, että Suomen olosuhteet 10 vuoden kuluttua muistuttavat Etelä-Ruotsin tämänhetkisiä olosuhteita. Etelä-Ruotsissa tehdyn, insinööritieteiden korkeakoulun vuonna 2012 julkaiseman tuloksen mukaan ulkoseinät, joissa lämmöneristettä on enemmän kuin riittävästi, ovat herkkiä home- ja kosteusvaurioille (Vinha ym. 2023, 2, 38, 62.)

2.1 Rakenteiden homehtuminen

Mikro-organismit, eli mikrobit ovat eläviä organismeja, tyypillisesti yksisoluisia eliöitä, jotka ovat niin pieniä, ettei yksittäistä mikrobia ihmissilmä kykene ilman suurentavia linssejä erottamaan. Mikrobeja on monia erilaisia (Mikrobit 2006). Sienet, virukset ja bakteerit on tyypillisiä. Niiden lisäksi on myös alkueläimet ja levät. Sieniä on monenlaisia, home-, lahottaja-, sinistäjä- ja hiivasieniä (Kuvio 1) (RIL 250-2020 2020). Jäkälät ja mykorritsat ovat myös sieniä (Mikrobit 2006; THL 2023). Kosteudesta voi seurata myös lahottajasieniä, jotka eivät ole kuitenkaan homesieniä, vaan oma ryhmänsä (Ojala 2013, 16.)

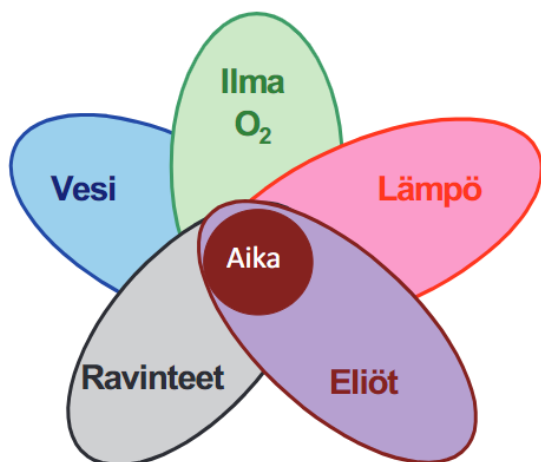


Kuvio 1. Mikrobit (RIL 250-2020 2020).

Sienet voivat jo alkaa kasvamaan rakenteissa ilman suhteellisen kosteuden ollessa 75 %. Sienilajeja on monia ja myös niiden vaatimia kasvuolosuhteita. Jotkin lajit vaativat suurempia kosteuksia kuin toiset. Myös lämpötilalla on merkitystä sienien kasvuun. Rakenteissa homeet ja sienet voivat tuottaa vakavia terveys ongelmia päästyään sisäilmaan (Reijula 1996). Jotkin homesienilajit tuottava muun muassa mykotoksiineja, jolla on erittäin vakavia terveysvaikutuksia (Fromme, Gareis, Völkel & Gottschalk 2016). Esimerkkinä nostettu *Stachybotrys atra*, jonka minimi lämpötila on jo pari lämpöastetta 0°C yläpuolella ja minimi RH 93 % sekä *Aspergillus versicolor* jolla minimi lämpötila on +5°C ja minimi RH jo 75 %. Muun muassa nämä kaksi homesienilajia voivat aiheuttaa voimakkaista toksisia reaktioita (Fromme, Gareis, Völkel & Gottschalk 2016; Reijula 1996.)

Homeita ja muita mikrobeita on luonnollisesti pieniä määriä eri pinnoissa ja ilmassa. Liian suuret määrät väärissä paikoissa tuottaa vasta merkittävimpiä ongelmia ja vaivoja (Ojala 2013, 23; Mölsä 2022, 129). Rakennuksissa mikrobit voivat olla pintamateriaalin mukaan lauhkeita ja lähes vaarattomia tai karummilla kasvualustoilla olevat jo pienet homeet määrät voivat muuttua tuottamaan vaarallisempia aineita muita mikrobeja ja ihmisiä vastaan (Mölsä 2022, 129).

Jotta mikrobit voivat kasvaa, on niiden kasvuedellytysten täytyttävä. Tärkeimpiä tekijöitä siihen on kosteus, eli vesi ja kyseiselle mikrobille sopiva lämpötila (Kuvio 2). Muita tekijöitä ovat ilma ja sen happi, ravinteet ja riittävän pitkä aika. Kosteudella ja lämpötilalla on merkitystä, kuinka kauan aikaa kasvaminen vaatii. Hapen saanti on harvoin rajoittava tekijä mikrobeille rakenteissa. Ravinteita



Ympäröivän mikroilmaston minimikosteusolot:

Kriittinen suhteellinen kosteus rakennusmateriaalien pinnassa saavutetaan, kun ilman suhteellinen kosteus on pitkään yli 75–100 % RH

- home > 75–80 % RH
- laho > 95 % RH
- bakteerit > 95–99 % RH
- hyönteiset > 65–80 % RH.

Orgaanisten materiaalien (esim. puun) kosteuspiitoisuus (u % kuivapainosta):

- home > u 18–20 % (80–90 % RH)
- laho > u 25–30 % (95–100 % RH)
- laholle suotuisin kosteus u 50–80 %

Lämpötila +5 (-5)...+50 °C

Kuvio 2. Materiaalien vaurioitumisen kriittiset tekijät. (RIL 250-2020 2020)

home saa helposti, sille riittää jo sisäilmasta nurkkiin kertynyt pöly tai sahanpuru rakenteissa (Ojala 2013, 24; RIL 250-2020 2020, 227.) Homesienien kasvulle otollisten ja epäotollisten olosuhteiden ajan pituuksilla ja vaihteluväleillä on merkitystä. Homeet sietävät mieluummin tilanteita, joissa kostea ja kuiva aika vaihtelee nopeammin. Sen sijaan, jos kuivat jaksot ovat pitkiä ja kosteita aikoja esiintyy alle vuorokauden mittaisina, hidastuu homeiden kasvu merkittävästi (Kokko, Ojanen, Salonvaara, Hukka & Viitanen 1999, 35.)

Laskettaessa seinärakenteen homeiden, sekä mikrobien kasvamista voidaan se toteuttaa TTY:n ja VTT:n kehittämän laskennallisen suomalaisen homemallia käyttäen. Suomalainen homemallin pohja on VTT:n kehittänyt puumateriaalien homemalli. Tällä tämän hetken kehittyneimmän homehtumisriskiä arvioivan työkalun avulla voidaan mikrobien ja homeiden kasvua erilaisilla pinnoilla. Laskelmissa työkalun funktioina ovat muuttuvat lämpötila- ja kosteusolosuhteet.

Homemallissa lasketaan tunnin välein homeindeksi, joka on materiaalin homehtumisesta kertova vertailuarvo. Homeindeksi, M kulkee välillä 0–6, jossa 0 tarkoittaa puhdasta pintaa ja 6 on lähes 100 % homekasvuston peitossa (Kuvio 3). Homeindeksistä voi huomata, että puolivälissä vasta on silmin havaittava kasvu (Tampereen yliopisto N.d..)

Homeindeksi M	Havaittu homeenkasvu	Huomautuksia
0	Ei kasvua	Pinta puhdas
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu	Paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma
2	Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	Homerihmasto peittää 10 % tutkittavasta alasta (mikroskoopilla). Useita rihmastopesäkkeitä muodostunut.
3	Silmin havaittava kasvu Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	Alle 10 % peitto alasta (silmillä) Alle 50 % peitto alasta (mikroskoopilla) Uusia itiöitä alkaa muodostua
4	Selvä silmin havaittava kasvu Runsas mikroskoopilla havaittava kasvu	Yli 10 % peitto alasta (silmillä) Yli 50 % peitto alasta (mikroskoopilla)
5	Runsas silmin havaittava kasvu	Yli 50 % peitto alasta (silmillä)
6	Erittäin runsas kasvu	Lähes 100 % peitto, tiivis kasvusto

Kuvio 3. Suomalaisen homemallin homeindeksiluokitus (Tampereen yliopisto N.d.).

Materiaalin taipumusta homehtua voidaan arvioida sen perusteella, kuinka helposti home alkaa kasvamaan, kuinka voimakkaaksi kasvu kehittyy ja kuinka nopeasti se vähenee, kun olosuhteet muuttuvat suotuisista epäsuotuisiksi. Materiaalit voivat olla hyvin herkkiä tai kestäviä homehtumisherkkydeltään (kuvio 4). Materiaalit voivat vaihdella merkittävästi homehtumisherkkyytensä suhteen – osa on erittäin alttiita homekasvulle, kun taas toiset kestävät sitä paremmin (kuvio 6). Yleisesti ottaen voidaan todeta, että mitä nopeammin homesienet alkavat kasvaa materiaalin pin-

nalla, sitä korkeammaksi homeindeksi voi nousta. Vastaavasti, jos olosuhteet muuttuvat epäsuotuisiksi homeen kasvulle, homesieni reagoi nopeasti myös taantumalla ja häviämällä (Tampereen yliopisto N.d..)

Homehtumisherkkyyssluokka		Rakennusmateriaalit
HHL1	Hyvin herkkä	Karkeasahattu ja mitallistettu puutavara (mänty, kuusi ja lehtipuut), höylätty mänty, koivuvaneri, käsittelemätön huokoinen puukuitulevy, kartonkipintainen kipsilevy
HHL2	Herkkä	Höylätty kuusi, paperipohjaiset bitumoidut/käsitellyt tuotteet ja kalvot, puupohjaiset liimatut levyt, havuvaneri, bitumoitu/käsitelty huokoinen kuitulevy
HHL3	Kohtalaisen kestävä	Mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiilet, kuitusementtilevy, lasikuitupintainen kipsilevy
HHL4	Kestävä	Lasi ja metallit, alkalinen uusi betoni, tehokkaita homesuoja-aineita sisältävät materiaalit

Kuvio 4. Homehtumisherkkyyssluokat (Tampereen yliopisto N.d.).

2.2 Kosteus rakenteessa

Kaiken ympärillä oleva ilma ja lähes kaikki materiaalit sisältävät kemiallisesti sitoutumatonta vettä, joka on kaasumaisessa muodossa. Tämä kosteus on vesihöyryä. Rakenteet sisältävät kosteutta valmistuttuaan ja eri aineilla on eri kosteuspitoisuuksia jo valmistuksesta ja säilytyksestä johtuen. (Siikanen 2014, 65.)

Ilman kosteus

Ilmassa vesihöyryn määrä voidaan mitata ja kosteuden määrä sitten ilmoittaa prosentteina, suhteellisenä kosteutena. Ilman suhteellisen kosteuden määrä eri lämpötiloissa ja lämpötila missä ilman suhteellisen kosteuden vesihöyryn määrä tiivistyisi vedeksi voidaan laskea, tarvitaan *kaasujen tila yhtälöä* kaava 1 (Siikanen 2014, 68.)

$$p * V = \frac{m}{M} * R * T \quad (1)$$

missä: p = kaasun(vesihöyryn)paine

[Pa]

V = kaasun tilavuus	$[m^3]$
m = kaasun massa	$[kg]$
M = kaasun normaalipaino	$[kg/mol]$
R = Yleinen kaasuvakio	$[8314,3J/mol * K]$
T = lämpötila	$[K]$

Vesihöyryn määrä ilmassa ilmoitetaan grammoina suhteessa yhden kuutiometrin kokoiseen tilavuuteen. Se määrä on absoluuttinen kosteus. Kaasujen tilayhtälö sisältää lämpötilan, T, eli ilman lämpötila vaikuttaa ilman kykyyn sitoa vesihöyryä. Lämpimämpään ilmaan voi sitoutua enemmän vesihöyryä, ennen kuin ilma on täysin vesihöyryllä kyllästetty (Siikanen 2014, 68.)

kosteus

Kun puhutaan kosteudesta esimerkiksi rakenteissa, puhutaan tyypillisesti suhteellisesta kosteudesta, RH. Lyhenne tulee englannin kielestä *Relative humidity*. Suhteellinen kosteus on prosentti suhdeluku, ilman absoluuttinen kosteus suhteessa kyllästymiskosteuteen. Suhteellinen kosteus on välillä 0 % - 100 %. Kosteusmäärä ei voi kasvaa kyllästymiskosteutta korkeammaksi, vaan kosteus alkaa tiivistymään siinä tapauksessa vedeksi. Korkea suhteellinen kosteus ei itsessään kerro montako grammaa ilmassa on kosteutta (Siikanen 2014, 69–70.)

Konvektio

Konvektiona rakenteisiin siirtyvä kosteus tarkoittaa kaasun, yleisesti ottaen ilman sisältämän vesihöyryn pääsyn rakenteisiin. Jotta kaasut voivat siirtyä rakenteisiin on rakenteiden oltava huokoisia ja niillä on oltava heikko ilmanläpäisykerroin. Tyypillisissä rakenteissa merkittävimpiä paikkoja konvektiolla siirtyvälle kosteudelle reiät ja halkeamat ilmansulkumateriaalissa, joista kylmyyseroista johtuva paine-ero vetää ilmaa rakenteen läpi (Siikanen 2014, 72.)

Diffuusio

Puurakenteissa kosteus siirtyy pääasiassa diffuusion kautta silloin, kun rakenteen pinnat ovat suljettuja, eikä niissä ole huokoisia materiaaleja. Mikäli rakenteen vesihöyrynvastus on alhainen, kuten tyypillisesti puukuituisilla materiaaleilla on, mahdollistaa rakenne vesihöyryn kulun rakenteisiin ja niistä pois diffuusion välityksellä. Tämä ”hengittävyys” on mahdollista myös silloin, kun rakenne on ilmatiivis eli rakenteessa ei ole ilmavuotoja (Siikanen 2014, 71.)

Kapilaarinen siirtyminen

Kapillaarivirtaus tarkoittaa nesteen siirtymistä huokoisessa materiaalissa, mikä johtuu huokoisali-paineen paikallisista eroista. Kapillaarisen vedenliikkeen taustalla on rakenteen ja sen eri aineker-rostien pyrkimys saavuttaa kapillaarinen tasapainokosteus. Puu, tiilet, harkot ja muut huokoiset ra-kennusmateriaalit imevät vettä huokostensa kautta, mikä mahdollistaa kosteuden siirtymisen rakenteessa.

Rakennesuunnittelussa kapillaarisen kosteuden nousu on yleensä estettävä käyttämällä esimer-kiksi muoveja, bitumisivelyä, tiiviitä kapillaarikatko kerrosta tai puun päätysulkemista. Toisaalta kapillaarinen vedenliike voi olla hyödyllistä esimerkiksi puurakenteissa, joissa se voi edistää raken-teen kosteusteknistä toimivuutta (RIL 255-1-2014 2014, 390.)

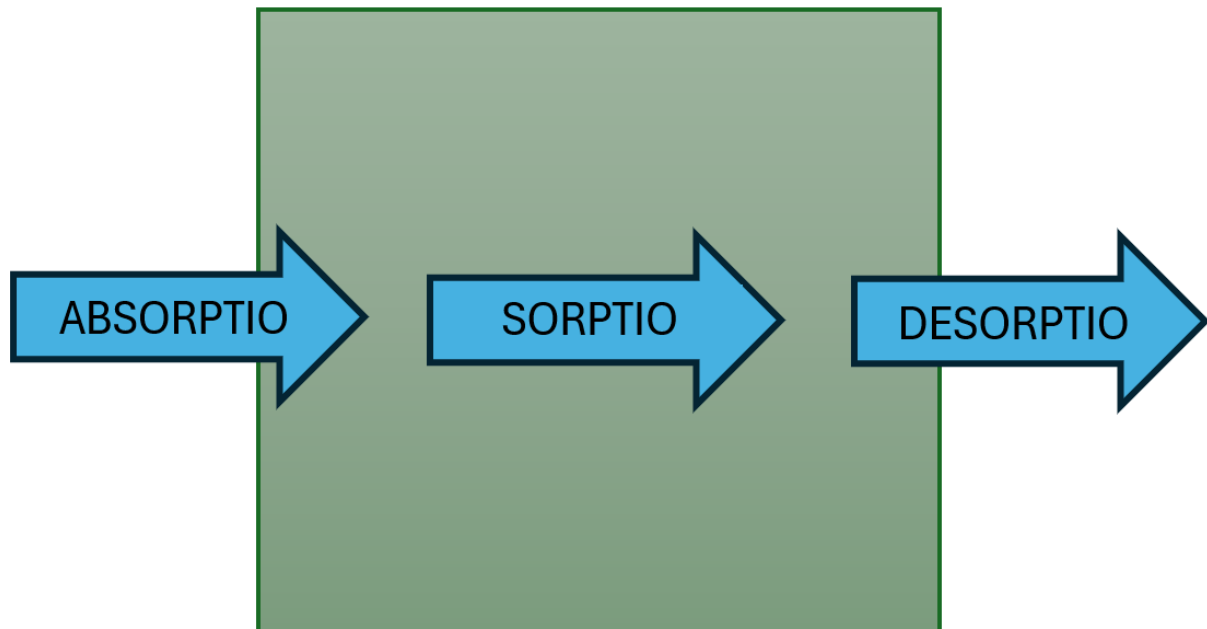
Kondensoituminen

Kondensoituminen eli tiivistyminen tarkoittaa ilmaan sitoutuneen vesihöyryn muuntumista ve-deksi materiaaliin tai sen pintaan. Kondensoituminen on mahdollista siinä vaiheessa, kun ilman ve-sihöyrynpitoisuus saavuttaa 100 % kyllästyskosteuspitoisuuden (RIL 255-1-2014 2014, 390.) Raken-teissa se tarkoittaa sitä, että ilman vesihöyry voi tiivistyä riittävän kylmille pinnoille (Siikanen 2014, 72).

Aineen kosteus

Kuten ilmassa oleva kosteus, on materiaaleissa myös niihin sitoutunutta kosteutta. Tämä kosteus voidaan ilmaista prosentteina kuivapainosta tai tilavuus prosenttina. Aineen kosteus voidaan il-maista myös tasapainokosteutta hyödyntäen. Aineeseen ulkoisten voimien vaikutuksesta kosteus

pääsee siirtymään. Kuviosta 5 nähdään, että kun kosteus imeytyy aineeseen, kyseessä on absorptio. Kosteuden liikkuminen aineen sisällä on sorptiota ja poistuminen aineesta on desorptiota (Siikanen 2014, 77.)



Kuvio 5. Kosteuden siirtyminen materiaalissa (Siikanen 2014, 77).

Hygroσκοoppinen tasapainokosteus

Siikasen (2014, 77) mukaan kaikki materiaalit pyrkivät saavuttamaan tasapainokosteuden ympäröivän kosteuden kanssa. Tämä kosteus, jonka eri materiaalit voivat sorptoida materiaalia ympäröivästä kosteudesta on hygroσκοoppista kosteutta. Materiaaleilla on hyvin erilaisia hygroσκοoppisia ominaisuuksia. Puukuituiset materiaalit voivat sorptoida paljon kosteutta eli niillä on suuri hygroσκοoppisuus.

Materiaalin ja sitä ympäröivän ilman kosteus vaikuttavat siihen absorptoiko vai desorptoiko materiaali kosteutta. Materiaalit, joiden hygroσκοoppinen kosteuden sitomiskyky on suuri absorptoida suurempia kosteusmääriä ilman, että rakenteen toimivuus heikkenee kosteuden takia (RT 103528 2023, 6.)

Kapillaarinen tasapainokosteus

Kapillaarinen tasapainokosteus on kosteuspitoisuus, minkä materiaali lopulta saavuttaa ja mihin kosteuden nousu pysähtyy, kun materiaali on kosketuksessa veteen. Kapillaarisen tasapainokosteuden saavuttaminen vie eri ajan materiaalin mukaan. Huokoiset ja hyvin vesihöyryä läpäisevät materiaalit saavuttavat tasapainotilan nopeammin, kuin suljetut materiaalit (Siikanen 2014, 77).

RT 103528 (2023, 6.) sanotaan, että materiaaleissa vesi imeytyy korkeudelle, jossa huokosalipaine ja painovoimien voimat ovat tasapainoisia. Rakenteissa veden kapillaarista nousukorkeutta rajoittaa myös veden haihtuminen.

Rakennuskosteus

Rakennuksissa on tyypillisesti ylimääräistä kosteutta. Tämä johtuu useista syistä. Syitä ovat muun muassa varastointi, esivalmistus tai rakentamisvaiheessa tullut kosteus. Rakennuskosteuden määrään voidaan vaikuttaa kuivattamalla ja tarkistamalla materiaalin kosteuspitoisuutta, sekä käyttämällä riittävää suojausta. Jotta kosteusvaurioilta vältyttäisiin, tulisi rakenteet suunnitella ja toteuttaa kosteusteknisesti paikkaan soveltuviksi. Rakennuskosteus tulisi saada hallintaan ennen käyttöä (Siikanen 2014, 78–79.)

Kosteuskapasiteetti

(Siikasen 2014.) mukaan rakennuksen kosteuskapasiteetti tarkoittaa kykyä ja määrää, minkä eri aineet pystyvät absorptoimaan ja desorptoimaan kosteutta. Erityisesti puurakenteet hyötyvät suuremmasta kosteuskapasiteetistaan. Puupohjaisissa rakenteissa, missä vesihöyrynvastus on pieni, on isolla kosteuskapasiteetilla merkitystä seinärakenteen kosteustekniseen toimivuuteen. Kosteuskapasiteetti tasauttaa diffuusiolla vesihöyryä seinärakenteen läpi.

Pumppuvaikutus

Pumppuvaikutus on kaasujen tilayhtälöstä seuraava ilmiö. Ilmiössä lämmin ilma nousee ja poistuu rakenteiden läpi ja kuljettaa samalla lämpimään ilmaan sitoutunutta kosteutta ja lopulta tuulettuu

viileämpään ulkoilmaan siirtäen kosteuden pois rakennuksesta. Ilmiö toimii erityisen hyvin puupohjaisilla ja korkean kosteuskapasiteetin omaavilla rakenteilla. Pumppuvaikutus voi viilentää ja kuivattaa rakennuksia (Sikanen 2014, 79–80.)

”hengittävä rakenne”

Hengittävä rakenne on diffuusioavoin, jolloin eri kaasut, kuten hiilidioksidi ja vesihöyry pääsevät kulkemaan rakenteen läpi. Rakenne on kuitenkin tiivis, jolloin sen läpi ei kulje ilmavirtoja eli ei tapahdu konvektiovirtausta.

Seinärakenteissa, erityisesti puukuituisella lämmöneristeellä toteutetuissa ratkaisussa rakenteen sisäpuolella vesihöyrynvastuksen olisi hyvä olla 5:1 suhteessa ulkopuolen vesihöyrynvastukseen. Puupohjaisilla materiaalien suuri kosteudensitomiskapasiteetti hidastaa kondensoitumisen alkuaan, mutta lopulta sitoutunut suuri kosteusmäärä kasvattaa kondensoitumisriskiä. (Käkelä, Vinha 1999, 77.)

2.3 Lämpö rakenteessa

Lämpö siirtyy kolmella eri mekanismilla: säteilyn, johtumisen ja konvektion välityksellä. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaisesti lämpöenergia siirtyy aina kohti alhaisempaa lämpötilaa eli lämpimämmästä ja energiatiheämmästä tilasta kylmempään ja energiaköyhempään tilaan (Ghoshdastidar 2012, 3; Wong 2011.)

Lämmön siirtyminen säteilemällä

Säteilemällä eli emissiossa lämpöenergia siirtyy valon nopeutta kulkevalla vauhdilla elektromagneettisella aaltoliikkeellä. Elektromagneettisilla aalloilla on eri pituuksia. Säteilemällä siirtyvä lämpöenergia ei tarvitse väliainetta. (Ghoshdastidar 2012, 4–5; Siikanen 2014, 40.)

Lämmön siirtyminen konvektiolla

Konvektion on lämmönsiirtymisen ilmiö, jossa lämpöenergia siirtyy liikkuvan väliaineen, kuten nesteen tai kaasun kanssa. Kaasu rakennuksissa on tyypillisesti ilmaa. Konvektiossa lämpöenergia siir-

tyy kiinteistä pinnoista viereiseen liikkuvaan väliaineeseen. Konvektiossa on yhdistettynä konvektio ja väliaineen liike, jotka kuljettavat lämpöenergiaa tehokkaasti eteenpäin (Ghoshdastidar 2012; Wong 2011, 8-1.)

Konvektiota on kahden tyyppistä: Pakotettua konvektiota ja luonnollista eli vapaata konvektiota. Pakotetussa konvektiossa väliaine liikkuu autettuna tai pakotettuna, esimerkiksi tuulettimen, pumpun tai tuulen vaikutuksesta. Luonnollisessa konvektiossa väliaine siirtyy ilman ulkoisen voiman vaikuttamista väliaineeseen. Väliaineen liikkeen tässä tavassa voi saada aikaan eri lämpötiloista johtuvat väliaineen tiheyden erot, mikä saa aineet liikkumaan painovoiman vaikutuksesta.

Konvektion tehokkuutta laskelmissa kuvataan omalla lämmönsiirtokertoimellaan, (h) . Termi riippuu monista tekijöistä, kuten väliaineen virtausolosuhteista, pinnan geometriasta, ja lämmönjohtavuudesta. Konvektion kautta tapahtuvaa lämmönsiirtoa voidaan kuvata Newtonin jäähtymislaililla, jonka mukaan lämmön siirtymisen nopeus riippuu suoraan kiinteän pinnan ja sitä ympäröivän nesteen lämpötilaerosta (Ghoshdastidar 2012, 3–4; Wong 2011, 8-1-8-2.)

Lämmön siirtyminen johtumalla

Johtumalla eli konduktiolla siirtyvä lämpöenergia on materiaalissa tapahtuvaa molekyylien liikettä. Liike voi tapahtua kiinteissä aineissa, kaasuissa ja nesteissä. Rakenteissa, kuten seinissä lämpöenergia siirtyy muun muassa johtumalla. Lämpöenergian johtumiseen voimakkuuteen vaikuttaa materiaalin ominaisuudet. Lämmönjohtavuus voidaan laskea materiaaleissa varsin tarkasti. Esimerkiksi teräksellä on suurempi lämmönjohtavuuskerroin, kuin mänyllä ja mänyllä on suurempi lämmönjohtavuuskerroin kuin ilmalla. (Wong 2011, 8–1; Mestarin taulukot 2024, 8–9.)

Rakenteen lämmöneristävyys

Lämmöneristävyys perustuu rakenteen lämmöneristeeseen ja sen materiaalin lämmönjohtavuuteen. Lämmöneristeen pääasiallinen tehtävä on estää lämmön siirtyminen rakenteen läpi. Lämmöneristeiden eristyskyky perustuu eristeen sisällä paikallaan pysyvään kaasun lämmönjohtavuuteen.

Rakenteille saadaan laskettua *korjattu lämmönläpäisykerroin*, U_c , joka on rakennusosan lopullinen lämmönläpäisykerroin. Sitä termiä käytetään energiankulutuslaskelmissa, sekä osoitettaessa rakennuksen määräystenmukaisuus.

Korjattu lämmönläpäisykerroin, U_c voidaan laskea kaavalla 2:

$$U_c = U + \Delta U \quad (2)$$

missä: ΔU = lämmönläpäisykerroimen korjaustermi $\left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$

joka on $0 \text{ W}/(m^2 * K)$ pystysuorassa kiinnikkeettömässä seinäpinnassa, jonka eristystyö on tehty aukottomaksi.

U = rakennuksen lämmönläpäisykerroin $\left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$

Rakennuksen lämmönläpäisykerroin, U voidaan laskea kaavalla 3:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (3)$$

missä: R_T = rakennusosan kokonaislämmönvastus

Rakennusosan kokonaislämmönvastus, R_T voidaan laskea kaavalla 4:

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (4)$$

missä: R_{si} = Sisäpuolen pintavastus $\left[\frac{m^2 * K}{W}\right]$

$R_{1,2..n}$ = Rakennusosan ainekerrosten lämmönvastukset $\left[\frac{m^2 * K}{W}\right]$

R_{se} = Ulkopuolen pintavastus $\left[\frac{m^2 * K}{W}\right]$

Ainekerroksen lämmönvastus, R_n saadaan laskettua kaavalla 5:

$$R = d/\lambda_U \quad (5)$$

missä: d = ainekerroksen paksuus [m]

λ_U = ainekerroksen lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo $[\frac{W}{m \cdot K}]$

lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvot ovat taulukoituja ja valmistajien ilmoittamia arvoja (Siikainen 2014, 49–53.)

2.4 Lämmöneristeet

Lämmöneristeitä valmistetaan luonnonkuiduista, mineraalivillasta ja muovikuiduista. Massiiviset rakenteet toimivat itse lämmöneristeenä. (RIL255-1-2014 2014 260). tässä työssä käsitellään, puukuituista-, mineraalivillaista- ja polyuretaani PIR lämmöneristettä.

Puukuitueriste

Puukuitueristeet ovat pääsääntöisesti puuhakkeesta valmistettuja lämmöneristeitä. Puukuitueristeitä on erilaisissa muodoissa kuten, kovina tuulensuojalevyinä, pehmeämpinä eristelevyinä, sekä puhalluseristeeksi silputtuna (Hunton 2024). Materiaalina on esimerkkilevynä puukuituinen Huntonin eristelevy, joka muodostuu 81,2 % puuhakkeesta, 8,0 % vedestä, 8,1 % ammoniumfosfaattista sekä 2,7 % materiaalista on polyofiini kuiduista (Environmental product declaration 2015).

Eristemateriaali se voidaan kierrättää puukuituna (Hunton N.d.). Keski Suomessa, Mustankorkean kierrätyspiste ottaa ekovilla kuten selluvillaa sekajätelavalle vastaan (Mustankorkea N.d.). Puukuituinen eristelevy ja sen pöly on ihoa kutittamaton, eikä se aiheuta epämiellyttävää tunnetta hengitysteissä. Hunton eristelevylle on dokumentoitu palonkestävyysarvoja, jotka ovat testattuja eri akkreditoituissa laboratorioissa.

Puukuituisena, PEFC-sertifioituna hiiltä sitovana eristeenä eristemateriaali on uusiutuvasta raaka-aineesta valmistettu. Pehmeänä ja tiheänä kuituna puukuitueriste toimii hyvänä äänieristeenä (Hunton 2024.) Hunton puukuitueristelevyllä on valmistuksesta tulevia päästöjä (A1-A3) GWP: -2.38 kg/CO₂e eli valmistuksen osalta päästöt ovat negatiiviset (Environmental product declaration 2015).

Mineraalivilla (Kivivilla)

Kivivilla, joka on yhden tyyppinen mineraalivilla, on pääasiassa emäksisistä kivilajeista valmistettua lämmön eristettä. Se valmistetaan sulaa kiviainesta valuttamalla pyörivään linkopyörään, joka venyttää kiven kuiduiksi. Muovia hyödynnetään sideaineena eristelevyissä, jotta niiden kimmoisuus säilyisi käytön aikana. Rakennuseristeitä on saatavilla useissa eri muodoissa, kuten pehmeinä ja kevyinä levyinä, jäykkänä kuormitusta kestävässä levyissä, tuulensuojalevyinä sekä puhallusvillana, joita käytetään kohteen vaatimusten mukaan.

Mineraalivillalla on vesihöyrynläpäisevyys noin $60\text{--}200 \times 10^{10-12} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ ja sen kosteuspitoisuus on matala, 0,5 %kuivatilavuuspainosta. Mineraalivilloilla lämmöneristävyys laskee, kun kosteuspitoisuus kasvaa. Mineraalivilloilla on siis syytä käyttää riittävän tiiviitä, diffuusionkatkona toimivia ilmansulkumateriaaleja. (Siikanen & Siikanen 2014, 259–262.)

Mineraalivillojen valmistuksessa voidaan käyttää kuitujen osalta paljon kotimaisista raaka-aineista. Sideaineena käytettävää öljyä ei suomen maaperästä saa. Mineraalivillojen raaka-aineet ovat uusiutumattomia. (Siikanen & Siikanen 2009, 264.) Keskisuomessa, Mustankorkealla, mineraalivillat loppusijoitetaan ”kaatopaikan penkkaan” (Mustankorkea N.d.). Kivivillaeristeellä, jonka tiheys on 63 kg/m³ on CO₂datan mukaan päästöjä vaiheissa A1-A3 GWP: 1,4 kg/CO₂e (CO₂data.fi N.d.).

Polyuretaani (PIR)

Polyuretaani PIR eli polyisosyanuraatti on tehokas ja teknisesti kehittynyt lämmöneristemateriaali. Materiaali on kosteusteknisesti turvallinen. Lämmöneristävyydeltään materiaali on hyvä. Sen lämmönjohtavuus, λ_D on 0,022 W/(m²*K)

Eristettä valmisttaessa sen pääraaka-aineet MDI ja polyoli sekoitetaan porneaineen kanssa (Finnfoam N.d.) Materiaalien sekoituksen yhteydessä tapahtuu kemiallinen reaktio. Reaktion seurauksena syntyy lämpöä, jonka vaikutuksesta porneaine kaasuuntuu ja seos laajenee vaahdoksi, joka lopulta kovettuu. Vielä kovettumattomalla vaahdolla on hyvä tarttuvuus, jolloin eristemateriaali voidaan kiinnittää muihin materiaaleihin ilman erillistä liimausta (Siikanen & Siikanen 2009, 318.)

PIR-eristeen Lämmönjohtavuus on $0,022 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ja materiaalin nimellistiheys on $33 \text{ kg}/\text{m}^3$ eli materiaali on hyvin kevyttä suhteessa lämmöneristävyyteen (Finnfoam 2021, 4). Polyuretaani-eristeellä on CO₂datan mukaan päästöjä vaiheissa A1-A3 GWP: $4,2 \text{ kg}/\text{CO}_2\text{e}$ (CO₂data.fi N.d.).

2.5 Lämpömodifioitu puutavara

Lämpömodifioitu puutavara on lämmön ja kosteuden kanssa muovattua puuta. Jo 1930-luvulla saksassa on puun ominaisuuksia alettu muokkaamaan ja suomessa VTT ja YIT aloittivat 1980-luvulla puun lämpömodifiointi tutkimukset (Siikanen & Siikanen 2009, 66–67.)

Valmistusprosesseissa on hieman eri variaatioita, mutta käytännössä kolme eri vaihetta. Ensimmäisessä vaiheessa puun lämpötilaa nostetaan nopeasti noin $100 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaan, jonka jälkeen sitä vielä hieman nostetaan noin $130 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaan, jolloin puun kosteuspitoisuus putoaa lähelle nollaa. Toisessa vaiheessa puun lämpötila nostetaan yli $160 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaan (ja sitä pidetään siinä 2–3 tuntia). Viimeisessä vaiheessa puutavara jäädytetään vedellä ja sen kosteuspitoisuudeksi tulee 4–7 prosenttia (Siikanen & Siikanen 2009, 66–67.) Lämpömodifioinnin aikana tapahtuva erittäin merkittävä muutos on hygroskooppisten hemiselluloosapolymeerien hajoaminen, jonka seurauksena puun tiheys laskee (Herrera, Arrese, de Hoyos-Martinez, Labidi & Llano-Ponte 2018).

Lämpömodifioinnin aikaan saamat muutokset puun ominaisuuksiin ovat: parantunut ruskolahonkesto, biologinen kestävyys paranee ylipäättänsä, jonkinasteinen sävyn tummeneminen, lämmönjohtavuus heikkenee, puun kosteuseläminen pienenee, jopa 80 prosenttiyksikköä ja mittapysyvyys paranee. Vaikka puun kovuus saattaa hieman kasvaa, tulee yleisesti ottaen puutavarasta hauraampaa, sillä puun halkeilu- ja taivutuslujuus laskee jopa kymmeniä prosenttiyksikköä. Näihin muutoksiin ja niiden suuruuksiin vaikuttaa käsiteltävän puutavaran valinnan lisäksi lämpömodifiointiprosessin kesto ja käytetyt lämpötilat (Siikanen & Siikanen 2009, 66–67.)

Lämpömodifioidulla sahatavaralla on pienempi lämmönjohtavuus, kuin vastaavalla modifioimattomalla sahatavaralla. VTT:n tutkima Thermowood konsernin, Thermo-D lämpöpuulla on lämmöneristävyyden arvo 0,099 W/mk (Turunen, Väärä 2014.) Myös vesihöyrynvastus on alhaisempi (Lämpöpuuyhdisty Ry 2021).

Ympäristövaikutukset

Lämpömodifiointiprosessissa ei käytetä suoranaisesti kemikaaleja, vaan ainoastaan lämpöä ja vettä. Energian kulutus on arvioitu olevan vain noin 23 % suurempi kuin keinokuivatulla sahatavaralla. Puutavarasta ei lähde juurikaan sisäilmalle haitallisia päästöjä ja materiaalin loppusijoituksessa ei silloin tule kemikaalikuormitusta ympäristöön (Hyvä tietää lämpöpuusta N.d..)

3 Opinnäytetyön tavoitteet ja rajaukset

3.1 Työn tavoitteet

Työn tavoitteena on selvittää eri eristemateriaalien vaadittava paksuus lämpöteknisen toimivuuden näkökulmasta hyödyntäen DOF-lämpö-sovellusta. Lisäksi tutkitaan kosteusteknistä toimivuutta ja mahdollisen kosteuden tiivistymistä rakenteen sisään. Tarkastelua syvennetään käyttämällä WUFI-laskentaohjelmistoa, jolla analysoidaan rakenteen homehtumisriskiä ja lasketaan rakenteelle homeindeksi. Tällä tavoin voidaan arvioida, kuinka hyvin kukin eristemateriaali toimii kosteusteknisesti ja miten ne vaikuttavat rakenteen pitkäaikaiseen toimivuuteen.

Opinnäytetyön tarkoituksena on tuottaa vertailukelpoinen analyysi eri eristemateriaalien soveltuvuudesta osaksi puu-sandwich-elementtiä. Tulosten pohjalta työn tilaaja voi halutessaan tehdä perusteltuja päätöksiä rakenteen kehityksen ja jatkokehityksen suunnasta.

3.2 Rajaukset

Opinnäytetyö rajautuu tarkastelemaan kolmen toimeksiantajan valitseman lämmöneristeen, puukuitu-, mineraalivilla- ja polyuretaani PIR-eristeen ominaiskäyttämistä kosteuskäyttämisen näkökulmasta. Painopisteenä työllä on rakenteen kosteus ja homehtuvuus. Työ ei ota kantaa muihin eristemateriaaleihin, eikä eri pintaratkaisuihin oleviin rakenteisiin. Työssä yhteenvedossa ja

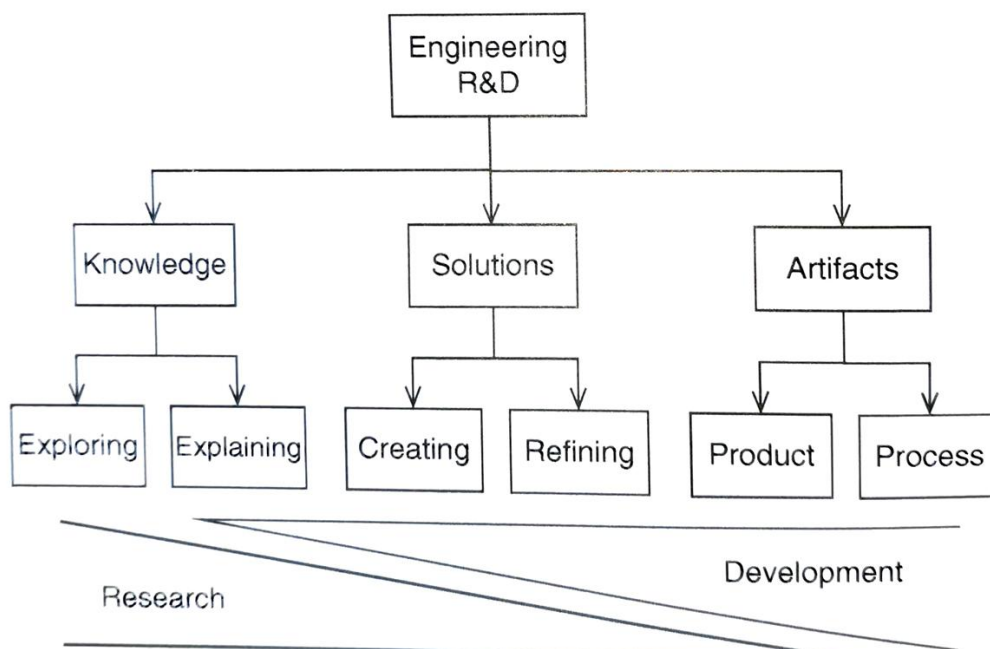
suosituksessa ei oteta kantaa eristemateriaalien muihin ominaisuuksiin, kuten päästöihin, akustisiin ominaisuuksiin tai palotekniseen käyttäytymiseen.

3.3 Tutkimustapa

Tämä opinnäytetyö on tuotteen tai rakenteen kehittämiseen liittyvää työtä. Sen tavoitteena on tuottaa käytännöllistä ja vertailukelpoista tietoa siitä, miten eri eristemateriaalit toimivat osana puu-sandwich-rakennetta. Tässä kehittämistyössä tarkastellaan erilaisten rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimivuutta.

Jyväskylän ammattikorkeakoulun (JAMK) mukaan tuotteen tai produktion kehittämiseen liittyvä opinnäytetyö voi tarkoittaa esimerkiksi olemassa olevan ratkaisun parantamista, uuden tuotteen kehittämistä tai vaihtoehtojen vertailua. Tämä työ pohjautuu käytännön tarpeeseen ja tähtää toimivaan ratkaisuun (JAMK, 2020.)

Insinöörialoilla kehittämistyö (R&D) perustuu usein soveltavaan tutkimukseen. Näissä teorian tietoa yhdistetään käytännön ratkaisuihin. Tällainen työ voi sisältää ideointia, suunnittelua, arviointia ja eri vaihtoehtojen mallintamista kuten alla olevassa kuviossa (kuvio 6). Työn tavoitteena on löytää ratkaisuja tai parantaa tuotteen toimivuutta (Tang, 2021, s. 22–27.)



Kuvio 6. Insinööritieteiden suuntauksia ja lopputuloksia (Tang 2021, 24).

Tässä opinnäytetyössä käytetään DOF-lämpö-sovellusta, jolla voidaan laskea rakenteiden lämmönläpäisykerroin ja suhteellinen kosteus sekä WUFI-ohjelmaa, jonka avulla arvioidaan miten eri eristeet vaikuttavat rakenteen lämpö- ja kosteustekniseen käyttäytymiseen, sekä antaa arvio homeindeksistä. Vaikka ohjelmat tuottavat numeerista tietoa, työ ei ole perinteinen määrällinen tutkimus. Tärkeämpää on ymmärtää tulosten merkitys rakenteen toimivuuden kannalta ja tukea niiden avulla kehittämistä.

3.4 Tutkimuskysymykset

Tärkeimmiksi tutkimusta ohjanneiksi kysymyksiksi muodostui:

1. Mikä on elementin riittävä paksuus, jotta Ympäristöministeriön asetuksen mukainen U-arvo vaatimus täyttyy
2. Tuulettumattoman rakenteen lämmöneristevalinnan vaikutus rakenteen homehtuvuuteen ja homeindeksiin

Tutkimuskysymykset valikoituivat työn tavoitteiden ja rajauksen mukaisesti. Ensimmäinen kysymys pohjautuu Ympäristöministeriön asetuksen vaatimukseen ja toimii lähtökohtana elementin mitoitukselle. Toinen kysymys pureutuu tarkemmin kosteusteknisiin ilmiöihin, jotka ovat kriittisiä tuulettumattomissa rakenteissa. Eristemateriaalin vaikutus on oleellinen osa pitkäaikaisen rakenneratkaisun suunnittelua. Kysymykset muodostavat yhdessä kokonaisuuden, jonka kautta eristemateriaalien soveltuvuutta voidaan arvioida kosteusteknisen turvallisuuden näkökulmasta.

4 Käytetyt menetelmät

4.1 DOF-LÄMPÖ

DOF-lämpölaskut on toteutettu Isover Saint-Gobain laskurilla, joka toimii lite-pilviversiona. DOF-LÄMPÖ-ohjelmalla voidaan laskea eri rakenteille, katto-, seinä- ja lattiapinnoille U-arvoja ja sillä voidaan myös arvioida kosteus- sekä lämpökäyttäytymistä. DOF-LÄMPÖ suorittaa laskut Euronormien mukaan ja huomio mahdolliset kylmäsillat (Isover N.d..) Seinärakenteen lämmöneristeen paksuus määräytyi Ympäristöministeriön asetuksen asettaman lämpimän vaipan lämpöhäviön vertailuarvon lämmönläpäisykerroimen $0,17 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ mukaan (A 1010/2017).

DOF-LÄMPÖ suorittaa laskelmat staattisessa tilassa, eikä huomioi silloin kosteuden siirtymistä rakenteissa muuten, eikä kosteuden vaikutusta lämmöneristävyyteen.

Lämpömodifioitujen puulevyjen lämmönjohtavuuden arvoina näissä laskelmissa käytetään 0,099 w/m*K mutta vesihöyrynläpäisevyyden arvona lämpömodifioimattoman sahatavaran arvoa $0,4 \cdot 10^{-12}$ kg/m*s*Pa.

DOF-LÄMPÖ laskelmissa, rakenteesta riippumatta perustiedot ovat seuraavat:

Rakennuksen kokonaispinta-ala: $1m^2$

Ulkopinnan pintavastus, R_{se} : $0,13 \frac{m^2 \cdot K}{W}$ (RIL 225-2023 2023)

Sisäpinnan pintavastus, R_{si} : $0,04 \frac{m^2 \cdot K}{W}$ (RIL 225-2023 2023)

Kylmäsiltojen päällekkäisyys: mahdollisimman kohdakkain

Korjaustermi, ΔU : $0 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

Mekaaniset kiinnikkeet: Ei

Ilmaraot, korjaustaso: 0

Käännetyt katot: Ei

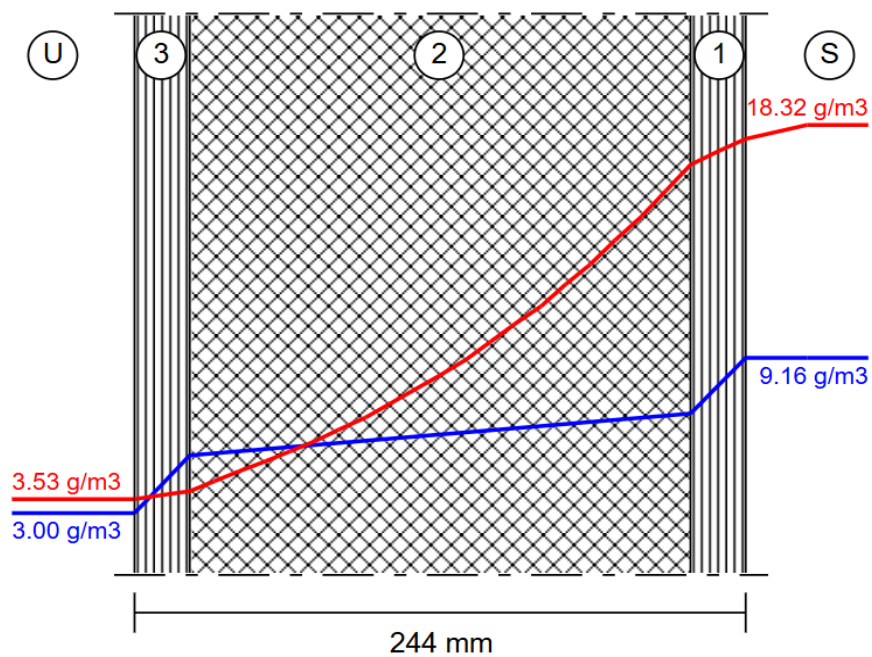
Säätiетokanta: Rakennusfysikaalinen testivuosi, Jokioinen 2009–2010

Puukuitu

Laskelmissa puukuitueristeen lämmönjohtavuuden arvona käytettiin $0,038 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ (Hunton 2022.)

Puukuitueristeen vesihöyrynläpäisevyyden arvoksi saatiin $6,19 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ (liite 1).

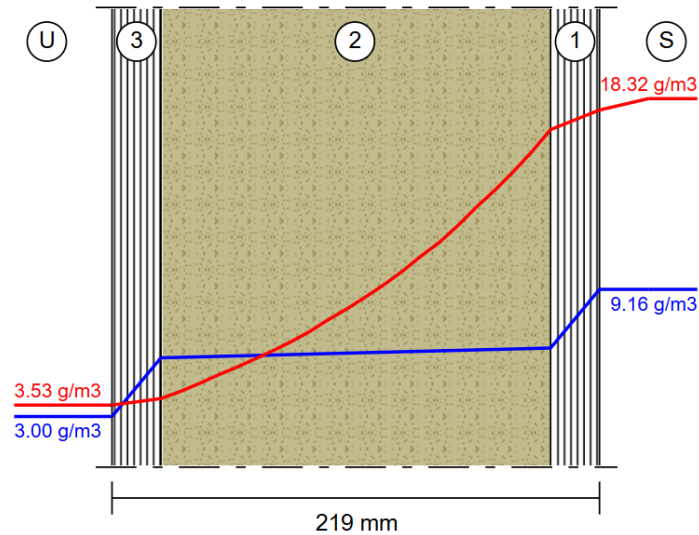
DOF-LÄMPÖ-sovelluksen suorittamien laskujen pohjalta saatiin kosteuskuvaaja (kuvio 7), laskentatulostaulukosta nähdään visuaalisesti kosteusmäärä, g/m^3 .



Kuvio 7. Kosteuskuvaaja; puukuitueriste, tammikuu

Kivivilla

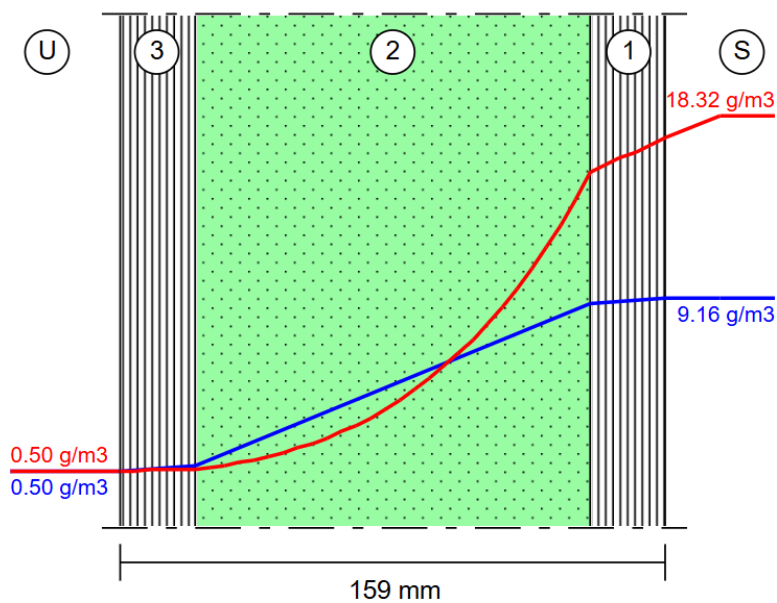
Kivivillaeristeisessä rakenteessa on käytetty eristemateriaalin lämmönjohtavuusarvona, 0,033 w/m*K ja vesihöyrynläpäisevyyden arvona $2 \cdot 10^{-10}$ kg/m*s*Pa. Lämmönjohtavuus ja vesihöyrynläpäisevyyden arvot ovat laskusovelluksesta.



Kuvio 8. Kosteuskuvaaja; kivivilla, tammikuu

Polyuretaani PIR

Polyuretaani PIR eristeisessä rakenteessa on käytetty eristemateriaalin lämmönjohtavuusarvona, 0,022 w/m*K ja Vesihöyrynläpäisevyyden arvona $7,5 \cdot 10^{-13}$ kg/m*s*Pa. Lämmönjohtavuus ja vesihöyrynläpäisevyyden arvot ovat laskusovelluksesta.



Kuvio 9. Kosteuskuvaaja; PU PIR, mitoitustilanne

4.2 WUFI 2D

WUFI on fysikaalinen simulointiohjelma, jolla voidaan laskea rakenteiden lämmön- ja kosteuden siirtymistä ajan funktiona. Ohjelma mallintaa vesihöyryn ja nesteen kulkeutumista rakennusmateriaalissa. Lähtötietoja sovellus tarvitsee perustietojen lisäksi kosteuden varastointi- ja kuljetusarvot. Laskennassa käytetään sovelluksessa jo olevia säätietoja, sademäärän ja aurinkosäteilyn osalta, tai kolmannen osapuolen tuottamaa säämallia. Ohjelma simuloi monikerrosrakenteita ja rakennuksia realistisissa olosuhteissa, laskien lämpötilan ja kosteuden käyttäytymistä (WUFI 2025.)

WUFI-simuloinnille syötetään samat alkuarvot kaikille tarkasteltaville rakenneratkaisuille lukuun ottamatta lämmöneristevaihtoehtoja. Laskennassa on käytetty säteensuuntaista kuusta puulevyjen kohdalla, sillä lämpömodifioidun puutavaran lämmönvastuksen ja vesihöyrynvastuksen arvoista ei ole tarkkaa arvoa.

Ilmansuunnaksi on valittu etelä, koska säämallin mukaan eteläisistä suunnista puhaltava tuuli on voimakkainta etenkin sateisina vuodenaikoina. Rakenteen kaltevuuskulma asetetaan 90° pystysuoraan seinäpintaan nähden. Sadekuorman laskennassa noudatetaan ASHRAE 160 -standardia: sa-

teen altistuskerroin FE on 1 (rakennuskorkeus < 10 m ja keskitiheä altistusluokka) ja valumiskerroin FD on 0,35, joka määräytyy seinän sijainnin mukaan (esim. loiva- tai jyrkkäkatto, leveä räystäs). Arvot on asetettu alla olevan kuvion (kuvio 10) mukaisesti.

Ilmansuunta

Etelä ▾

Kallistuskulma

Kallistuskulma [°] 90 ▾

Rakennuskorkeus/Sateen kerroin

Sadekuorman laskenta ASHRAE standardin 160 mukaan

	Rakennuskorkeus [m]		Altistusluokka	
sateen altistuskerroin (FE)	1,0	<10 ▾		Keskitiheä ▾
sateen valumiskerroin (FD)	0,35	Seinät vinon katon alla ▾		

Ohje:
Sadekuorma =
Sade * FE * FD * 0,2 s/m * Tuulen nopeus

Kuvio 10. Ilmansuunta kallistus ja korkeus

Ulkopinnan alkuolosuhteina on käytetty lämmönvastusta $R_e = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ sekä pitkäaaltoisen säteilyn vastusarvoa $6,5 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$. Lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokerroin = 0,6, pitkäaaltoisen säteilyn emissiokerroin = 0,85 ja sateen absorptiokerroin = 0,7. Maan pinnan lyhytaaltoisen säteilyn

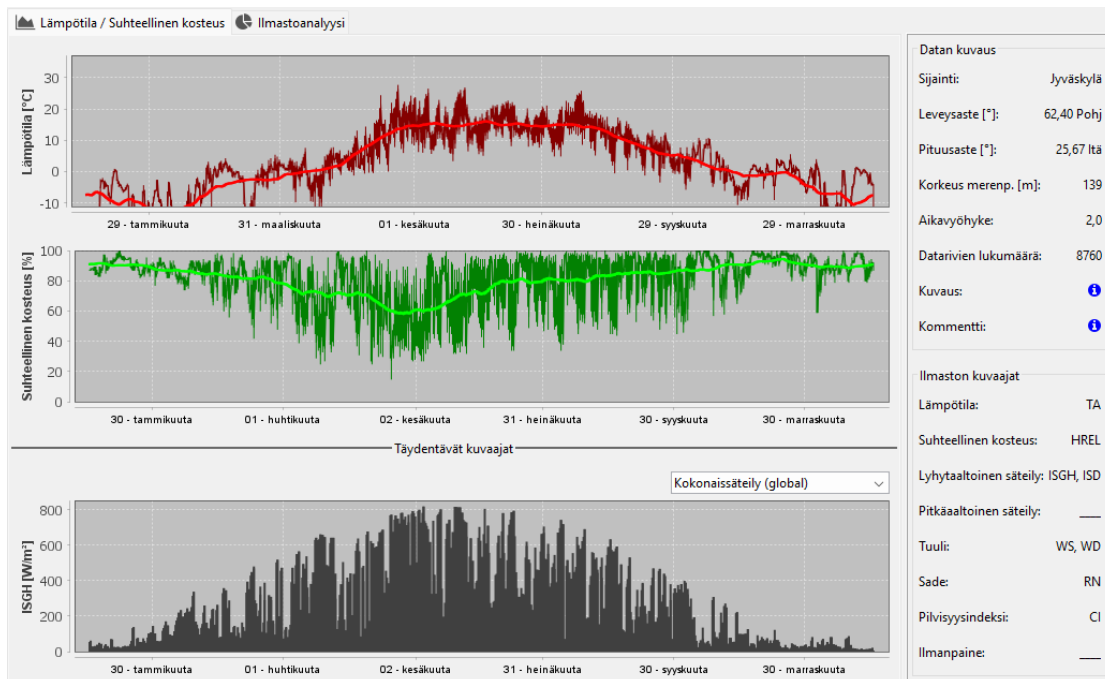
heijastuskerroin on oletettu nolaksi. Sisäpinnalla lämmönvastus on $R_i = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, komponenttien alkutilanteen suhteellinen kosteus 80 % ja alkulämpötila $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Arvot on asetettu alla olevien kuvioiden (kuvio 11, kuvio 12) mukaisesti.

Ulkopinta (vasen puoli)		
Lämmönvastus [(m ² K)/W]	0.04	Käyttäjän määrittelemä
sisältää pitkäaaltosen säteilyn osat [W/(m ² K)]	6.5	
tuulesta riippuva	<input type="checkbox"/>	...
Sd-arvo [m]	----	Ei pinnoitetta
Ohje: Tämä asetus ei vaikuta sateen absorptioon		
Lyhytaaltainen absorptiokerroin [-]	0.6	Käyttäjän määrittelemä
Pitkäaaltainen säteilyn emissiokerroin [-]	0.85	
Varjostuksen aiheuttamat vähennyskerroimet		
absorptiolle [-]	1.0	Ei varjostusta
emissiolle [-]	1.0	
Explisiittinen säteilytase	<input checked="" type="checkbox"/>	...
Huom! Tämä optio huomioi pitkäaaltosen säteilyjäähymisen. Ilmion tarkka arviointi voi edellyttää riittävän tarkkoja vastasäteilyn säätietoja.		
Maan lyhytaaltainen heijastus [-]	----	Ei heijastusta
Sateen absorptiokerroin [-]	0.7	Riippuen komponentin kallistuksesta
Sisäpinta (oikea puoli)		
Lämmönvastus [(m ² K)/W]	0.13	(Käyttäjän määrittelemä)
Sd-arvo [m]	----	Ei pinnoitetta

Kuvio 12. Alkuolosuhteet

<p>Komponentin alkukosteus</p> <p><input checked="" type="radio"/> Vakio koko komponentissa</p> <p><input type="radio"/> Jokaisessa kerroksessa</p> <p><input type="radio"/> Lue tiedostosta</p>	<p>Komponentin alkulämpötila</p> <p><input checked="" type="radio"/> Vakio koko komponentissa</p> <p><input type="radio"/> Lue tiedostosta</p>
Alkutilanteen suhteellinen kosteus [-] <input type="text" value="0,8"/>	Komponentin alkulämpötila [°C] <input type="text" value="10"/>

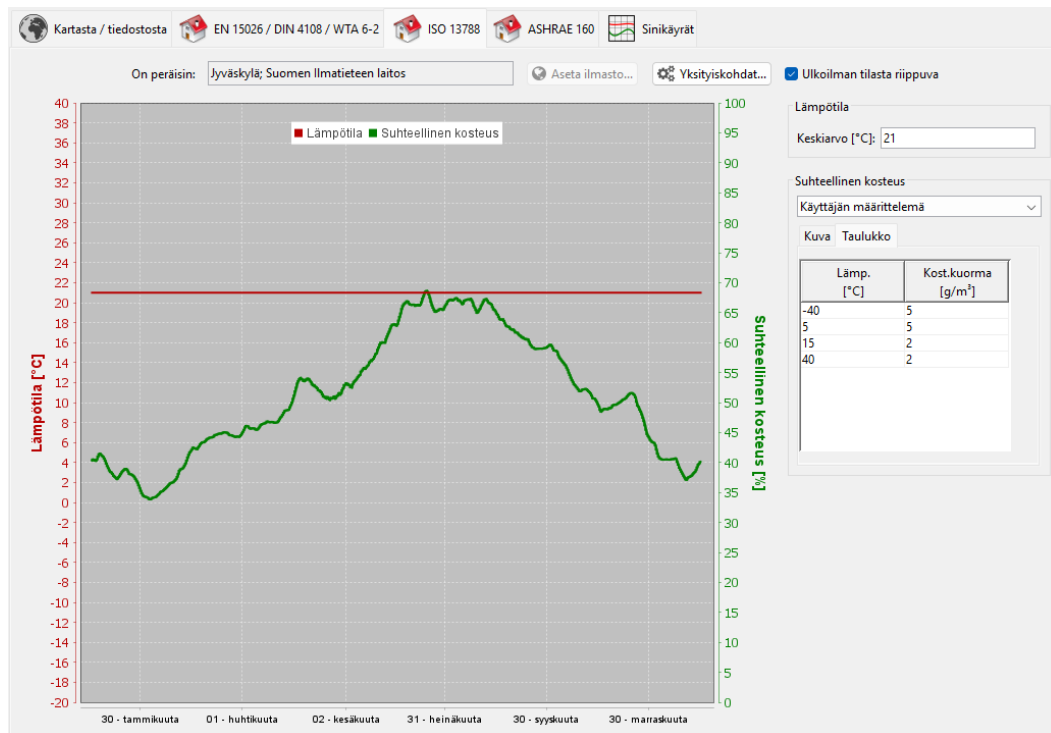
Kuvio 11. Komponenttien alkuarvot



Kuvio 13. Säämalli, Jyväskylä

Laskennassa säämallina käytettiin Suomen ilmatieteenlaitoksen Jyväskylän mittauspisteen todellisia mittausarvoja sekä ulko- että sisätilojen mitoituksessa. Ulkoilmaston lämpötila, suhteellinen kosteus ja ISGH (ilmankosteuden suhteellinen graafinen heijastus) haetaan automaattisesti sovelluksen tietokannasta, kuten on esitetty yllä olevassa kuvassa (kuvio 13). Simulointi ajanjakso kaikissa laskelmissa oli 10 vuotta, alkaen 1.1.2025.

Sisäilmasto on määritetty automaattisesti standardin ISO 13788 mukaisesti, ja siihen liittyvä lämpötila-kosteuskuormataulukko on asetettu kuten alla olevassa kuviossa (kuvio 14). Simulointimalli kattaa sekä ulko- että sisäilmaston dynaamisen vuorovaikutuksen ja tuottaa lämpötilan ääriolosuhteiden tuloksia rakenteen lämpö- ja kosteustasapainosta.



Kuvio 14. Sisäilmasto, ISO 13788

4.3 Suomalainen homemalli

Puukuitueristeelle valittiin sovelluksen pyytämä kasvunopeuden herkkyyssluokka 1 ja homeen maksimimäärän herkkyyssluokka 1, runsaasti ravinteita sisältävä puu. Taantumaluokaksi valittiin 0,25 *höylätty mänty tai kuusi*.

Mineraalivillaeristeelle valittiin sovelluksen pyytämä kasvunopeuden herkkyyssluokka 3 ja homeen maksimimäärän herkkyyssluokka 3, *mineraalivillat*.

Polyuretaani PIR eristeelle valittiin sovelluksen pyytämä kasvunopeuden herkkyyssluokka 3 ja hoimeen maksimimäärän herkkyyssluokka 3, *muovipohjaiset materiaalit*. Taantumaluokaksi valittiin 0,1.

5 Tulokset, arviointi, johtopäätökset ja hyödynnettävyys

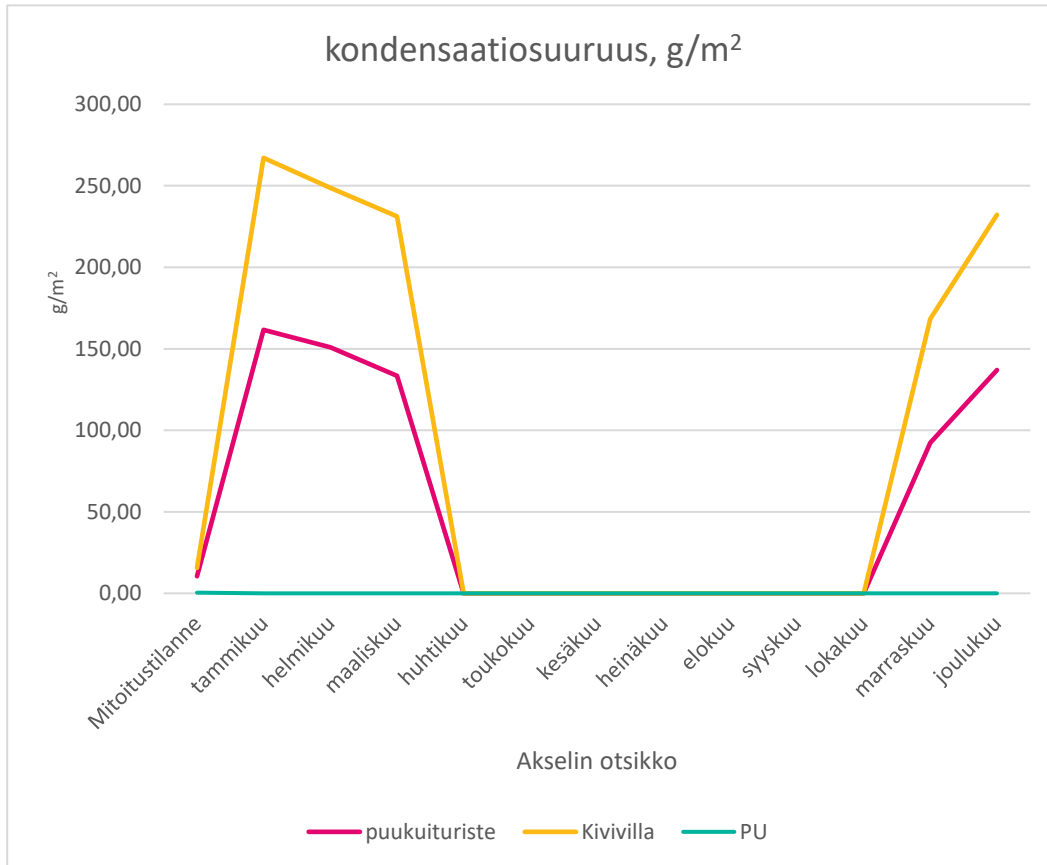
DOF

DOF-LÄMPÖ sovelluksella laskettuna **puukuitueristeinen** sandwich-elementti saavuttaa Ympäristöministeriön asettaman lämmönläpäisykertoimen, kun eristepaksuus on puukuitueristeellä 200 mm. Laskutulosten perusteella puukuitueristeiseen seinärakenteeseen tiivistyy kosteutta viitenä kuukautena vuodesta. Tammikuun tiivistyvä kosteusmäärän arvo on 1,4 g/m³.

DOF-LÄMPÖ sovelluksella laskettuna **mineraalivillaa**eristeinen sandwich-elementti saavuttaa Ympäristöministeriön asettaman lämmönläpäisykertoimen, kun eristepaksuus on 175 mm. Laskutulosten perusteella seinärakenteeseen (kuvio 7.) tiivistyy kosteutta viitenä kuukautena vuodesta. Tammikuun tiivistyvä kosteusmäärän arvo on 3,87 g/m³.

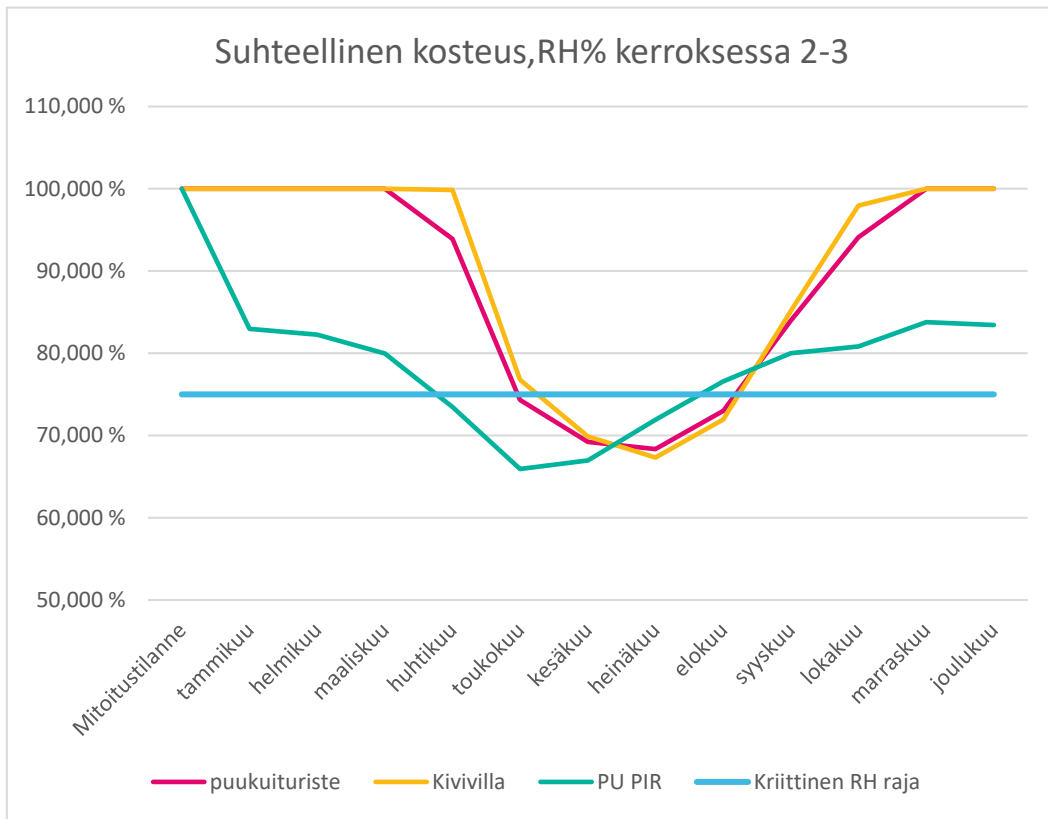
Riittävä lämmöneristävyys arvo **polyuretaani PIR** eristeellä saavutetaan 115 mm eristepaksuudella. Staattisessa DOF-LÄMPÖ mallissa PU-eristeiseen rakenteeseen kosteus tiivistyy ainoastaan 24 h mitoitustilanteessa, jossa ulkoilman suhteellinen kosteus, RH on 100 % ja lämpötila –26 °C, tämä olosuhde simuloi rakenteen kannalta raskasta talvikuormaa.

Tulokset eri eristevaihtoehdoilla (puukuitu, mineraalivilla ja PU) on koottu (liite 2) siten, että kullekin materiaalille on oma taulukkonsa kondensoitumismäärien kuukausiarvoista. Näistä on piirretty kuvio (Kuvio 15), joka havainnollistaa ulkolevyn ja lämmöneristeen väliin kertyvän kosteuden määrää eri kuukausina.



Kuvio 15. Kondensaatioisuuden kuvio.

Laskennasta saadun datan pohjalta on lisäksi luotu toinen kuvio (kuvio 16), jossa on edellä mainitussa pisteessä mitattu suhteellisen kosteuden (RH %) kuukausivaihtelu.



Kuvio 16. Suhteellinen kosteus.

DOF-LÄMMÖLLÄ tuotettujen laskujen pohjalta tehdyt graafit mahdollistavat eristeiden keskeistä vertailua suhteellisen kosteuden suhteen ja näyttävät milloin suhteellinen kosteuspitoisuus on niin suuri, että homesienille soveltuvat kasvuolosuhteet toteutuvat kosteuden osalta.

WUFI

Seinä rakenteille saatiin sovelluksella laskettua kokonaiskosteuspitoisuus sekä lämpötila ja suhteellinen kosteus eri rakenteissa ja kerroksissa. Liitteistä 2–4 nähdään, että jokaisen materiaalinvalinnan kohdalla alkutilanteen rakenteen kosteus nosta kosteusmäärää ensimmäisen vuoden ajan, mutta arvot tasahtuvat lopulta. WUFI-simuloinnin perusteella puukuitueristeisessä rakenteessa kosteuspitoisuus nousi alussa ja tasaantui kolmen vuoden kohdalla noin 3,8–4,5 kg/m² välille, keskiarvon ollessa silmämääräisesti arvioituna lähempänä 4,0 kg/m². Keskimääräinen kosteuspitoi-

suus oli korkea, $5,43 \text{ kg/m}^3$, ja suhteellinen kosteus vaihteli vuoden jälkeen 71–98 %. Tämä osoittaa puukuidun hyvää kosteuden tasauskykyä ja suurta kosteuskapasiteettia, mutta samalla kohonnutta homehtumisriskiä.

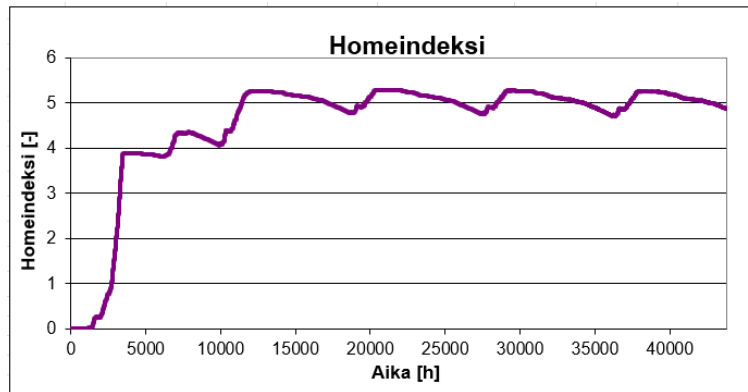
Mineraalivillarakenteessa kosteuspitoisuus tasaantui samassa ajassa $3,1\text{--}3,6 \text{ kg/m}^2$ välille, keskiarvo noin $3,4 \text{ kg/m}^2$. Keskimääräinen kosteuspitoisuus oli $1,59 \text{ kg/m}^3$ ja suhteellinen kosteus 67–98 %. Tulokset osoittavat maltillista kosteuden sitoutumista, mutta vaihteluväli osoittaa herkkyyttä ulkoisiin olosuhteisiin. Kivivillojen lämmöneristävyys heikkenee merkittävästi, jopa useita kymmeniä prosenttiyksiköjä, kun sen kosteuspitoisuus kasvaa, jolloin kostean rakenteen lämmöneristävyyskin laskisi rakenteella huomattavasti kosteina vuodenaikoina (Gusyachkin, Sabitov, Khakimova & Hayrullin 2019.).

PIR-eristeellä kosteuskäyttäytyminen oli vakainta. Keskimääräinen kosteuspitoisuus oli vain $0,6 \text{ kg/m}^3$, suhteellinen kosteus tasaantui vuoden jälkeen 67–95 % ja kosteuspitoisuus vaihteli $2,4\text{--}3,0 \text{ kg/m}^2$ välillä. Tämä kertoo rakenteen hyvästä kosteusteknisestä turvallisuudesta ja materiaalin pienestä vesihöyrynläpäisevyydestä.

Suomalainen homemalli

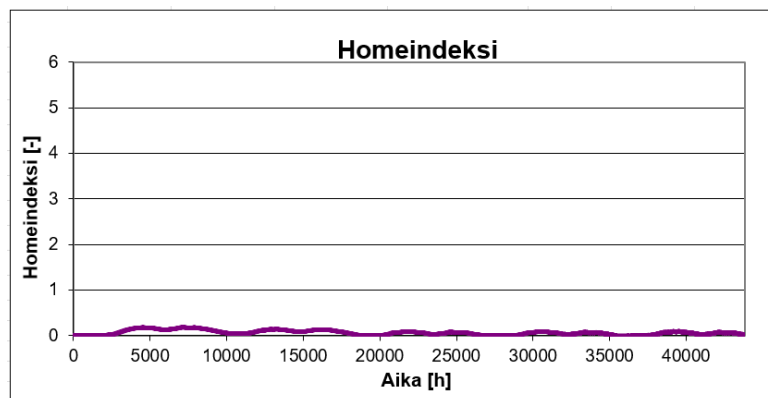
Suomalaiseen homemallilaskuriin syötettiin WUDI 2D:stä saadut eristeen ulkoreunan laskentapisteen lämpötila ja suhteellisen kosteuden arvot tunnin välein laskettuna. Suomalaisen homemallin laskentajaksona olisi 40 000 tuntia eli noin 4,5 vuotta, jonka aikana näiden laskujen tuloksista huomaa jo homeindeksin tasoittumisen tai kasvavan trendin.

Puukuitueristeisellä rakenteella maksimi homeindeksiksi saatiin 5,26 (Kuvio 17) eli runsasta silmin havaittavaa homesienikasvua, joka peittää yli puolet pinta-alasta.



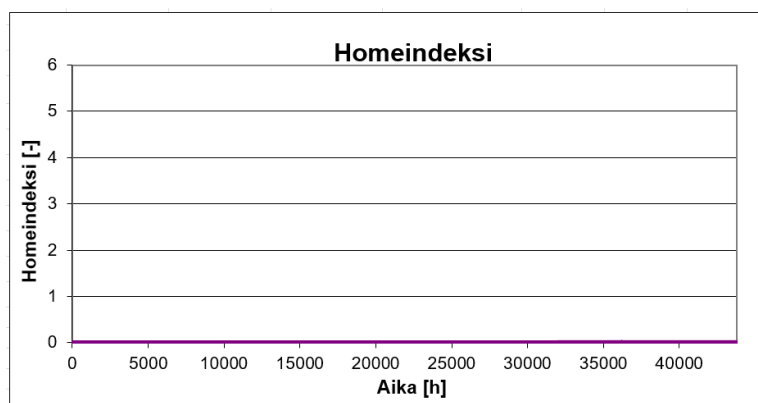
Kuvio 17. Homeindeksi, Puukuitueriste. Eristeen ulkopinnassa.

Taantumaluokaksi valittiin 0,1 lasivilla. Mineraalivillaisella rakenteella maksimi homeindeksi on 0,187 (Kuvio 18).



Kuvio 18. Homeindeksi, mineraalivillaeriste. Eristeen ulkopinnassa.

Polyuretaanieristeisellä rakenteella maksimi homeindeksi on 0,004 (Kuvio 19).



Kuvio 19. Homeindeksi, Polyuretaanieriste. Eristeen ulkopinnassa.

Johtopäätökset

Puukuitueristeinen rakenneratkaisu on riskialtis korkeampien kosteusarvojen vuoksi, mutta materiaalina se olisi kestävä vaihtoehto ympäristön kannalta. Puukuitueristeisen rakenteen homeindeksi kasvaa toki hyvin korkeaksi, jolloin voimakas homehtuminen on todennäköistä, mutta kuvioista huomataan myös, että homeindeksin käyrä tasoittuu ja jää sahaamaan, eikä ole kasvava trendi, jolloin materiaalin homesuojauksella voitaisiin saada homehtumisherkyys luokkaan 4, *tehokkaita homesuoja-aineita sisältävä materiaali*, ja siten rakenne toimivaksi. Rakenneratkaisuina PU PIR-eriste tarjoaisi parhaan kosteusteknisen suojan, mutta sen käyttö voi olla kalliimpaa ja ekologisesti heikompi ratkaisu käytettäessä täysin fossiilisista aineista. Polyuretaanin alhainen kosteus ja suhteellinen kosteus, sekä iso homehtumisherkyysluokka laskevat myös materiaalin homeindeksiä hyvin matalaksi. Mineraalivilla eristeenä on kompromissi kuivumiskyvyn ja kosteuden sietokyvyn välillä, ja toimiakseen hyvänä lämmöneristeinä kosteuspitoisuuden ollessa suurimmillaan vaatisi rakenne sisälle selvän ilmansulun ja tuulettuva ulkopinta ja tuulensuoja olisi eristeelle eristävyttä ylläpitävä ratkaisu.

WUFI-laskennassa käytettiin lämpömodifioimatonta sahatavaraa, koska lämpömodifioidun puun ominaisuudet vaihtelevat käsittelytavan mukaan. Ilman spesifimpää tietoa käytetystä lämpömodifioidustamateriaalista ei tulos olisi ollut juurikaan tarkempi arvioidessa rakenteen kosteusteknistä käyttäytymistä.

Tuulettumattomat rakenteet luokitellaan riskirakenteiksi. Tämä ei tarkoita, etteivät ne voisi toimia tietyissä olosuhteissa, mutta niihin liittyy kohonnut riski mikrobien, kosteuden ja lahon aiheuttamille vaurioille. Monet nykypäivänä riskirakenteiksi määritellyt rakenneratkaisut ovat olleet omana aikakautenaan hyvänrakennustavan mukaisia ratkaisuja ja niitä on suositeltu rakentamista ohjaavassa kirjallisuudessa, kuten Rakennusinsinööriliiton RIL-kirjoissa ja RT-ohjekorteissa (Käyhkö K. N.d.) Riskirakenne ei siis automaattisesti tarkoita, että rakenne olisi kelvoton. Tietyissä paikoissa ja olosuhteissa se voi toimia hyvin, kunhan ylimääräinen kosteusrasitus pyritään minimoimaan. Tämä tarkoittaa esimerkiksi riittävän pitkien räystäiden käyttöä, oikeanlaista perustuskorkeutta sekä tehokasta ja tasapainoista ilmanvaihtoa sisätiloissa, jotta ylimääräinen kosteus poistuu hallitusti (Kokko 2002; Ojala 2013, 57.)

Ulkoseinän kosteusrasitusta voisi pienentää sateisen ajanjakson, syksyn ja talven osalta esimerkiksi lasitetuilla terasseilla tai viherhuoneilla, jotka muodostaisivat puskurivyöhykkeen. Puskurivyöhyke voi oikein suunniteltuna sekä vähentää rakennuksen lämmitysenergian tarvetta että suojata seinäpintoja viistosateilta (Lylykangas, Andersson, Kiuru, Nieminen & Päätaalo 2016, 44.) Tuulettumattomia puupintaisia rakenteita on käytetty vanhoissa hirs- ja rintamamiestaloissa, joista osa on kokenut pahoja kosteusvaurioita (Käyhkö 2023; PRKK 2024). Homehtumisherkkyyden ja korkean homeriskin lisäksi on tärkeää huomioida missä homeriski rakenteessa sijaitsee. Ulkopinnan pieni homevaurio ei välttämättä vaikuta sisäilmastoon, kunhan rakenne on tiivis. (Lylykangas ym. 2016, 115.)

Rakenteen ilmantiiveys tulisi myös suunnitella liitoksin, jotka säilyttävät ilmanpitävyytensä. Liitokset voivat myös muodostaa merkittäviä kylmäsiltoja, jotka lisäävät kosteus- ja homevaurioiden riskiä sekä heikentävät asuinmukavuutta vedontunteen vuoksi. (Lylykangas ym. 2016, 86–103.)

Hyödynnettävyys

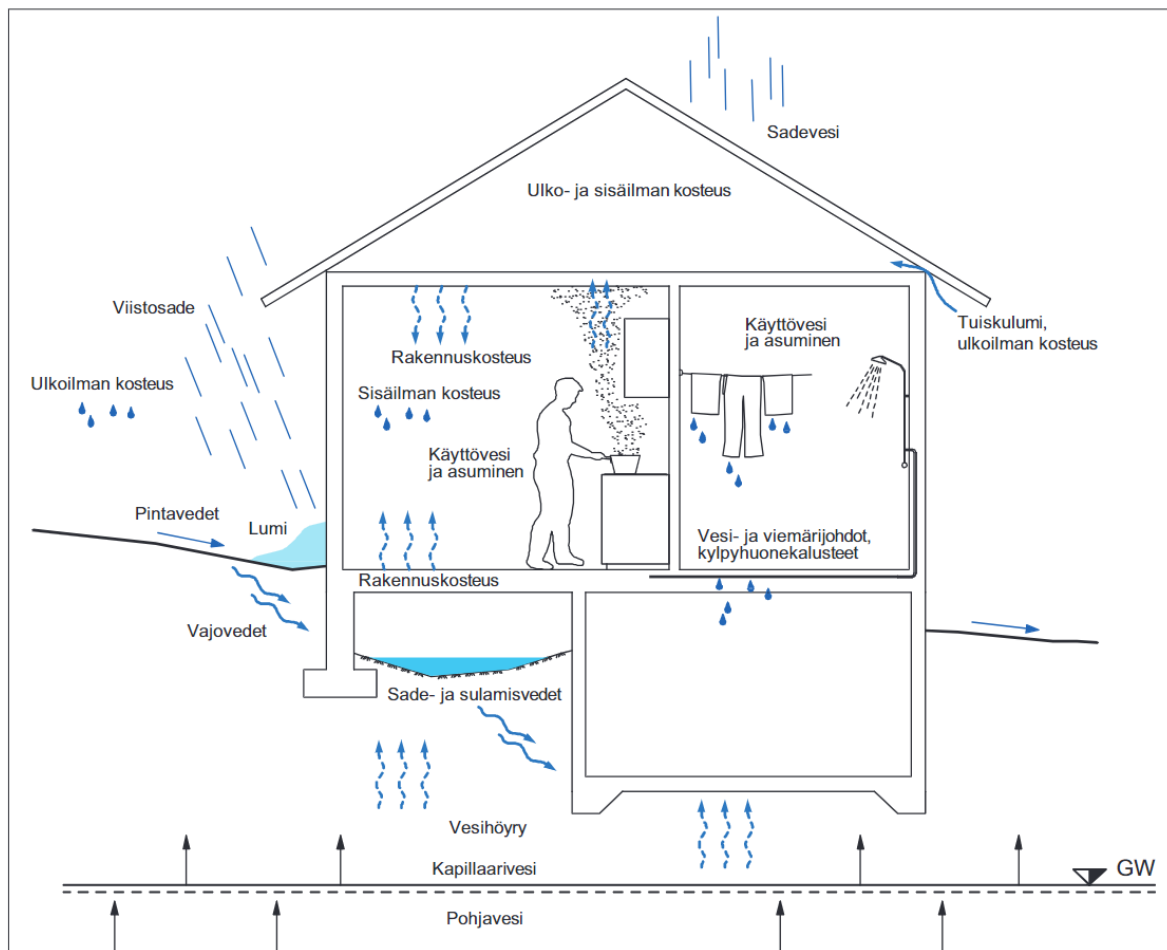
Näiden laskentojen, kirjallisen tutkimuksen ja työn rajausten perusteella polyuretaani PIR-lämmöneriste näyttäytyy kosteusteknisesti turvallisimpana lämmöneristevaihtoehtona puu-sandwich-elementtirakenteeseen. Sen ominaisuudet tarjoavat parhaan suojan kosteuden kertymistä ja homehtumisriskiä vastaan tarkastelluissa rakenneolosuhteissa.

Tämä opinnäytetyö tarjoaa toimeksiantajalle tietoa pyydettyjen eristemateriaalien lämpö- ja kosteusteknisestä toiminnasta tuulettumattomassa puu-sandwich-elementissä. Työn tulokset tukevat tuotekehitystyötä tarjoamalla tietokoneella laskettuja vertailuarvoja eri eristeiden käyttäytymisestä säämallin olosuhteissa. Analyysien avulla toimeksiantaja voi tehdä materiaaliin perustuvia päätöksiä eristemateriaalien valinnassa. Työssä käytetty WUFI-simulaation tuloksilla tehty home-malli-tulos antaa arvion homehtumisriskistä, mikä voi ohjata materiaalivalintoja jo suunnitteluvaiheessa. Kestävyysnäkökulma tukee Agenda 2030 -tavoitteita, puupohjaisilla materiaaleilla ja rakenteilla voidaan vähentää hiilijalanjälkeä.

6 Pohdinta

Oma tulkinta

DOF-LÄMPÖ sovelluksella saatavat tulokset ovat yksinkertaisia ja niiden paikkansapitävyyttä ei mielestäni tarvitse juurikaan kyseenalaistaa, mutta WUFI:sta saaduissa tuloksissa on jo niin paljon muuttujia, että sen tulosten pohjalta homemallista saadut arvot, mineraalivilla osalta näyttää mielestäni turhan hyvältä. Toki homemalli käsittelee vain homeindeksiä, eikä lämmöneristävyyttä kas-tuneena. Tulosten paikkansapitävyyttä kuitenkin puolustuksena täytyy mainita, että suhteellinen kosteus on puukuitueristeellä ja mineraalivillalla samaa luokkaa, jolloin homeutumisherkkyys ja taantumaluokka merkitsevät tuloksissa paljon. Riskirakenteiseksi luokiteltuna rakenteen kosteus- teknisen toimivuuden kannalta on olennaista minimoida kaikki alla olevassa kuviossa esitetyt kos- teudenlähteet (Kuvio 20). Hyviä tapoja olisi esimerkiksi riittävän korkea perustus, riittävän pitkät räystäät viistosateen suojaksi ja liiallisen sisäilman kosteuden huomioiminen.



Kuvio 20. Kosteuslähteet (RIL 250-2020 2020).

Jatkotutkimukset

Materiaalien osalta lämpömodifioidun puun käyttö tämän tyyppisissä rakenneratkaisuissa vaikuttaa täysin uudelta. Jotta lämpömodifioidulla sahatavaralla voisi tehdä tarkempia simulointeja, olisi materiaalin kosteusteknisiä ominaisuuksia tutkittava merkittävästi enemmän. Tällä hetkellä saatavilla oleva tieto ei kata riittävästi lämpömodifioinnin vaikutuksia esimerkiksi vesihöyrynläpäisevyyteen tai kosteuden absorptiokykyyn, mikä aiheuttaa epävarmuutta simulaatioiden tarkkuuksissa.

Puukuituisen eristeen kannalta homehtumisherkkyyden luokka on isossa roolissa. Niiden kehittämiseen liittyvä tutkimus voisi tarjota merkittäviä mahdollisuuksia. Erityisesti tulevaisuuden kosteamassa ja vaihtelevammassa ilmastossa olisi hyvä kehittää ratkaisuja, jotka mahdollistavat ekologisten puukuitueristeiden turvallisen käytön myös tuulettumattomissa rakenteissa.

Mielenkiintoinen jatkotutkimusaihe voisi olla lämpömodifioidun sahanpurun homehtumisherkkyyden arviointi ja sen kehittäminen lämmöneristeenä. Tämä voisi yhdistää lämpömodifioidun puun kosteusteknisiä ominaisuuksia ja puukuitueristeen ekologisuutta, mahdollistaen täysin uudenlaisen, kestävä ja pienempi riskisen lämmöneristeratkaisun puupohjaisiin rakenteisiin.

Luotettavuustarkastelu

Työn luotettavuuden tärkeitä kohtia ovat menetelmien läpinäkyvyys, ohjelmien käytön ja niiden rajoitteiden tunnistaminen, muiden tutkimusten tulosten vertailu, mahdolliset ennako-oletukset ja sovellettavuus.

Työn luotettavuuden varmistamiseksi on panostettu menetelmien läpinäkyvyyteen sekä simulaatioiden lähtöolosuhteiden ja rajoitusten tunnistamiseen. Esimerkiksi rakennetyypin yksinkertaistus ja ilmasto-olosuhteiden vakioiminen voivat vaikuttaa tulosten tarkkuuteen, erityisesti pitkällä aikavälillä ilmastonmuutoksen edetessä. Käytetyt ohjelmistot, kuten WUFI ja DOF, ovat laajasti käytettyjä rakennusalalla, mutta on hyvä tiedostaa, että niiden simulaatiot poikkeavat todellisista olosuhteista, kuten rakennuspaikan erityisistä sääolosuhteista. Tulokset on siis nähtävä suuntaa antavina, ja niitä tulisi tarkastella muiden tutkimusten ja käytännön kokeiden kanssa. Työssä on pyritty tiedostamaan myös mahdolliset ennako-oletukset sekä arvioitu tulosten sovellettavuutta vastaaviin puurakenteisiin suomalaisissa ilmasto-olosuhteissa.

Eettinen tarkastelu

Hyvän tieteellisen käytännön kulmakiviä ovat **luotettavuus** eli tutkimus tehdään huolellisesti ja laadukkailla menetelmillä, **rehellisyys** eli tutkimusprosessissa ja -raportoinnissa ollaan avoimia, totuudenmukaisia ja puolueettomia, **kunnioitus ja arvostus** eli tutkimuksessa otetaan huomioon ihmiset, ympäristö ja yhteiskunta, **vastuunkanto** eli vastuu tutkimuksen vaikutuksista tunnustetaan ja toimitaan esimerkillisesti myös muiden tutkijoiden ohjaamisessa (TENK 2024; allea 2023, 5.) Tutkimus- ja kehitystyö on tehty rehellisesti ja avoimesti, noudattaen JAMK:n ohjeistusta lähteiden käytöstä ja välttämällä plagiointia. Laskentatulokset on raportoitu ilman manipulointia, ja epävarmuudet on pyritty tuomaan esiin avoimesti.

Eristevalinnoilla on merkittävä ympäristövaikutus. Puukuitu on uusiutuva ja ekologinen, mineraalivilla energiavaltainen ja huonosti kierrätettävä, kun taas PIR eristää tehokkaasti ja perustuu fossiilisiin raaka-aineisiin. Eristeitä on tarkasteltu tasapuolisesti. Työssä on noudatettu tilaajan etua ja luottamuksellisuutta, tuloksia ei ole jaettu ulkopuolelle. Käytetty tieto on luotettavaa ja mahdollistaa turvalliset suunnitteluratkaisut. Homehtumisriskiä on arvioitu opintotiedon ja alan lähteiden pohjalta.

Opinnäytetyö on toteutettu itsenäisesti, mikä on vahvistanut minun ammatillista vastuutani ja osaamistani. Ohjaajalta sain tukea raportin rakenteeseen ja tutkimuskysymysten muotoiluun. Toimeksiantajan verkkosivuilta sain suuntaa heidän näkemyksistään. Rakennusalan opettajien kanssa käydyt keskustelut toivat lisänäkökulmia, mutta työn sisältö on kokonaisuudessaan omaa panostani.

Lähteet

A Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017. 3:24.1 rakennuksen vaipan lämpöhäviö. [https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/saadosko-](https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/saadosko-koelma/2017/1010#OT2_OT1)

[koelma/2017/1010#OT2_OT1](https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/saadosko-koelma/2017/1010#OT2_OT1)

allea 2023. The European code of conduct for research integrity. Viitattu 8.5.2025. [European-Code-of-Conduct-Revised-Edition-2023.pdf](#)

Betonitieto. N.d. Sandwich-elementti. Viitattu 24.3.2025. <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-jasanasto/betonisanasto/sandwich-elementti.html#:~:text=Sandwich%20elementti%20on%20kerrosrakenne%2C%20jossa%20tyypillisesti%20on%20ulkokuori%2C,Tyypillisesti%20sandwich%20elementti%20tehd%C3%A4%C3%A4n%20kuitenkin%20tehtaalla%20yhdeksi%20kokonaisuudeksi.>

Creswell J. W. 2014. Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches. p 4. SAGE Publications.

Denut M. 2023. Mikä on alipaine ja ylipaine ja miten ne vaikuttavat ilmanvaihtoon? Viitattu 8.5.2025. <https://www.aeris.fi/post/mika-on-alipaine-ja-ylipaine-ja-miten-ne-vaikuttavat-ilmanvaihtoon>

Elementtisuunnittelu. 2023. Sandwich-julkisivut. Viitattu 24.3.2025. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/julkisivut/julkisivujarjestelmat/sandwich-julkisivut>

Environmental product declaration 2015. Hunton Wood Fibre Insulation Board. ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION. Viitattu 8.4.2025. <https://hunton.fi/wp-content/uploads/sites/16/2022/02/nepd-nativo-english-verifisert-ab-1.pdf>

Environmental product declaration 2015. NEPD-2287-1041-EN Hunton Wood Fibre Insulation Board™. Viitattu 8.4.2025. <https://hunton.fi/wp-content/uploads/sites/16/2022/02/nepd-nativo-english-verifisert-ab-1.pdf>

Environmental product declaration 2024. PAROC SE produced stone wool thermal insulation. Viitattu 8.4.2025. <https://www.paroc.com/en/documents/uploads/epd-se>

Finfoam 2021. Environmental product declaration. Viitattu 16.5.2025. <https://finfoam.fi/wp-content/uploads/2022/11/FF-PIR-epd-29092021.pdf>

Finnfoam N.d. FF-PIR-Polyuretaanieristeet- turvallinen, kestävä ja huoltovapaa valinta. Viitattu 15.5.2025. <https://finnfoam.fi/tuotteet/ff-pir/#:~:text=FF-PIR%20on%20ratkaisu%20energiatehokkaaseen%2C%20taloudelliseen%20ja%20kest%C3%A4v%C3%A4%3%A4n,rakentamiseen.%20Hyv%C3%A4%20l%C3%A4mm%C3%B6neristys%20on%20ekologisesti%20kest%C3%A4v%C3%A4n%20rakentamisen%20perusta.>

Fromme H., Gareis M., Völkel W. & Gottschalk C. 2016. Overall internal exposure to mycotoxins and their occurrence in occupational and residential settings – An overview. Viitattu 13.4.2025. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1438463915001546?via%3Dihub>

Ghoshdastidar P. 2012. Heat transfer. Oxford University Press. Viitattu 31.3.2025. <https://app-knovel-com.ezproxy.jamk.fi:2443/web/view/khtml/show.v/rcid:kpHTE00031/cid:kt00TVI4B1/viewerType:khtml/root slug:heat-transfer-2nd-edition/url slug:front-matter?&b-toc-cid=kpHTE00031&b-toc-root-slug=heat-transfer-2nd-edition&b-toc-title=Heat%20Transfer%20%282nd%20Edition%29&b-toc-url-slug=introduction&kpromoter=federation&view=collapsed&zoom=1&page=1>)

Gusyachkin A., Sabitov L., Khakimova A. & Hayrullin A. 2019. Effects of moisture content on thermal conductivity of thermal insulation materials. Viitattu. 5.5.2025. https://www.researchgate.net/publication/335191203_Effects_of_moisture_content_on_thermal_conductivity_of_thermal_insulation_materials

Herrera, R., Arrese, A., de Hoyos-Martinez, P. L., Labidi, J., & Llano-Ponte, R. 2018. Evolution of thermally modified wood properties exposed to natural and artificial weathering and its potential as an element for façades systems. *Construction & building materials*, 172, 233–242. viitattu. 3.3.2025. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.157>

Hirsjärvi S., Remes P. & Sajavaara P. 1997. Tutki ja kirjoita. Helsinki: Tammi

Hunton 2024. Hunton Nativo® puukuitueriste. Käsikirja puukuitueristeellä eristämiseen. Viitattu 8.4.2025. <https://hunton.fi/wp-content/uploads/sites/16/2020/04/nativo-trefiberisolering-handbok-0624-fi-1corr.pdf>

Hunton 2024. Rakenteiden yleiskatsaus. Viitattu 8.4.2025. <https://hunton.fi/wp-content/uploads/sites/16/2023/10/konstruksjonsoversikt-fi-10-24-web.pdf>

Hunton N.d.. Tietoa Hunton nativo eristelevy. Verkkosivu. Viitattu 8.4.2025. <https://hunton.fi/tuotteet/seina/hunton-nativo-eristelevy/>

Hyvä tietää lämpöpuusta. N.d. ThermoWood. Viitattu 3.3.2025. https://rantakankaansaha.fi/esitteet/yleistietoa_puusta/thermonet1.pdf

Ilmatieteenlaitos N.d. Ilmastonmuutos. Viitattu 13.4.2025. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmastomuutoskysymyksiä>

Isover N.d. Laskurit. DOF-LÄMPÖ. Viitattu 8.4.2025. <https://www.isover.fi/laskurit#dof>

Jämsä S., Viitaniemi P. 1996. Puun modifiointi lämpökäsittelyllä. Espoo: VTT Offsetpaino. Viitattu 1.4.2025. <https://9pdf.co/document/y6e0p0lg-puun-modifiointi-%C3%A4mp%C3%B6k%C3%A4sittelyll%C3%A4.html>

Käkelä, P., Vinha J. 1999. Vesihöyryn siirtyminen seinärakenteissa diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. Tampereen tekninen korkeakoulu. Viitattu 24.3.2025. https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/116739/vinha_kakela_vesihoyryn_siirtyminen_seinarakenteissa.pdf;jsessionid=9A6C24366FF284FCC8291B58F6783D15?sequence=2

Kasper Käyhkö N.d. Omakotitalon riskirakenteet. Viitattu 23.4.2025. <https://www.rakennukset.fi/rakennukset/omakotitalon-riskirakenteet/>

Kokko E., Ojanen T., Salonvaara M., Hukka A. & Viitanen H. 1999. Puurakenteiden kosteustekninen toiminta. VTT Rakennustekniikka. Viitattu 13.4.2025. https://kosteusvauriokorjaus.savonia.fi/jdownloads/Muut%20julkaisut/VTT/Puurakenteiden_kosteustekninen_toiminta_VTT.pdf

Kokko, E. 2002. Hengittävä puurakenne. fysikaalinen toimintaperiaate ja vaikutukset sisäilmaan. Viitattu 6.5.2025. <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Hengitt%C3%A4v%C3%A4-puukuiturakenne.pdf>

Lämpöpuuyhdistys Ry. 2021. Thermowood käsikirja. Lämpöpuuyhdistys Ry. E-kirja. Viitattu 11.4.2025. https://asiakas.kotisivukone.com/files/thermowood.palvelee.fi/tiedostot/Thermowood-kasikirja_FIN_web.pdf

Linberg, R., Niemelä, T., Vinha, J. 1996. Puukuitueristeisen seinärakenteen hengittävyys. Tampereen tekninen korkeakoulu. Viitattu 24.3.2025. https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/116643/niemela_puukuitueristeisen_seinarakenteen_hengittavyys.pdf?sequence=2

Lylykangas K., Andersson A., Kiuru J., Nieminen J. & Päätaalo J. 2016 Rakenteellinen energiatehokkuus. Opas. RTT eristeteollisuus ja Ympäristöministeriö 2016.

Manelius, E. 2013. Rakennusmateriaalien vesihöyrynläpäisevyysskoekoiden kehittäminen Diplomityö. sivu 7–8. Viitattu 8.4.2025. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/21859/Manelius.pdf?sequence=3>

Mestarin taulukot 2024. Mestarin taulukot. Ote rakentajain kalenterista. Helsinki: Oy Nordprint Ab.

Mikrobit 2006. Solubiologia. Viitattu 13.4.2025. <https://www.solunetti.fi/fi/solubiologia/mikrobit/>

Mustankorkea N.d. Lajitteluohjeet ja jätteiden käsittely. Eristevilla. Viitattu 8.4.2025.

<https://www.mustankorkea.fi/jateneuvonta/lajitteluohjeet-ja-jatteiden-kasittely/mineraalivilla-ja-tasolasi/>

OECD 2015. Frascati Manual 2015: Guidelines for Collecting and Reporting Data on Research and Experimental Development. OECD Publishing. Viitattu 30.4.2025.

<https://doi.org/10.1787/9789264239012-en>

Ojala K. 2013. Talo ilman hometta. Riika: InPrint.

Ojanen, T., Salonvaara, T. 2002. Kuivumiskykyiset ja sateenpitävät rakenteet. VTT Rakennus- ja yhdyskuntateknikka. Espoo: Otamedia Oy. Viitattu 30.3.2025. https://sarjaweb.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2002/T2168.pdf?utm_source=chatgpt.com

PRKK 2024. Tuulettumaton puurunkoinen ulkoseinä – riskirakenne. Blogi. Viitattu 29.4.2025.

https://www.prkk.fi/blogi2/asuntokauppa/tuulettumaton-puurunkoinen-ulko-seina?utm_source=chatgpt.com

Reijula K. 1996. Kosteus- ja homevauriorakennuksien aiheuttamat terveysriskit ja sairauksien diagnostiikka. Lääketieteellinen aikakausikirja 1996. Duodesim. Viitattu 13.4.2025. <https://www.duodesimlehti.fi/duo60295>

RIL 250-2020 2020. Kosteuden hallinta ja homevaurioiden estäminen. Suomen rakennusinsinööriliitto RIL Ry. Hansaprint Oy.

RIL255-1-2014. 2014. Rakennusfysiikka 1 Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Helsinki: SUOMEN RAKENNUSINSINÖÖRIEN LIITTO RIL ry. e-kirja. Viitattu 31.3.2025.

RT 10-3528. 2023 Rakennusten kosteus- ja mikrobivauriot. Yleistä. RT-ohjekortti. Rakennustieto.

Siikanen L. & Siikanen, U. 2009. Rakennusaineoppi. 9 painos. Helsinki: Rakennustieto. 2023.

Siikanen U. 2014. Rakennusfysiikka, perusteet ja sovelluksia. Tampere: TammerPrint Oy

Siikanen U. N.d. Rakennusten lämpö- ja kosteustieteellisiä näkökohtia. Viitattu 30.4.2025.

https://kosteusvauriokorjaus.savonia.fi/jdownloads/Muut%20julkaisut/Rakentajain%20kalenteri/Rakennusten_lampo_ja_kosteustieteellisia_ominaisuuksia_-_Siikanen_2012.pdf

Siparila. N.d. Lämpökäsitelty puu on ylivoimainen terassimateriaali. <https://www.siparila.com/lampokasitelty-puu-on-ylivoimainen-terassimateriaali/>

Siparila. N.d. Perinteitä ja innovaatioita yhdistäen. Viitattu 24.3.2025. <https://www.siparila.com/siparila/tarina/>

Siparila. N.d. Vastuullisuus. Viitattu 13.4.2025. <https://www.siparila.com/siparila/vastuullisuus/>

Sojakka, J. 2025. Toimitusjohtaja. Siparila Oy. Haastattelu 29.1.2025

Tampereen yliopisto N.d. Suomalainen homemalli. Viitattu 13.4.2025. <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/>

Tang H. 2021. Engineering research: Design, methods, and publication. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd.

TENK 2024. Hyvät tieteelliset menettelytavat. Tutkimuseettinen neuvottelukunta. Viitattu 8.5.2025. [Hyvä tieteellinen käytäntö \(HTK\) | Tutkimuseettinen neuvottelukunta](#)

THL 2023. Kosteus- ja mikrobivaurio rakenteissa. terveyden ja hyvinvoinnin laitos. Viitattu 13.4.2025. <https://thl.fi/aiheet/ymparistoterveys/sisailma/kosteus-ja-mikrobivaurio-rakennuksessa>

Tieteen termipankki 2025. Tieteen termipankki, ympäristötieteet. Viitattu 8.5.2025. <https://tieteentermipankki.fi/wiki/Ymp%C3%A4rist%C3%B6tieteet:absorptio>

Tieteen termipankki 2025. Tieteen termipankki, ympäristötieteet. Viitattu 8.5.2025. <https://tieteentermipankki.fi/wiki/Ymp%C3%A4rist%C3%B6tieteet:kostuvuus>

Turunen H., Väärä T. 2014. Modifioidut puutuotteet. Viitattu 11.4.2025. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/73849/MODIFIOIDUT-PUUTUOTTEET_web.pdf?sequence=1

United Nations General Assembly. 2015. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development (A/RES/70/1). United Nations. Viitattu 13.4.2025. <https://docs.un.org/en/A/RES/70/1>

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., Suonketo J.,

Jokisalo J., Koskenvesa A. & palolahti T. 2023. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen yliopisto. ISBN 978-952-15-2949-8. Viitattu 13.4.2025.

https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/116675/vinha_ilmastonmuutoksen_ja_lammoneristyksen_lisayksen_vaikutukset.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Wong, K. 2011. Thermodynamics for engineers, second edition. Florida: CRC Press (Taylor and Francis). Viitattu 31.3.2025. <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.jamk.fi:2443/lib/jypoly-ebooks/reader.action?docID=1446455&ppg=440>

WUFI 2025. Mikä on WUFI?. Viitattu 28.4.2025. <https://wufi.de/en/software/what-is-wufi/>

Liitteet

Liite 1. Puukuitueristeen laskut

Puukuitueriste, laskut

Hunton (2022.) suoritustasoilmoituksen mukaan Nativo puukuitueristelevy on saanut vesihöyryn diffuusiovastuskertoimen (3/5), jossa arvo on märkänä 5 ja arvo 3 kuivana. Puukuitueristeelle vesihöyrynläpäisevyys, δ_p arvo arvioidaan siis laskemalla.

Vesihöyrynläpäisevyys lasketaan kaavalla:

jossa:

$$\delta_p = \text{Aineen vesihöyrynläpäisevyys} \quad [kg/(m^2 * s * Pa)]$$

$$\delta_a = \text{ilman vesihöyrynläpäisevyys} \quad [kg/(m^2 * s * Pa)]$$

joka voidaan laskea kaavalla:

Kaava 1. Ilman vesihöyrynläpäisevyys

(Manelius 2013 7–8)

$$\delta_a := \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot T^{0.81}}{P_n}$$

jossa:

$$T = \text{Ilman lämpötila} \quad [K]$$

$$P_n = \text{Normaali ilmanpaine} \quad [Pa]$$

Standardioloissa, STP normaali ilmanpaine on 101,325 kilopascalialia [kPa] ja ilman lämpötila on 0 °C, eli 273,15K (Atkins & De Paula 2014, 35.)

saadaan ilman vesihöyrynläpäisevyys,

$$\delta_a = 1,86 \cdot 10^{-10} \quad [kg/(m^2 * s * Pa)]$$

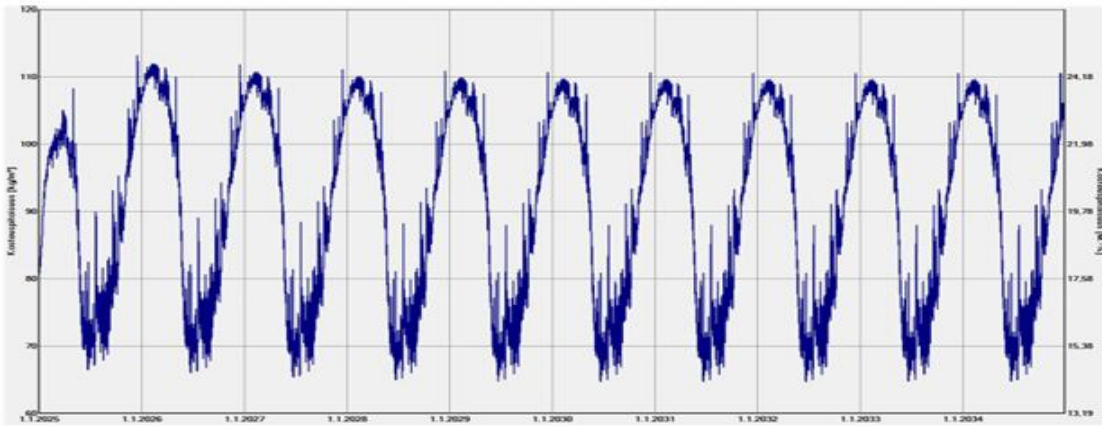
Nyt kuivissa olosuhteissa saadaan tulokseksi,

$$\delta_p = 6,19 \cdot 10^{-11} \quad [kg/(m^2 * s * Pa)]$$

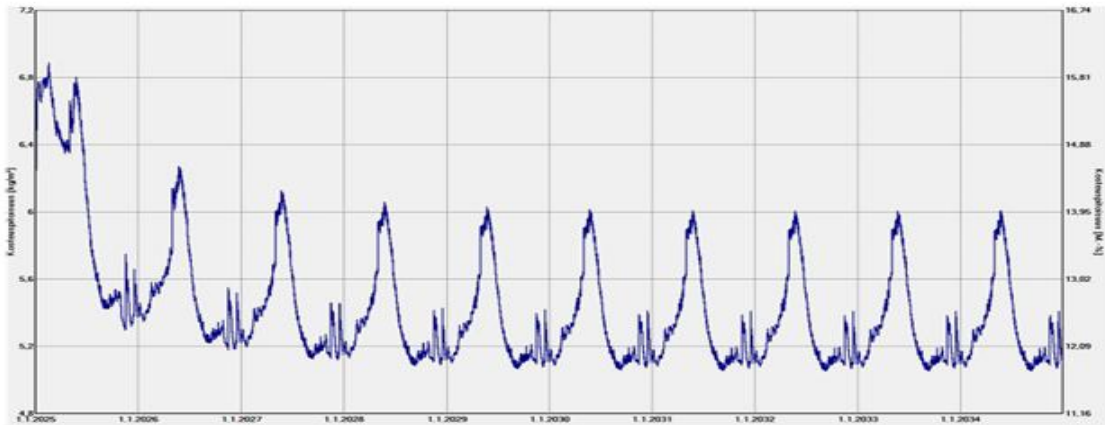
Saatua lukuarvoa käytetään puukuitueristeen vesihöyrynläpäisykertoimena laskussa

Liite 2. Puukuitueristeinen rakenne tulokset

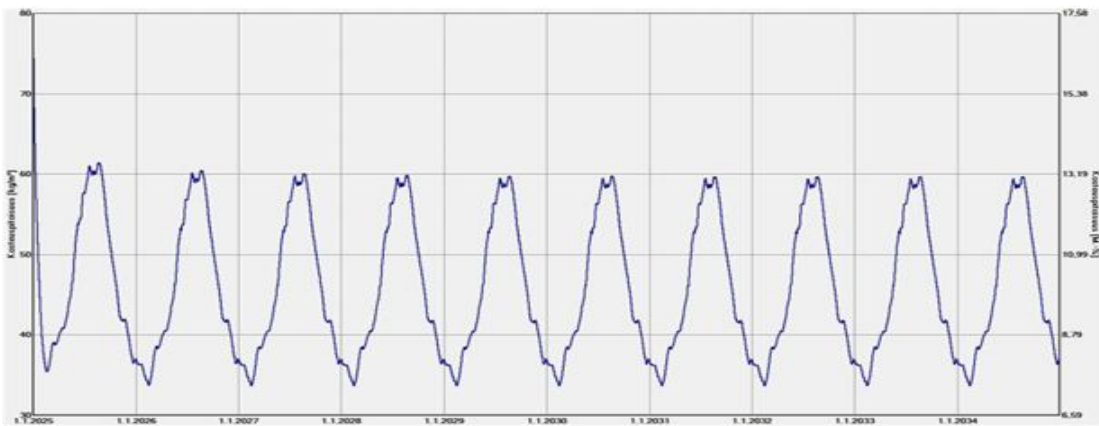
Puukuitueristeinen rakenne



Kuva 1. Kosteuspitoisuus, kg/m³, Puulevy, ulkopinta

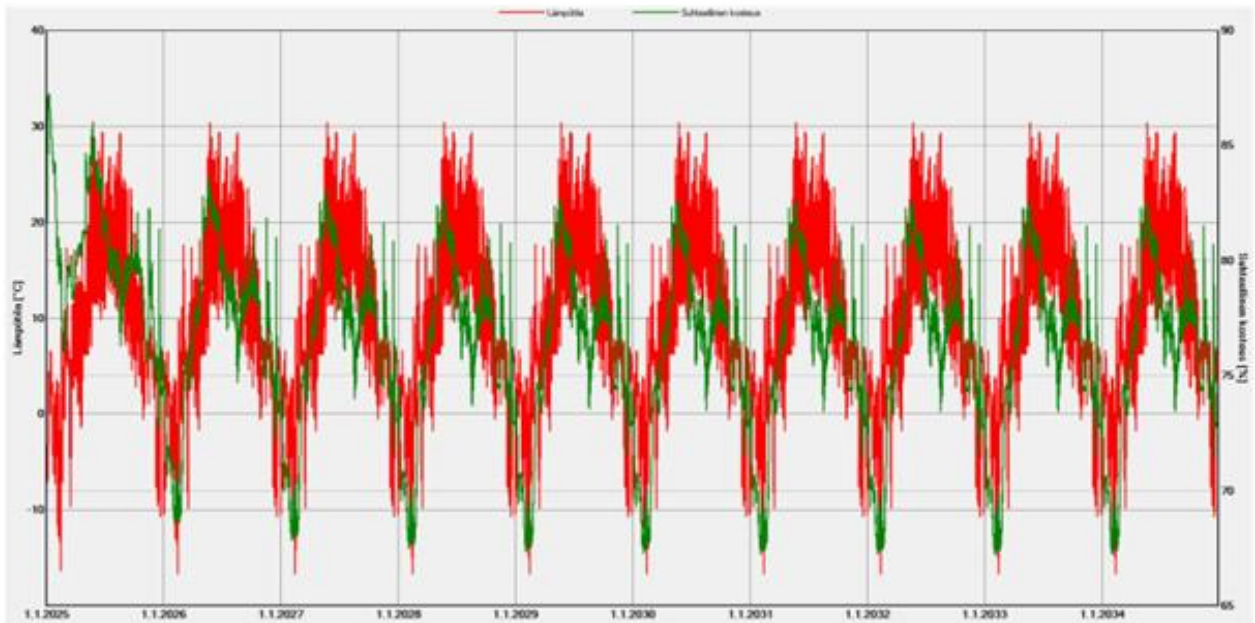


Kuva 2. Kosteuspitoisuus, kg/m³, Puukuitueriste

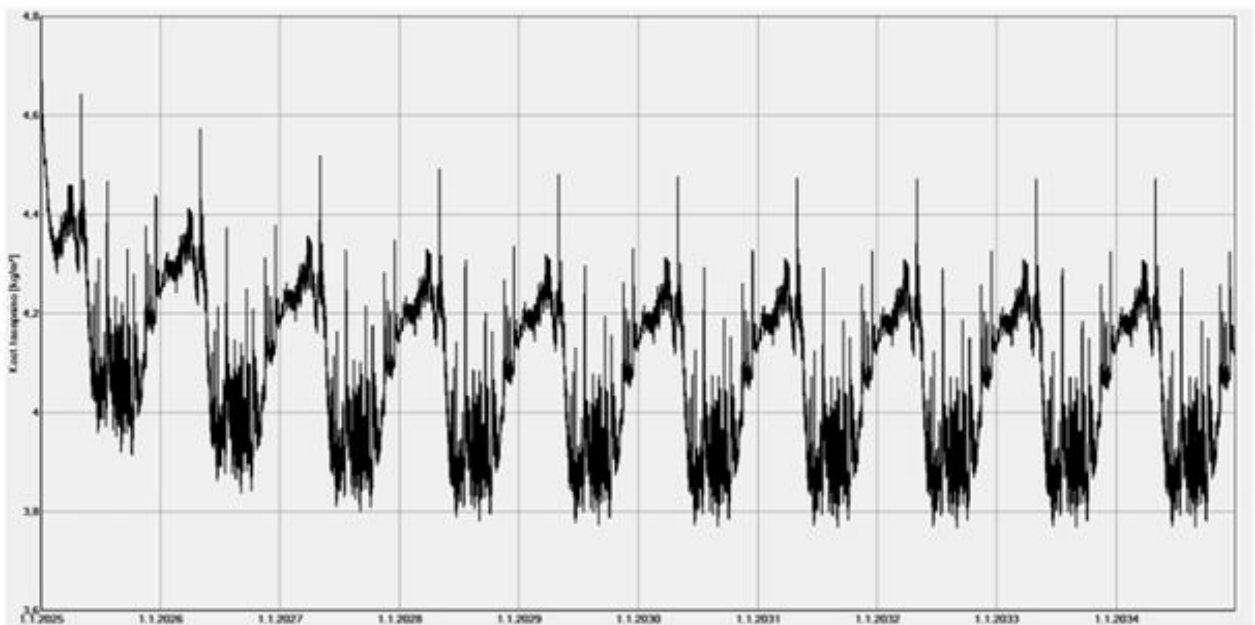


Kuva 3. Kosteuspitoisuus, kg/m³, Puulevy, sisäpinta

Puukuitueristeinen rakenne



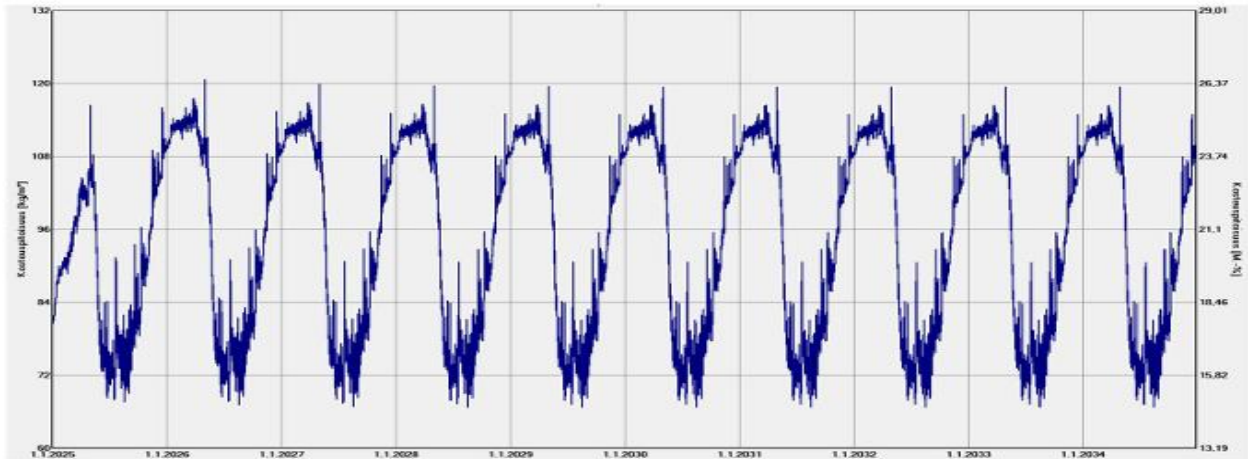
Kuva 4. puukuitueriste, 60 mm



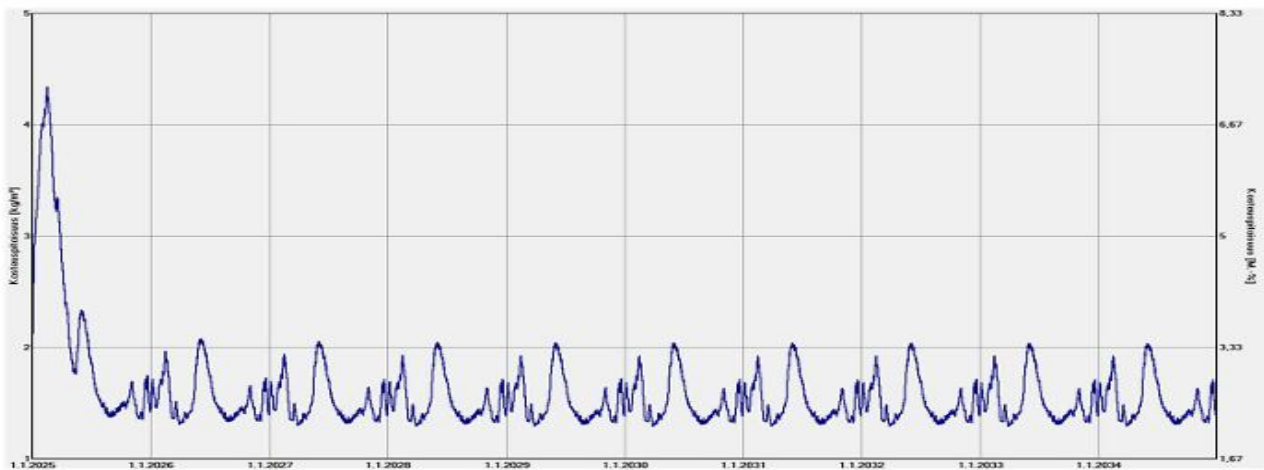
Kuva 5. kokonaiskosteus

Liite 3. Mineraalivillaeristeinen rakenne tulokset

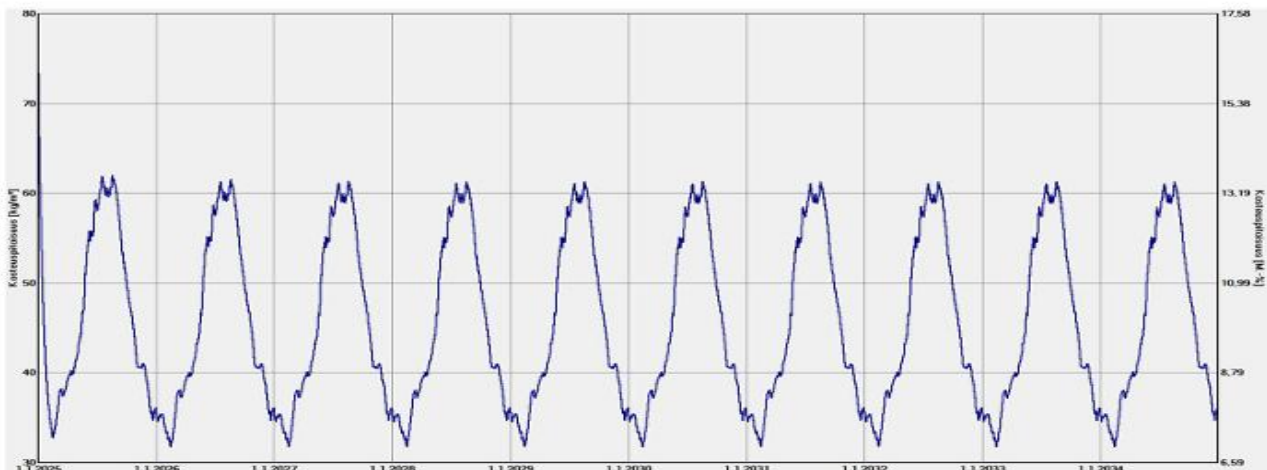
Mineraalivillaeristeinen rakenne



Kuva 1. Kosteuspitoisuus, kg/m³, puulevy, ulkopinta

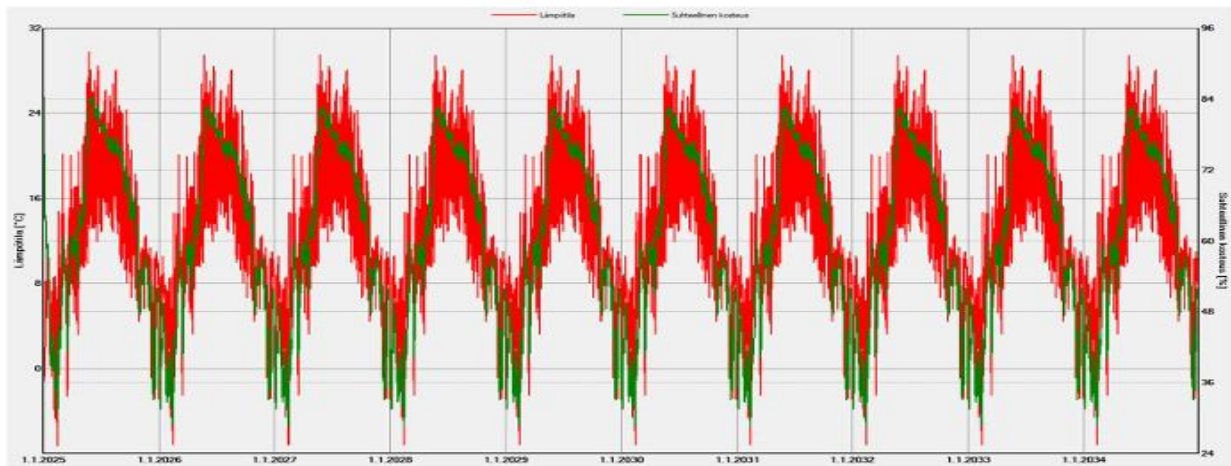


Kuva 2. Kosteuspitoisuus, kg/m³, Mineraalivilla

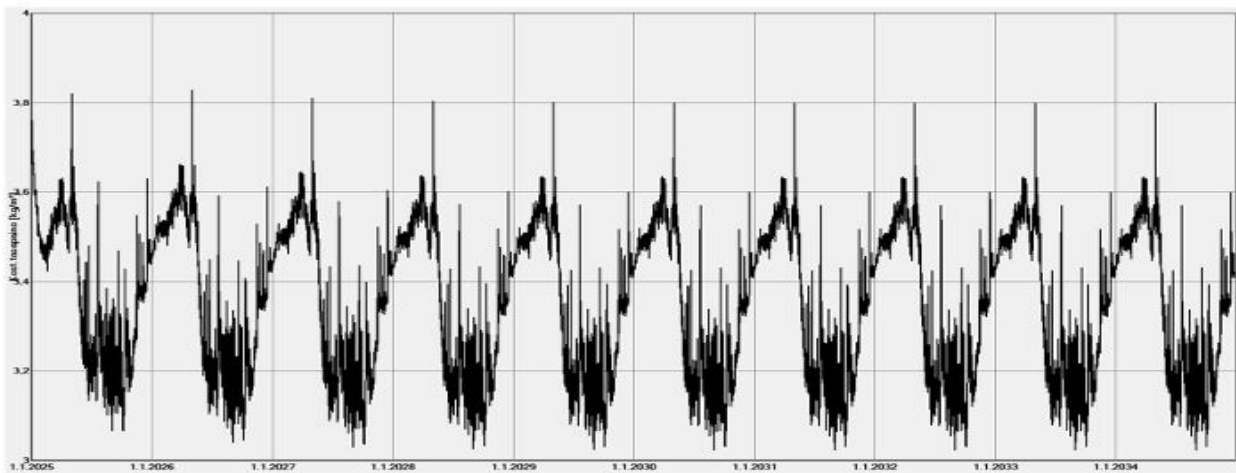


Kuva 3. Kosteuspitoisuus, kg/m³, puulevy, sisäpinta

Mineraalivillaeristeinen rakenne



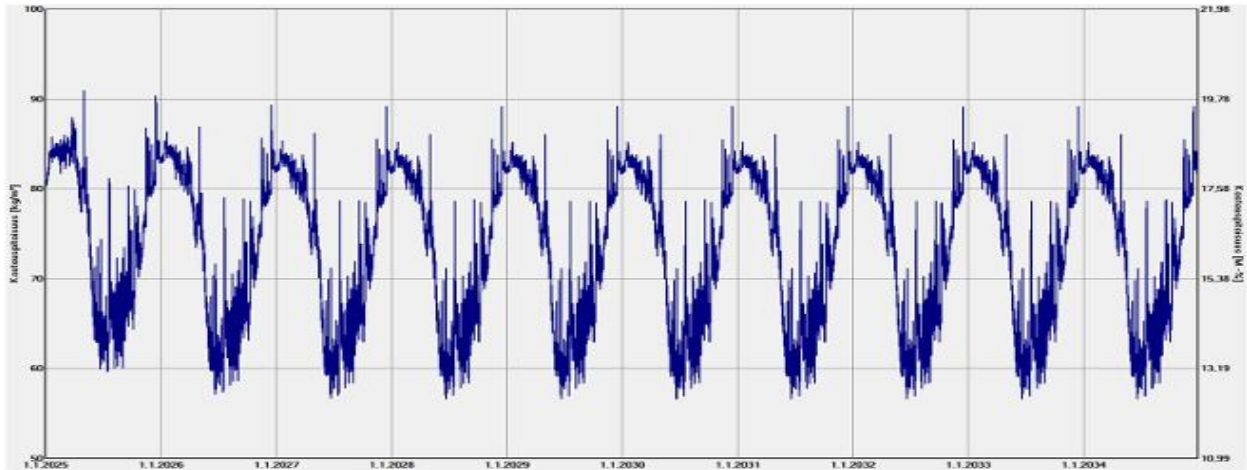
Kuva 4. Mineraalivilla, n. 80mm, lämpötila - suhteellinen kosteus



Kuva 5. Kokonaiskosteus, Mineraalivillarakenne

Liite 4. Polyuretaanieristeinen rakenne tulokset

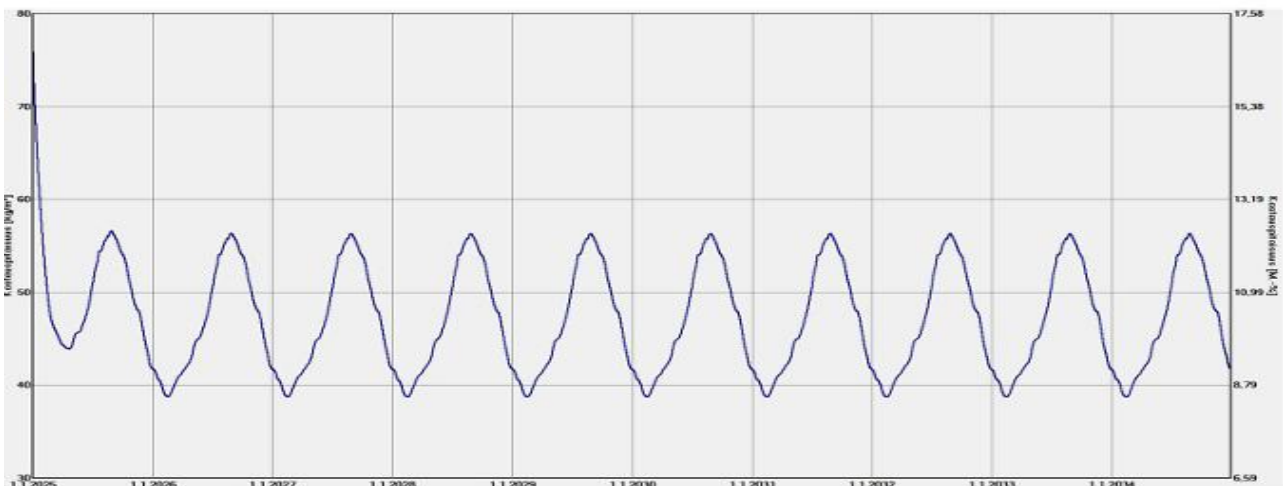
Polyuretaanieristeinen rakenne



Kuva 1. Kosteuspitoisuus, kg/m³, puulevy, ulkopinta



Kuva 2. Kosteuspitoisuus, kg/m³ PU

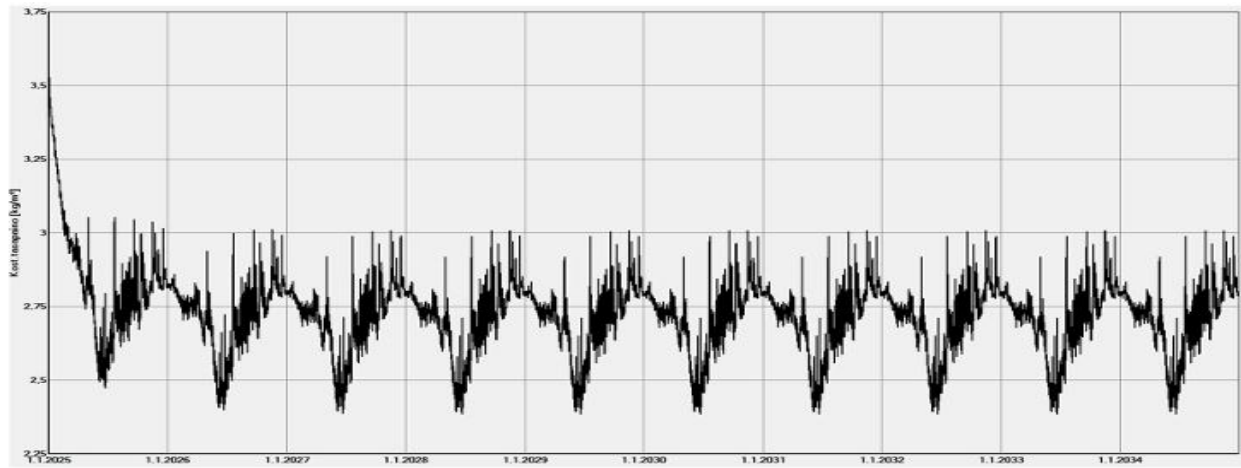


Kuva 3. Kosteuspitoisuus, kg/m³ puulevy, sisäpinta

Polyuretaanieristeinen rakenne



Kuva 4. lämpötila - suhteellinen kosteus, PU n. 60 mm



Kuva 5. kokonaiskosteus, PU-rakenne