



Aliisa Hyppänen

Vesihöyrynläpäisykyky-menetelmän tutkiminen sisämaalituotteilla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

Insinöörityö

1.5.2022

Tiivistelmä

| | |
|-----------------------|--|
| Tekijä: | Aliisa Hyppänen |
| Otsikko: | Vesihöyrynläpäisykyky-menetelmän tutkiminen sisämaali- tuotteilla |
| Sivumäärä: | 42 sivua + 3 liitettä |
| Aika: | 1.5.2022 |
| Tutkinto: | Insinööri (AMK) |
| Tutkinto-ohjelma: | Bio- ja kemiantekniikka |
| Ammatillinen pääaine: | Materiaali- ja pinnoitetekniikka |
| Ohjaajat: | Lehtori Arto Yli-Pentti Team Leader Lauri Lintuvuori |

Insinööriyön tavoitteena oli kehittää menetelmää, joka on suunnattu vesihöyrynläpäisykyvyn arvojen mittaamiseen maalituotteille. Menetelmäkehitys koostui useammasta osasta. Tämän insinööriyön aikana keskityttiin laitteistojen tutustumiseen ja niiden vertailuun. Työ antoi pohjaa yrityksen uuden menetelmäohjeen ja laskenta-pohjan käyttöönottoon. Insinööriyössä käytettiin Tikkurila Oyj:n tuotteita ja laitteis-toja.

Lähtökohtana hyödynnettiin yrityksen sisäistä menetelmäohjetta ja standardia, joka on suunniteltu vesihöyrynläpäisykyvyn arvojen mittaamiseen maalituotteille. Laitteis-tojen vertailutestit suunniteltiin standardin ja teorian pohjalta.

Käytännön työssä tutustuttiin muutamaa eri vaihtoehtoiseen laitteistoon (kuppeihin), joilla menetelmä voitiin suorittaa. Testaus toteutettiin kupeilla hyödyntäen sellaisia näytekappaleita, joiden voitiin arvioida olevan läpäiseviä, puoliläpäiseviä ja tiiviitä. Jo-kaiselle testatulle näytteelle tehtiin ja toteutettiin viisi rinnakkaismäärittystä, joista tu-lokset laskettiin. Testaukset toteutettiin vakio-olosuhteissa.

Tulosten mukaan kupit eivät osoita suurta eroa keskenään, jos saatuja tuloksia luoki-tellaan julkisivutuotteille soveltuvaa luokitusta hyödyntäen. Läpäisevillä ja puoliläpäi-sevillä tuotteilla selkeitä eroja kupprien välille ei saatu. Tiiviin näytteen tuloksia tarkas-tellessa voidaan havaita, että tämän testisarjan perusteella muovikupit antavat kai-kista toistettavimpia tuloksia.

Avainsanat: maali, diffuusio, vesihöyrynvastus, suhteellinen diffuusio-
vastus

Abstract

Author: Aliisa Hyppänen
Title: Examination of the Water Vapour Transmission method on Interior Paint Products
Number of Pages: 42 pages + 3 appendices
Date: 1 May 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Biotechnology and Chemical Engineering
Professional Major: Materials Technology and Surface Engineering
Supervisors: Arto Yli-Pentti, Senior Lecturer
Lauri Lintuvuori, Team Leader

The aim of the engineering thesis was to develop a method aimed at measuring the values of water vapor permeability for paint products. The method development consisted of several parts. During this thesis, the focus was on becoming acquainted with the equipment and comparing them. The thesis provided the basis for the implementation of the company's new method guidelines and the calculation template. Tikkurila Oyj's products and equipment were used in the engineering thesis.

The starting point was to use the company's internal method guide and standard designed to measure water vapor permeability values for paint products. The comparison tests for equipment were designed based on standard and theory.

In the experimental part of the thesis, a few different alternative equipment (cups) were introduced. The samples studied were permeable, semipermeable and dense. Five parallel determinations were made for each sample tested, from which the results were calculated. Tests were conducted under standard conditions.

According to the results, there are no large differences between the cup options if the results obtained are classified using the classification suitable for facade products. No clear differences were found between the permeable products and those with semipermeable products. The results for the dense sample indicate that the plastic cup tends to provide the most repeatable results of all.

Keywords: Paint, Diffusion, Water Vapour Resistance, Resistance to Vapour Diffusion

Sisällys

Symbolit

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Maalin osat | 2 |
| 2.1 | Sideaine | 2 |
| 2.2 | Liuottimet | 3 |
| 2.3 | Pigmentit ja täyteaineet | 3 |
| 2.4 | Apuaineet | 4 |
| 3 | Kosteus | 4 |
| 3.1 | Ilmankosteus | 4 |
| 3.2 | Suhteellinen kosteus | 6 |
| 3.3 | Absoluuttinen kosteus | 6 |
| 3.4 | Aineen kosteus | 7 |
| 4 | Kosteuden siirtyminen | 8 |
| 4.1 | Kosteuden siirtymistavat | 8 |
| 4.2 | Painovoimainen ja kapillaarinen siirtyminen | 10 |
| 4.3 | Vesihöyryn konvektio | 10 |
| 4.4 | Diffuusio | 11 |
| 5 | Materiaalin kyky läpäistä vesihöyryä | 12 |
| 6 | Vesihöyrynläpäisynopeuden mittausperiaate | 15 |
| 6.1 | Vesihöyrynläpäisykyvyn mittausstandardit | 15 |
| 6.2 | Kuppimenetelmät | 16 |
| 6.2.1 | Kuppimenetelmän perusperiaate | 16 |
| 6.2.2 | Olosuhteet | 17 |
| 6.2.3 | Testaukseen vaikuttavat tekijät | 17 |
| 7 | Työn suoritus | 18 |
| 7.1 | Standardit | 19 |
| 7.2 | Tarvittava välineistö ja materiaalit | 21 |
| 7.3 | Näytekappaleiden valmistus | 25 |

| | | |
|-----|---|----|
| 8 | Laskenta | 26 |
| 8.1 | Vesihöyrynläpäisynopeus | 26 |
| 8.2 | Suhteellinen diffuusiovastuskerroin | 27 |
| 8.3 | Diffuusiovastuskerroin | 28 |
| 8.4 | Vesihöyrynvastus, vesihöyrynläpäisevyysarvo ja vesihöyrynläpäisykerroin | 29 |
| 9 | Tulokset | 30 |
| 9.1 | Paperin läpäisevyysarvot | 30 |
| 9.2 | Läpäisevän tuotteen tulokset | 30 |
| 9.3 | Puoliläpäisevä (1) tuotteen tulokset | 31 |
| 9.4 | Puoliläpäisevän (2) tuotteen tulokset | 32 |
| 9.5 | Tiiviin tuotteen tulokset | 33 |
| 10 | Johtopäätökset ja yhteenveto | 35 |
| 11 | Pohdinta | 38 |
| | Lähteet | 40 |
| | Liitteet | |
| | Liite 1: Lasisilla kupeilla saadut tulokset | |
| | Liite 2: Muovisilla kupeilla saadut tulokset | |
| | Liite 3: Metallisilla kupeilla saadut tulokset | |

Symbolit

| | |
|---------------------------|---|
| A | Kosteuden läpivirtaukselle altistunut pinta-ala |
| d | Paksuus, kertoo näytekappaleen tai alustan paksuuden. Yksiköinä μm tai m. |
| G | Kosteuden läpivirtaus, kertoo kuinka paljon vesihöyryä on kulkeutunut näytteen lävitse. Yksikkö $G = [\text{kg/s}]$. |
| S_d | Suhteellinen diffuusiovastus, kertoo rakenteen läpi tapahtuvaa diffuusion nopeutta rakenteen paksuuden suhteen. Yksikkö $S_d = [\text{m}]$. |
| V | Vesihöyrynläpäisy nopeus, kertoo kuinka paljon vesihöyryä on haihtunut tietyssä aikayksikössä. |
| W_v tai W_p | Vesihöyrynläpäisykerroin, kertoo vesimäärän, joka vakiotilassa läpäisee tietyssä ajassa tietyn alan, kun kerrosten eri puolilla on vesihöyryn osapaine-ero on yksikön suuruinen. Vesihöyrynläpäisykerroimen yksiköinä $W_v = [\text{m/s}]$ ja $W_p = [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$. |
| Z_v tai Z_p | Vesihöyrynvastus on vesihöyrynläpäisykerroimen W käänteisarvo. Yksiköinä $Z_v = [\text{s/m}]$ ja $Z_p = [\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}]$. |
| δ_v tai δ_p | Vesihöyrynläpäisevyys, kertoo vesimäärän joka vakiotilassa läpäisee tietyssä ajassa tietyn alan kokoisen ja tietyn paksuisen ainekerroksen, kun kerrosten eri puolilla on vesihöyryn osapaine-ero on yksikön suuruinen. Vesihöyrynläpäisevyyden yksiköt: $\delta_v = [\text{m}^2/\text{s}]$ ja $\delta_p = [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$. |
| μ | Diffuusiovastuskerroin, kertoo materiaalin diffuusiovastuksen suuruuden verrattuna saman paksuiseen ilmakerrokseen samassa lämpötilassa ja paineessa. Diffuusiovastuskerroin on dimensioton. |

1 Johdanto

Insinööri työ on tehty toimeksiantona Tikkurila Oyj:n TKI-osastolle (kesäkuusta 2021 alkaen PPG Tikkurila). Tikkurila Oyj on 1862 perustettu maalialan yritys. Yrityksellä on työntekijöitä 11 eri maassa ja tuotantolaitoksia kuudessa eri maassa.

Tämän insinööri työnsä tavoitteena on tutkia menetelmää, joka soveltuu mittaamaan maalituotteiden vesihöyrynläpäisykyvyn arvoja. Menetelmällä saadaan tietoa tärkeää tietoa maalin kosteusteknisistä ominaisuuksista, kyvystä päästää vesihöyryä lävitseen ja maalituotteen hengittävydestä.

Käytännön työssä tutustuttiin muutamaan eri vaihtoehtoiseen laitteistoon (kuppeihin), joilla menetelmä voidaan suorittaa, ja toteutettiin testaus hyödyntäen sellaisia näytekappaleita, joiden voitiin arvioida olevan läpäiseviä, puoliläpäiseviä ja tiiviitä.

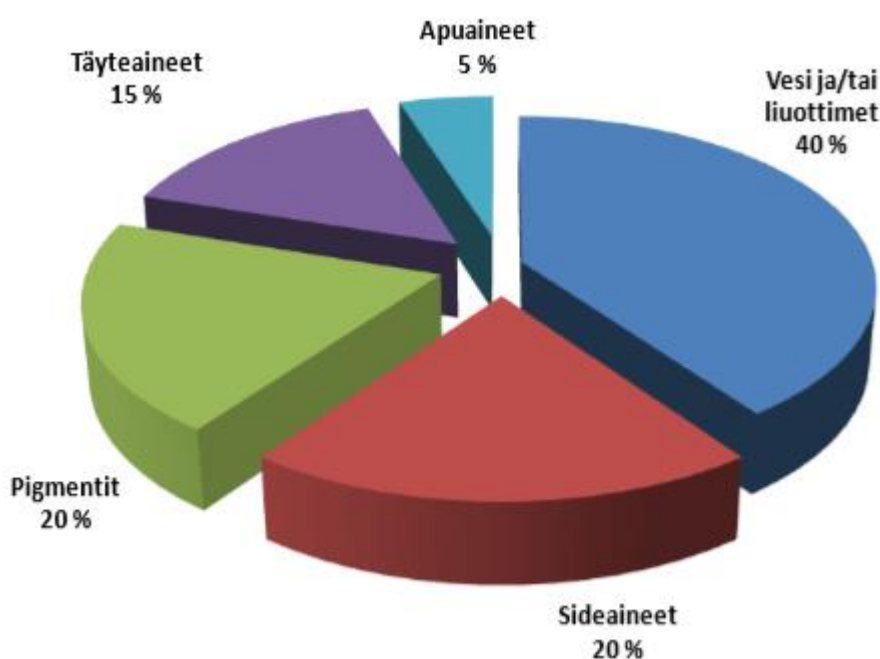
Muut vesihöyrynläpäisy nopeuteen vaikuttavat tekijät, kuten esimerkiksi alusta, kalvonpaksuus, eri olosuhdevaihtoehdot ja kuppiin asetettava liuos, on pyritty pitämään mahdollisimman vakiona. Kuppien soveltuvuuden tarkastelussa on mietitty parasta vaihtoehtoa tulosten tarkkuuden, kuppien ominaisuuksien ja käyttäjäystävällisyyden perusteella.

Kuppityyppien tutkimisen lisäksi tutustutaan rakennusmateriaaleille soveltuvaan luokittelustandardiin ja mietitään sen soveltuvuutta tässä tutkituille sisämaalityönteille. Näiden tutkimustavoitteiden lisäksi on pyrkimys harmonisoida yrityksen sisäinen toimintaohje ja menetelmän laajentaminen myös muihin tuotekategorioidiin, joille menetelmä soveltuu.

2 Maalin osat

Maali voidaan määritellä nestemäiseksi tuotteeksi, joka käsiteltävälle pinnalle levitettynä muodostaa kuivuessaan alustaan tarttuvan, peittävän kalvon [1].

Maali koostuu tyypillisesti sideaineesta, pigmenteistä ja täyteaineista, vedestä ja liuotteista ja apuaineista [2]. Kuvassa 1 maalin esimerkkikoostumus.



Kuva 1 Maalin esimerkkikoostumus kaaviokuvana [3]. Prosenttiluvut eivät tarkkoja.

2.1 Sideaine

Sideaine voi olla kiinteä tai nestemäinen polymeeri tai esimerkiksi luonnonmateriaali. Sideaineen tehtävänä on sitoa yhteen maalin ainesosat ja kiinnittää maali alustaansa. [3.] Sideaineen mukaan määräytyy yleensä maalin monet ominaisuudet, kuten esimerkiksi kuivuminen, mekaaniset ominaisuudet ja kestävyys [1].

Yleisimpiä sideainetyyppejä ovat polymeeridispersiot, jotka perustuvat tyypillisesti joko polyakrylaattiin tai polyvinyyliasetaattiin ja öljyt ja alkydit, jotka ovat kasviöljypohjaisia kokonaan tai osittain. [2.]

2.2 Liuottimet

Liottimen tehtävä maalissa on säätää maalin viskositeettia. Usein liuotin on haihtuva yhdiste, joten maalin kuivuessa myös maalin liuottimet haihtuvat. Liuotin vaikuttaa myös maalin juoksevuuteen, applikointiominaisuuksiin ja stabiiliisuuteen maalin ollessa märkä. Liuottimen määrä maalissa vaihtelee maalityypin mukaan. [4.] Taulukossa 1 esitelty erilaisten maalityyppien liuotinmääriä vuodelta 2003.

Taulukko 1 Erilaisten maalityyppien tyypillisiä liuotinmääriä vuonna 2003. Taulukkoon valittu tämän työn kannalta oleelliset pinnoitetyypit [5].

| Pinnoitetyyppi | Tyypillinen liuotinmäärä (%) |
|------------------------------|-------------------------------------|
| Dispersiomaalit sisäkäyttöön | 0–2 |
| Dispersiomaalit ulkokäyttöön | 3–5 |
| Tasoitteet | 3–5 |
| Vesiohenteiset pohjamaalit | 3–5 |
| Vesiohenteiset maalit | 8–18 |

2.3 Pigmentit ja täyteaineet

Pigmentit ovat hienojakoisia värijauheita, jotka lisätään maaliin antamaan maalille väriä ja peittokykyä. Tietyt pigmentit voivat myös parantaa maalin ruosteenesto-ominaisuuksia ja suojata alustaa UV-säteilyltä. Pigmentit voidaan jakotella epäorgaanisiin ja orgaanisiin pigmentteihin. Aikaisemmin pigmenteissa käytetyt raskasmetallit on korvattu muilla ainesosilla. [5.]

Tavallisimmin käytettyjä pigmenttejä ovat valkoinen titaanidioksidi ja rautaoksidit. Puhtaissa sinisissä, vihreissä, punaisissa, keltaisissa ja oransseissa väreissä käytetään synteettisiä orgaanisia pigmenttejä. [2.] Epäorgaanisten pigmenttien peittokyky on hyvä, mutta orgaanisten pigmenttien värjäysvoima on parempi [6].

Valkoisten ja värillisten pigmenttien peittokyky on parempi kuin täyteaineilla. Täytepigmenteillä voidaan säätää maalin viskositeettia, täyttävyyttä, kalvon kovuutta ja vaikuttaa maalin mekaanisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin. Täyteaineita on mm. kaoliini, talkki tai dolomiitti. [6.]

2.4 Apuaineet

Maaliin lisätään erilaisia apuaineita, joiden osuus valmistuskaavassa on pieni. Muun muassa vaahdonestäjät, dispergointiaineet ja säilöntäaineet ovat apuaineita. Nämä helpottavat tuotteen valmistusta ja parantavat tuotteen erilaisia ominaisuuksia, kuten esimerkiksi helpottavat levittymistä, vähentävät valumista ja parantavat säilymistä. [6.]

3 Kosteus

Kosteudella tarkoitetaan usein kemiallisesti sitoutumatonta vettä joko kaasumaisessa, nestemäisessä tai kiinteässä olomuodossa, eli kosteus voi ilmentyä vedenä, vesihöyrynä tai jäänä [7, s. 65]. Kosteus ilmaistaan usein prosentteina.

3.1 Ilmankosteus

Ilmankosteus eli ilman vesipitoisuus ilmaisee, kuinka paljon ilmassa on vettä. Ilmankosteustilaa usein ilmaistaan absoluuttisena kosteutena tai suhteellisena

kosteutena. [8.] Vesihöyryn osapaine ja vesihöyrysisältö ovat keskenään suoraan verrannolliset. Yhteys vesihöyryn osapaineelle ja vesihöyrypitoisuudelle saadaan johdettua kaasujen tilanyhtälöstä (Kaava 1):

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

jossa p vastaa kaasun painetta (Pa),

V vastaa kaasun tilavuutta

m vastaa kaasun massaa

M on kaasun normaalipaino

R on yleinen kaasuvakio 8314,3 J/kmol·K

T vastaa lämpötilaa kelvineissä.

Kaasujen tilanyhtälöstä saadaan vesihöyrypitoisuus ja yhteys johdettua vesihöyryn osapaineen ja vesihöyrypitoisuuden välille (Kaava 2) [7, s. 68, 9.]

$$v = \frac{p_v \cdot M_v}{R \cdot T} = \frac{p_v}{461,4 \cdot T} \quad (2)$$

jossa p_v vastaa vesihöyryn osapainetta ja v vesihöyrysisältöä.

3.2 Suhteellinen kosteus

Suhteellinen kosteus (RH) ilmoittaa prosentteina ilman sisältämän vesihöyryn määrän suhteessa maksimimäärään, jonka tietyn lämpöisessä ja paineessa ilma voi sisältää ilman sen tiivistymistä vedeksi [10.] Suhteellinen kosteus ei voi ylittää 100 %:a.

| Suhteellinen kosteus: | 20% | 40% | 60% | 80% | 90% | 100% |
|-----------------------|---|------|------|------|------|------|
| Ilman lämpötila °C | absoluuttinen kosteus: g/m ³ | | | | | |
| 80 | 58 | 116 | 174 | 232 | 261 | 290 |
| 70 | 39 | 78 | 118 | 157 | 176 | 196 |
| 60 | 26 | 52 | 78 | 104 | 117 | 130 |
| 50 | 17 | 33 | 50 | 66 | 75 | 83 |
| 40 | 10 | 20 | 31 | 41 | 46 | 51 |
| 30 | 6,1 | 12 | 18 | 24 | 27 | 30 |
| 20 | 3,5 | 6,9 | 10 | 14 | 16 | 17 |
| 10 | 1,9 | 3,8 | 5,6 | 7,5 | 8,5 | 9,4 |
| 0 | 1,0 | 1,9 | 2,9 | 3,9 | 4,4 | 4,9 |
| -10 | 0,44 | 0,88 | 1,3 | 1,8 | 2,0 | 2,2 |
| -20 | 0,18 | 0,35 | 0,53 | 0,70 | 0,79 | 0,88 |
| -25 | 0,11 | 0,22 | 0,33 | 0,44 | 0,50 | 0,55 |
| -30 | 0,07 | 0,13 | 0,20 | 0,26 | 0,30 | 0,33 |

Kuva 2 Taulukossa näkyy absoluuttisen kosteuden erot, mikäli ilman lämpötila tai suhteellinen kosteus vaihtuu. Pystyriveillä on lämpötilat. Esim. 20 °C asteen lämpötilassa ja 60 % suhteellisen kosteuden omaavan tilan absoluuttinen kosteus on 10 g/m³. Suhteellisen kosteuden ja ilman lämpötilan kasvaessa absoluuttisen kosteuden määrä on suurempi. [8.]

3.3 Absoluuttinen kosteus

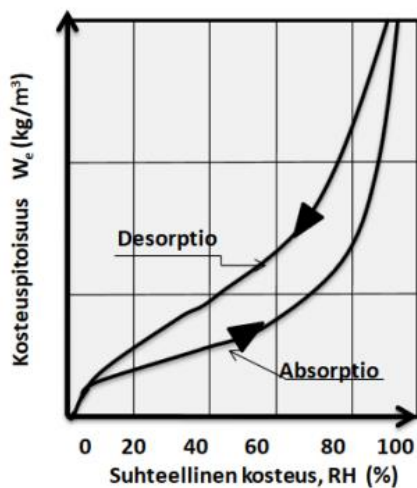
Absoluuttinen kosteus tarkoittaa suuretta, joka ilmaisee ilman sisältämän kosteuden massan määrän suhteessa kuutiometriin ilmaa [11]. Absoluuttisen kosteuden yksikkö on siis kg/m³.

3.4 Aineen kosteus

Aineen kosteusmäärä voidaan ilmoittaa kosteuden massan ja kuivan aineen massan välisenä suhteena eli prosentteina kuivapainosta. Kosteuden voi myös ilmaista kosteuden massan ja tilavuuden välisenä suhteena. [9.]

Hygroσκοoppisuudella tarkoitetaan materiaalin kykyä luovuttaa kosteutta ympäristöönsä ja materiaalin kykyä sitoa kosteutta itseensä [12]. Hygroσκοoppisuus vaihtelee paljon materiaalien välillä. Aineen asettuessa normaalitilaan ympäristönsä kanssa tilaa kutsutaan hygroσκοoppiseksi tasapainokosteudeksi [13]. Tasapainokosteuden saavuttaminen ympäristöolosuhteiden muuttuessa kestää eri verran erityyppisillä materiaaleilla.

Tasapainokosteus ilmaistaan usein sorptiokäyränä (kuva 2), joka kuvaa kuinka paljon kosteutta aine voi hygroσκοoppisessa tasapainotilassa sisältää eri suhteellisissa kosteuksissa [14].



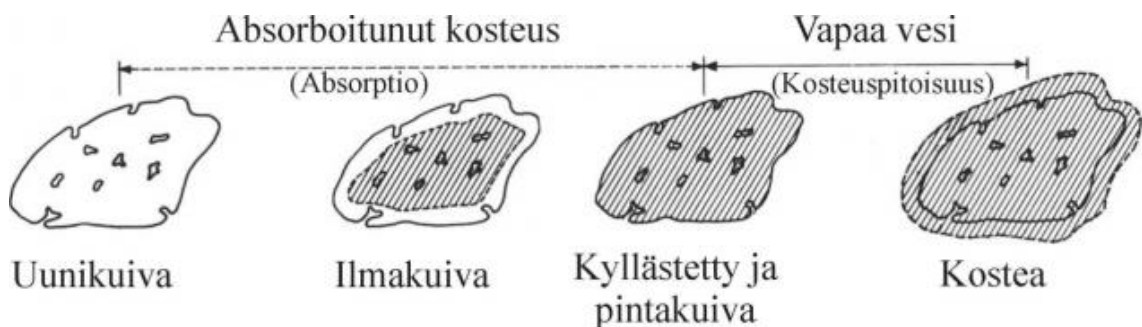
Kuva 3 Sorptiokäyrä, eli kosteuden tasapainokäyrä [15].

Ympäristöolosuhteiden muuttuessa aineet, jotka läpäisevät vesihöyryä hyvin, saavuttavat tasapainotilan nopeammin, kuin vesihöyryä huonosti läpäisevät. Nopeuteen vaikuttaa myös ainepaksuus. Pienten huokoisten materiaalien

huokoset varastoivat enemmän hygroskooppista kosteutta ilman suhteellisen kosteuden muuttuessa kuin sellaisten materiaalien, joilla huokoset ovat suuria. [17.]

4 Kosteuden siirtyminen

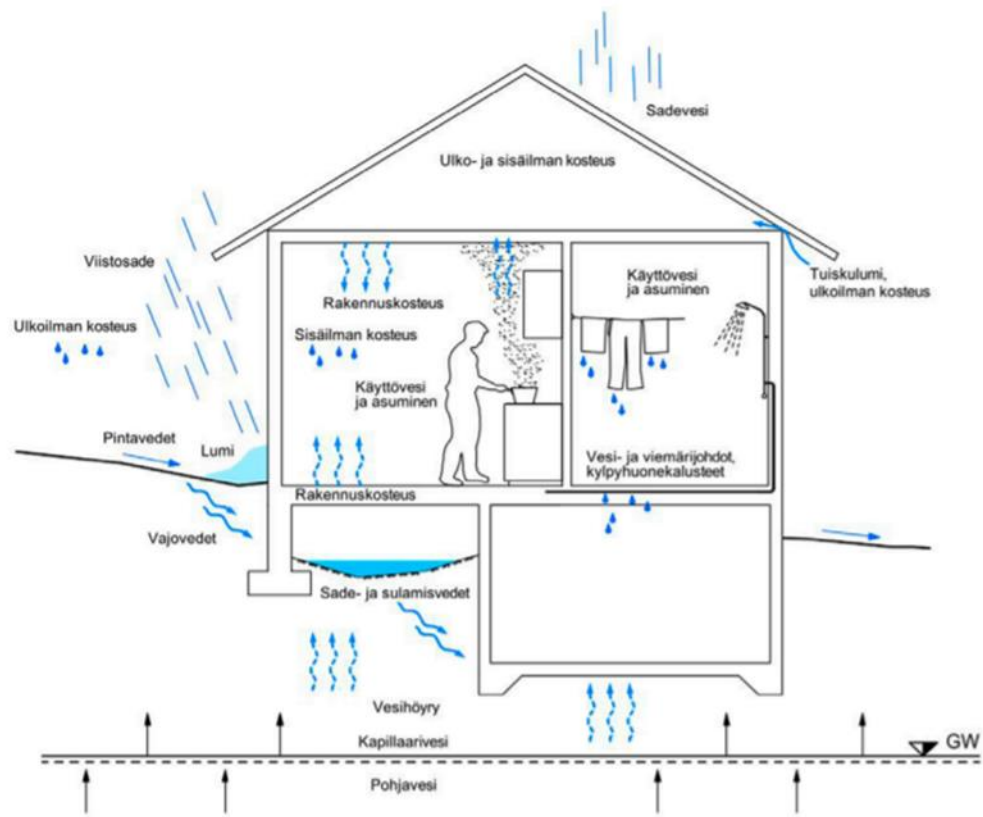
Kosteus liikkuu aineessa ulkoisten voimien vaikutuksesta usein siten, että aine pyrkii saavuttamaan tasapainotilan ympäristönsä kanssa. Absorptiossa kosteus kulkeutuu aineeseen, sorptiossa kosteus kulkee aineen sisällä ja desorptiossa kosteus poistuu aineesta. [9.] Kuvassa 3 aineen vuorovaikutusta, sen kosteuspitoisuuden vaihdellessa.



Kuva 4 Absorptio aineessa kulkee kuvassa vasemmalta oikealle päin. Aine sitoo eli absorboi kosteutta itseensä. Desorptio tarkoittaa aineen vastakkaista toimintaa eli aineen kosteus poistuu. [17.]

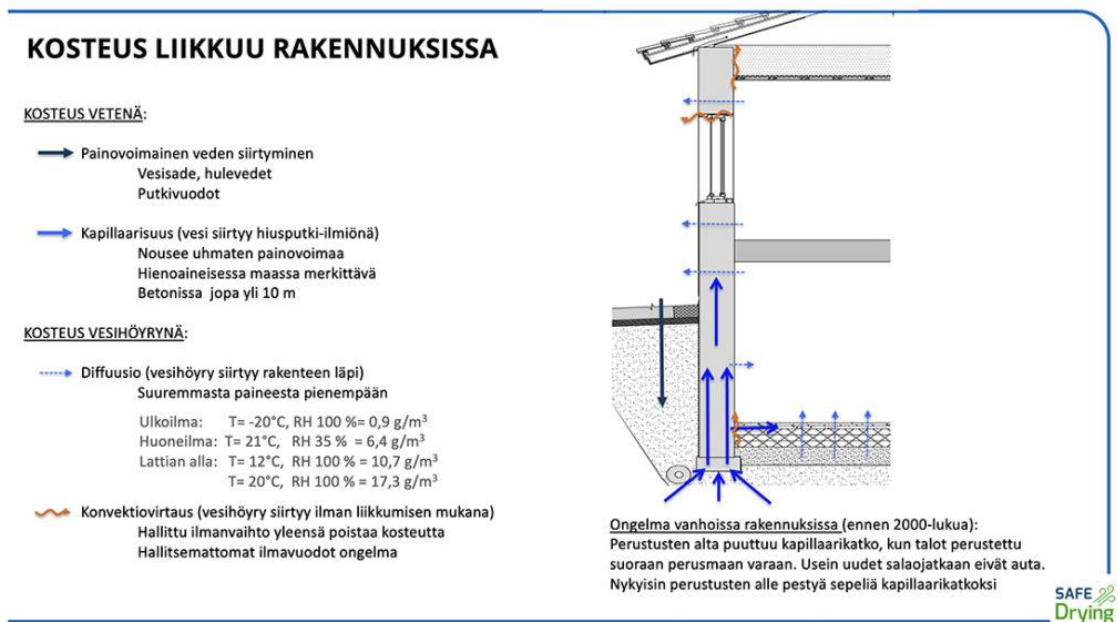
4.1 Kosteuden siirtymistavat

Kosteus voi siirtyä usealla eri siirtymistavalla. Kosteus voi siirtyä rakenteisiin vesihöyrynä, vetenä tai kiinteänä jäänä. Kuvassa 4 esitelty rakennuksen mahdollisia kosteudenlähteitä.



Kuva 5 Rakennuksen yleisimmät kosteudenlähteet [18].

Vesi voi siirtyä rakenteisiin painovoimaisesti eli esimerkiksi sadeveden kuljettamana tai kapillaarisesti eli nousemalla rakenteita pitkin kapillaarivoimien edesauttamana. Vesihöyry taas voi kulkea rakenteissa usein diffuusion tai konvektion kuljettamana. Kuvassa 5 esitelty kosteuden eri muodon kulkeutumistavat rakennukseen.



Kuva 6 Kosteuden liikkumistavat rakenteissa [19].

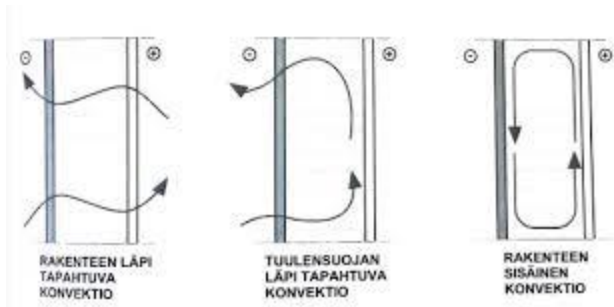
4.2 Painovoimainen ja kapillaarinen siirtyminen

Painovoimaista ja kapillaarista siirtymistä rakenteisiin tapahtuu usein kosteuden kiinteässä tai nestemäisessä muodossa. Vesi siirtyy jäänä tai sadevetenä painovoiman johdosta maahan ja maasta rakenteisiin. Rakenteissa vesi siirtyy kapillaarisesti ylöspäin huokoisempaan aineeseen. Kapillaarinen siirtyminen perustuu pintajännitysvoimien aikaansaamaan huokosalipaineen vaikutukseen. [20.]

4.3 Vesihöyryn konvektio

Konvektiolla tarkoitetaan ilman liikettä korkeammasta ilmanpaineesta matalampaan. Ilmanvirtauksia syntyy rakenteissa, kun huonetiloissa ilmanpainesuhteet vaihtelevat ja ilmanpaine-erot synnyttävät ilmavirtauksia. Paine-erot syntyvät tuulen, ilman lämpötilaerojen tai ilmanvaihdon vaikutuksesta. Kosteuskonvektiolla tarkoitetaan tilannetta, jossa kosteus siirtyy ilmavirran mukana. [18, s. 115, 19]

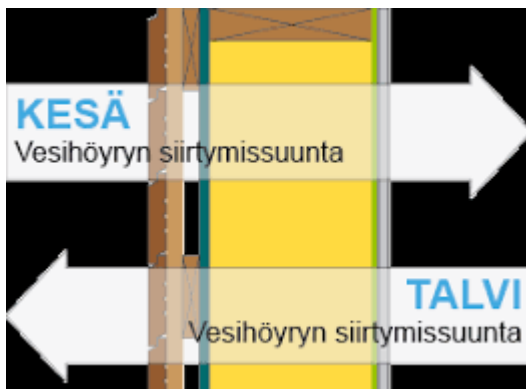
Kylmänä vuodenaikana rakenteiden toiminnan kannalta suurin merkitys on rakojen, halkeamien ja reikien läpi sisältä ulos ilmanpaine-erojen vaikutuksesta tapahtuvilla ilmavirtauksilla. Virtaukset voivat kuljettaa mukanaan rakenteisiin moninkertaisia kosteusmääriä diffuusion verrattuna. [7, s. 72.]



Kuva 7 Aineen konvektiota [21].

4.4 Diffuusio

Diffuusiolla tarkoitetaan molekyylien taipumusta siirtyä väkevämmästä laimeampaan konsentraatioon. Rakennustekniikassa diffuusiolla tarkoitetaan yleensä kosteuden liikkumista rakenteen läpi paine-eron myötä siihen suuntaan, joka taasoittaa kaasuseoksen vesihöyrypitoisuutta. Diffuusio pyrkii siis suuremmasta osapaineesta pienempään. Yleisimmin kuitenkin diffuusion suunta on lämpimästä tilasta kylmempään. [20; 22.]



Kuva 8 Vesihöyryn siirtymissuunta riippuen vuodenajasta. Vesihöyryn liikkumissuunta perustuu kosteuseroon, ja vesihöyry pyrkii siirtymään sinne suuntaan, jossa osapaine on pienempi. [23.]

5 Materiaalin kyky läpäistä vesihöyryä

Materiaalien kykyyn läpäistä vesihöyryä vaikuttaa paljon aineen kyky absorboida ja desorptoida vettä. Tämä vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti aine löytää tasapainotilan vallitsevan ympäristönsä kanssa olosuhteiden vaihdellessa.

Myös aineen rakenne, mm. sen huokoisuus, tiiveys ja materiaalin paksuus, vaikuttaa olennaisesti, kuinka helposti vesihöyry läpäisee materiaalin.

Vesihöyrynvastus Z_p tai Z_v kertoo materiaalin kyvystä vastustaa vesihöyryn kulkeutumista sen lävitse [24]. Vesihöyrynvastusarvo Z_p ilmaistaan yksikössä $m^2 \times s \times Pa / kg$. Z_p -arvo on osapaine-eron perusteella laskettu suure, kun taas vesihöyrynvastuskerroin Z_v :n laskenta perustuu pitoisuuseroihin. Alla olevissa taulukoissa (taulukko 2 ja taulukko 3) erilaisten materiaalien vesihöyrynvastus Z_p arvoja.

Taulukko 2. Erityyppisten rakennusmateriaalien vesihöyrynvastusarvoja Z_p . [25].

| Aine | Paksuus | Vesihöyrynvastus Z_p, ($m^2 \cdot s \cdot Pa/kg$) |
|------------------------------------|-----------------|--|
| Muovikalvo, polyeteeni | 0,09 mm | n. 200 |
| Muovikalvo, polyeteeni | 0,15 mm | n. 345 |
| Muovikalvo, polyeteeni | 0,20 mm | n. 450 |
| Muovikalvo, polyeteeni | 0,30 mm | n. 700 |
| Kattohuopa | | 500–10 000 |
| Bitumikerros | | 500–1000 |
| PVC-matto | 2 mm | n. 70–270 |
| Akryylilatem | 100–200 μm | 2,4–4,0 |
| PVA-latex | 100–200 μm | 1,0–1,4 |
| Alkydi | 90–120 μm | 9,5–16,0 |
| Kloorikautsu | 40–50 μm | 4,7–8,0 |
| Polyuretaani | 30–40 μm | 11,5–16,0 |
| PVC | 30–40 μm | 6,0–9,0 |
| Silikaatti | 80–100 μm | 0,7–0,8 |
| Kalkkimaali | | 0,5 |
| Sementtimaali | | 0,5 |
| Kolmikerrosrappaus | 20 mm | 0,9–2,7 |
| K-rappaus | 10 mm | 0,6–1,4 |
| Paperi | 1 mm | 0,1 |
| Bitumipahvi, tuulensuoja | | 25 |
| Erittäin tiiviit rakennuspaperit | | Vähintään 1000 |
| Tiiviit rakennuspaperit | | Vähintään 250 |
| Vesihöyryä pitävät rakennuspaperit | | Vähintään 50 |

| Aine | Paksuus | Vesihöyrynvastus Z_p, ($m^2 \cdot s \cdot Pa/kg$) |
|-------------------------------------|----------------|--|
| Heikosti läpäisevät rakennuspaperit | | 1,5–1,0 |
| Läpäisevät rakennuspaperit | | Enintään 1,5 |

Taulukko 3 Rakennusmateriaalien ja sisäseinämaalien vesihöyrynvastusarvoja [26].

| Tuote | Vesihöyrynvastus Z_p $10^9 m^2 s Pa/kg$ |
|------------------------------------|--|
| Polyeteeni höyrynsulkumuovi 0,2 mm | 100–500 |
| Kipsilevy 13 mm | 0,45 |
| Lastulevy 12 mm | 2,5 |
| Poltettu tiili, muurattu 130 mm | 11 |
| Betoni 200 mm | 140–210 |
| Remontti-Ässä | < 1,0 |
| Joker | < 1,0 |
| Harmony-sisustusmaali | < 1,0 |
| Kivitex Silikaattimaali | < 0,5 |

6 Vesihöyrynläpäisynopeuden mittausperiaate

6.1 Vesihöyrynläpäisykyvyn mittausstandardit

Monelle rakennusmateriaaleille on määritelty standardit, joiden avulla voidaan mitata vesihöyrynläpäisyä. Alla olevassa luetelmassa on esitelty eri materiaaleille kohdennettuja standardeja, joilla voidaan mitata vesihöyrynläpäisykykyä:

- SFS-EN ISO 7783:2018 Paints and varnishes: Determination of water-vapour transmission properties: Cup method.
- SFS-EN ISO 12572:2016:en – Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water vapour transmission properties. Cup method.
- SFS-EN 12086:en – Thermal insulating products for building applications. Determination of water vapour transmission properties
- SFS-EN 1015-19:en Methods of test for mortar for masonry. Part 19: Determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars.
- SFS-EN 1931:en Flexible sheets for waterproofing. Bitumen, plastic and rubber sheets for roof waterproofing. Determination of water vapour transmission properties
- ASTM E96 Standard Test Methods For Water Vapor Transmission Of Materials

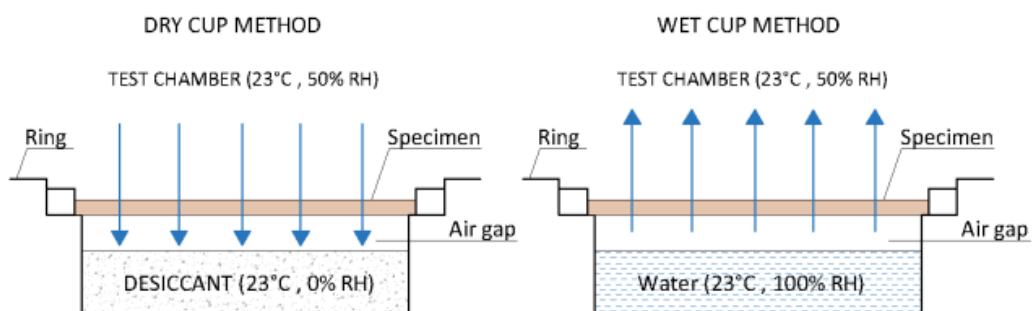
Tämän insinööriyön käytännön suorituksen osassa hyödynnettiin standardia SFS-EN ISO 7783:2018 Paints and varnishes: Determination of water-vapour transmission properties: Cup method, laskennoissa standardia SFS-EN ISO 12572:2016: Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water vapour transmission properties. Cup method (ISO 12572:2016) ja luokittelun apuna hyödynnettiin standardia SFS-EN 1062-1: Maalit ja lakat. Pinnoiteaineet ja yhdistelmät säärasitukseen joutuville kiviaines- ja betonipinnoille. Osa 1: Luokittelu.

6.2 Kuppimenetelmät

Testausten pohjana käytettiin yrityksen menetelmäohjetta ja standardia SFS-EN 7783:2018 Paints and varnishes: Determination of water-vapour transmission properties: Cup method. Standardi on suunniteltu määrittämään pinnoitteille ja maalituotteille vesihöyrynläpäisy nopeus V , suhteellinen diffuusiovastus S_d ja diffuusiovastuskerroin μ . [27.]

6.2.1 Kuppimenetelmän peruseriaate

Mittaus voidaan toteuttaa joko kuiva- tai märkäkuppikokeen avulla. Kuppikokeessa kupin sisälle laitetaan joko kylläistä vesiliuosta tai kuivausainetta. Kun näytekappale kiinnitetään kuppiin ja kokoonpano on valmis, syntyy tilanne, jossa paine-eron aikaansaaman diffuusion avulla vesihöyry lähtee kulkeutumaan riippuen kuppimenetelmästä, joko ulospäin kupista tai kuppiin sisälle päin. Kuppi punnitaan tasaisin väliajoin ja massahäviön avulla voidaan määrittää kappaleelle vesihöyrynläpäisy nopeus. Kuvasta 9 nähdään, kuivakuppimenetelmässä kosteusvirran suunta on kuppiin sisälle päin ja märkäkuppimenetelmässä taas kupista ulospäin. [27, 28.]



Kuva 9 Kuivakuppimenetelmä ja märkäkuppimenetelmä. Kuivakuppimenetelmässä kosteusvirran suunta on kuppiin sisälle, kun taas märkäkuppimenetelmässä kosteusvirran suunta on kupista ulospäin. [29.]

6.2.2 Olosuhteet

Standardi SFS-EN ISO 12572 esittää taulukon, joista voidaan käyttää haluttua olosudehydistelmää eri tarkoituksiin (Taulukko 4). Asetelma A (kuivakuppimenetelmä) soveltuu, kun tarvitaan tietoa materiaalien suorituskyvystä alhaisen kosteuden olosuhteissa, joissa kosteus siirtyy pääosin höyrydiffuusiolla. Asetelma C (märkäkuppimenetelmä) antaa tietoa materiaalien suorituskyvystä korkeassa kosteudessa. [28.] Tässä työssä hyödynnettiin märkäkuppimenetelmää, eli koemenetelmä vastaa asetelmaa C. Taulukossa 4 esitetty standardin SFS-EN ISO 12572 olosuhdetaulukko kuppikokeille.

Taulukko 4 Olosuhdetaulukko kuppikokeille [28].

| Asetelma | Olosuhteet °C/RH | Toleranssit | | | | |
|----------|------------------|--------------|------------------------|------------|------------|------------|
| | | Lämpötila °C | Suhteellinen kosteus % | | | |
| | | | Kuiva tila | | Märkä tila | |
| | | | Asetusarvo | Toleranssi | Asetusarvo | Toleranssi |
| A | 23–0/50 | 23±1 | 0 | ±5 | 50 | ±5 |
| B | 23–0/85 | 23±1 | 0 | ±5 | 86 | ±5 |
| C | 23–50/93 | 23±1 | 50 | ±5 | 93 | ±5 |
| D | 38–0/93 | 23±1 | 0 | ±5 | 93 | ±3 |
| E | 25–50/100 | 23±1 | 50 | ±5 | 100 | |

6.2.3 Testaukseen vaikuttavat tekijät

Vesihöyrynläpäisykyvyn määrittäminen on moniosainen, ja tuloksiin voi vaikuttaa moni asia. Näytteiden valmistelussa vaikuttavia asioita voi olla mm. levitysmenetelmän käyttö, näytekappaleen tasaisuus ja kalvonpaksuuden

mittausmenetelmä. Näiden lisäksi kuivumisaika ja -olosuhteet vaikuttavat kalvonmuodostuksen nopeuteen. Kokoamisvaiheessa kupin oikea asennus voi vaikuttaa kokoonpanon tiiviyteen menetelmän mittauksen ajan. Mittaustuloksiin voi myös vaikuttaa lämpötilan ja kosteuden vaihtelu, sillä ne vaikuttavat syntyvään osapaine-eroon ja näin vesihöyryn kulkemisnopeuteen.

Testaus on mahdollista suorittaa monella erilaisella variaatiolla, koska muuttuvia tekijöitä on paljon. Tällaisia muuttujia on mm. kuppiin luotavat olosuhteet, kalvonpaksuus, alusta, applikointitapa, kalvonpaksuuden mittausmenetelmä.

Eri olosuhteilla (Taulukko 4), voidaan saada eroavia tuloksia, riippuen onko käytetty ainetta, joka kyllästää vai kuivattaa kupin sisätilan. Näytteen kalvonpaksuutta muuttamalla (esimerkiksi 150 μm verrattuna 300 μm :iin) saadaan erilaisia tuloksia koska mm. diffuusioarvo S_d on kalvonpaksuudelle ominainen arvo.

Lisäksi alustan vaihto toiseen materiaaliin esimerkiksi puuhun voisi vaikuttaa tuloksiin, sillä erilaiset alustat omaavat kullekin ominaisen kyvyn päästää vesihöyryä lävitseen. Myös näytteen applikointitavalla voi olla suuri merkitys saatuihin tuloksiin, sillä saadut kalvonpaksuudet ja kalvonpaksuuden mittaustavat voivat vaihdella.

7 Työn suoritus

Käytännön työ suoritettiin standardeihin ja teoriaan tutustumisen ja työn suunnittelun jälkeen. Käytetyt näytteet olivat tuotteiden tehdaseriä. Tuotteiksi valittiin eri läpäisykyvyn omaavia tuotteita sen vuoksi, että voidaan tarkastella menetelmän toimivuutta sekä korkean vesihöyrynläpäisy nopeuden että matalan vesihöyrynläpäisy nopeuden omaavilla tuotteilla.

Testausten lähtökohta suunniteltiin hyödyntäen edellisten menetelmään liittyvien töiden avulla ja testaus toteutettiin standardin mukaisesti, jotta testauksessa saataisiin mahdollisimman vertailukelpoisia tuloksia eri kuppien välillä.

Testausten alussa päätettiin, että jokaiselle näytteelle tehdään viisi rinnakkaista määrittystä.

Vesihöyrynläpäisy nopeuteen vaikuttavia tekijöitä pyrittiin pitämään mahdollisimman tasaisina testausten kesken. Tällaisia tekijöitä ovat mm. alusta, näytteen kalvonpaksuus, eri olosuhdevaihtoehdot ja kuppiin asetettava liuos. Kuppien soveltuvuuden tarkastelussa on mietitty parasta vaihtoehtoa tulosten tarkkuuden, kuppien ominaisuuksien ja käyttäjäkokemuksen perusteella.

Näytteiden valmistelussa pyrittiin minimoimaan mittausepävarmuutta luovia tekijöitä seuraavasti:

- Kaikki näytteet tehtiin saman tekijän toteuttamana samoilla välineillä.
- Käytetty alustapaperi, jolle applikoitiin, on samaa erää. Myös tuotteet, joista mittaus tehtiin, ovat samaa erää keskenään.
- Näytteitä tehtiin 20 kappaletta/tuote, jotta voitiin varmistaa, että testiin saadaan mahdollisimman tasalaatuiset kalvot.
- Näytekappaleet on valittu satunnaisessa järjestyksessä kuppeihin, jotta minimoidaan tekijän alitajuinen vaikutus mittausjärjestelyihin.
- Näytekappaleet kuivuivat kuivumisajan (28 d) vakio-olosuhteissa (23 °C/RH 50) ennen mittauksen suoritusta.

7.1 Standardit

Testausten pohjana käytettiin yrityksen menetelmäohjetta ja standardia SFS-EN 7783:2018. Standardi määrittelee kuppimenetelmän suorituksen, ja standardin avulla voidaan määrittää pinnoitteille ja maalituotteille vesihöyrynläpäisy nopeus V , suhteellinen diffuusiovastus S_d ja diffuusiovastuskerroin μ . [27.]

Standardin SFS-EN 7783:2018 menettelytapa, määritelmät ja laskennat perustuvat standardiin SFS-EN ISO 12572:2016. Tätä standardia hyödynnettiin, jotta voitiin saada parempi ymmärrys kuppimenetelmän menettelytavoista ja laskennan perustasta. Vesihöyrynläpäisevyysarvo, vesihöyrynläpäisykerroin, vesihöyrynvastusarvo on laskettu standardin SFS-EN ISO 12572:2016 mukaisesti.

Erilaisilla materiaaleilla on erilaiset mittausmenetelmät ja materiaalikohtaisia luokitusstandardeja. Tässä työssä käytetyille tuotteille ei löytynyt standardiin perustuvaa luokitusstandardia, joten tulosten arviointiin hyödynnetään standardin SFS-EN 1062-1 luokitusarvoja (Taulukko 5).

Taulukko 5 Standardin SFS-EN 1062-1 vaatimukset luokitusarvoille [30].

| Kategoria | | Vaatimus | |
|----------------|----------------|-------------------------|--------------------|
| | | V g/(m ² ·d) | S _d (m) |
| V ₀ | | Ei vaatimusta | |
| V ₁ | Korkea | > 150 | < 0,14 |
| V ₂ | Keskimääräinen | ≤ 150 | ≥ 0,14 |
| | | > 15 | < 1,4 |
| V ₃ | Alhainen | ≤ 15 | ≥ 1,4 |

7.2 Tarvittava välineistö ja materiaalit

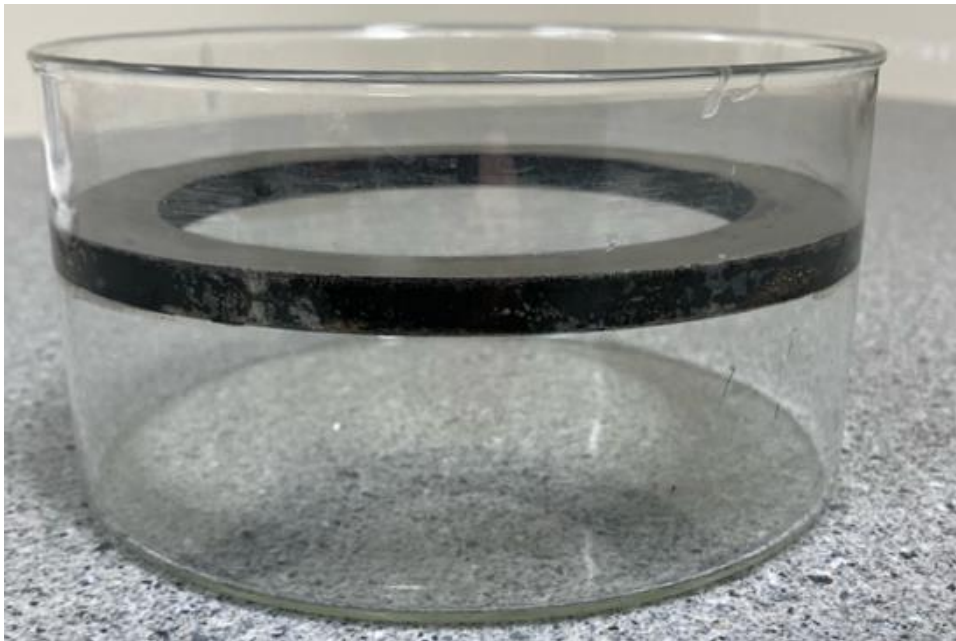
Insinööriyössä vertailtiin kolmen erityyppisen kupin antamia arvoja. Taulukossa 6 on esitelty kuppien suurimmat eroavaisuudet liuosmäärän, näytekappaleen ja tiivistysmekanismin suhteen.

Taulukko 6 Kuppien eroavaisuudet. Taulukossa esitelty suurimmat toiminnalliset erot. Halkaisija vaikuttaa olennaisesti tulosten laskentaan.

| Materiaali | Lasi | Muovi | Metalli |
|--|-------------|----------------|----------------|
| Tarvittavan liuoksen määrä arviolta (ml) | 350 | 650 | 35 |
| Näytekappaleen halkaisija (cm) | 11,4 | 9,0 | 5,6 |
| Tiivistys | Parafiini | Kumitiivisteet | Kumitiivisteet |

Alla olevassa kuvassa (Kuva 10) testauksissa käytetty lasimateriaalista rakennettu kuppi. Lasista valmistetut kupit eli lasikupit ovat tässä työssä halkaisijaltaan suurimmat kupit.

Kupin kokoaminen on työläin tämän tyyppisessä menetelmässä, jossa tiivistys toteutetaan valamalla. Näytekappaleen reunat tiivistetään parafiinin avulla ja sen jäähtyttyä kokoonpano on valmis.



Kuva 10 Kuvassa lasimateriaalista valmistettu kuppi. Kuvassa oleva kuppi on ilman näytettä, tiivistysainetta ja nestettä.

Alla olevassa kuvassa (Kuva 11) muovimateriaalista tehty kuppi. Muovimateriaalista valmistetut kupit eli muovikupit ovat halkaisijaltaan pienemmät kuin lasikupit mutta nestetilavuudeltaan testikuppien suurimmat. Kuppi kootaan näytteen ja kumitiivisteiden paikalleen asettamisen jälkeen kiertämällä kansi kiinni.



Kuva 11 Kuvassa muovimateriaalista valmistettu kuppi. Kuvassa oleva kuppi on ilman näytettä, tiivisteitä ja nestettä.

Alla olevassa kuvassa (Kuva 12) metallimateriaalista valmistettu kuppi. Metallisesta materiaalista valmistetut kupit eli metallikupit ovat testin pienimmät. Nestettä kuppeihin menee vain n. 35 ml, jotta nestepinta on standardin asettamalla etäisyydellä näytteestä. Metallinen kuppi kootaan samalla tavalla kuin muovimateriaalista tehdyt, eli kiertämällä. Myös metallisilla kupeilla tiiviyttä on varmistamassa kumiset tiivisteet.



Kuva 12 Kuvassa metallimateriaalista valmistettu kuppi. Kuvassa oleva kuppi on ilman näytettä, tiivisteitä ja nestettä.

Työssä käytetty alusta on tehty paperista. Lämpäisevä näyte on vesiohenteinen tuote, jonka käyttökohde on sisäkatot. Puolilämpäisevät näytteet ovat vesiohenteisiä tuotteita, jotka on tarkoitettu sisäseinä- ja kattopinnoille. Tiivis tuote on kosteisiin tiloihin soveltuva pohjamaali.

7.3 Näytekkappaleiden valmistus

Ennen maalikalvon valmistamista eli applikointia käytettävän alusta kalvonpaksuus mitattiin kalvonpaksuusmittarilla. Myöhemmin mitataan kokoonpanon kalvonpaksuus, jotta voidaan laskea pelkän maalikalvon kalvonpaksuus.

Alustan kalvonpaksuuden määrittämisen jälkeen näytekkappaleet valmistettiin applikoimalla 150 µm:n applikaattorilla märkäkalvot applikoitavia tuotteita alustapaperille. Applikoituja kalvoja kuivattiin vakio-olosuhteissa (23 ± 2 °C, RH 50 ± 5 %) kuivausajan verran. Näytteiden kuivausajaksi päätettiin 28 vuorokautta, jonka jälkeen näytteiden kalvonpaksuus mitattiin ja applikoidun näytteen kalvonpaksuus laskettiin. Viimeiseksi näytekkappaleet merkittiin ja leikattiin kuhunkin kokoonpanoon sopiviksi.

Määrittäminen suoritettiin vakio-olosuhdehuoneessa (23 ± 2 °C, RH 50 ± 5 %). Määrittämyksen aikana kuppien alkupaino punnittiin ja kokoonpano punnitaan analyysin aikana tietyn ajan välein. Tuloksena saatiin massoja, joiden avulla laskettiin vesihöyrynläpäisy nopeus ja muut arvot tuotteille. Jokaiselle tuotteelle ja kupille tehtiin 5 rinnakkaista määrittäystä.



Kuva 13 Näytekkappaleet, jotka sisältävät alustan ja pinnoitteen. Vasemmalta oikealle ensimmäisenä on lasikupille soveltuvan kokoinen näyte, seuraavana muovikupille soveltuvan kokoinen näyte ja oikeamman puoleinen on metallikupille soveltuva näyte.

8 Laskenta

Laskenta perustui standardeihin SFS-EN ISO 7783:2018 ja SFS-EN ISO 12572. Kaavat 1–8 ovat suoraan standardista SFS-EN ISO 7783:2018, kaavat 9–11 standardista EN-ISO 12572.

8.1 Vesihöyrynläpäisynopeus

Alustan vesihöyrynläpäisynopeus alustan läpi V_s voidaan määrittää alla olevan kaavan (Kaava 3) avulla:

$$V_s = 24 \times \frac{p}{p_0} \times \frac{G_s}{A_s} \quad (3)$$

jossa G_s tarkoittaa kosteuden läpivirtausta

A_s on määityksessä kosteuden läpivirtaukselle altistunut pinta-ala

$\frac{p}{p_0}$ on paineen korjauskerroin.

Systemin, eli alustan ja pinnoitteen vesihöyrynläpäisynopeus V_{cs} voidaan määrittää vastaavasti, kuin alustan vesihöyrynläpäisynopeus (Kaava 4):

$$V_{cs} = 24 \times \frac{p}{p_0} \times \frac{G_{cs}}{A_{cs}} \quad (4)$$

Pinnoitteen vesihöyrynläpäisy nopeus V_C voidaan määrittää alla yllä esiteltyjen kaavojen avulla seuraavasti (Kaava 5):

$$V = \frac{V_{CS} \times V_S}{V_S - V_{CS}} \quad (5)$$

8.2 Suhteellinen diffuusiovastuskerroin

Suhteellinen diffuusiovastuskerroin voidaan laskea seuraavasti kaavojen 6 ja 7 avulla:

$$S_d = \frac{\delta_a \times \Delta p_v}{V} \quad (6)$$

josta

$$s_d = \frac{20,4}{V} \quad (7)$$

δ_a ilman vesihöyrynläpäisevyys normaaliolosuhteissa

Δp_v vastaa osapaineiden eroa.

Standardissa SFS-EN ISO 12572:2016 taulukossa on esitelty osapaine-erojen arvot, jotka muodostuvat kyseisillä olosuhteilla.

Taulukko 7 Osapaine-erot Δp kuppeihin luoduilla olosuhteilla [29].

| Asetelma | Olosuhde °C - % RH | Osapaine-ero Δp Pa |
|----------|--------------------|----------------------------|
| A | 23–0/50 | 1404 |
| B | 23–0/85 | 2387 |
| C | 23–50/93 | 1207 |
| D | 38–0/93 | 6157 |
| E | 25–50/100 | 1404 |

8.3 Diffuusiovastuskerroin

Diffuusiovastuskerroin μ saadaan määritettyä suhteellisen diffuusiovastuskertoimen S_d ja kuivakalvonpaksuuden avulla (Kaava 8).

$$\mu = \frac{S_d}{d} \times 10^6 \quad (8)$$

d vastaa kuivakalvonpaksuutta mikrometreissä.

8.4 Vesihöyrynvastus, vesihöyrynläpäisevyysarvo ja vesihöyrynläpäisykerroin

Vesihöyrynläpäisykerroin W voidaan laskea seuraavasti kaavan 9 avulla:

$$W_p = \frac{G}{A \times \Delta p} \quad (9)$$

Jossa G vastaa kosteuden läpivirtausta

A on määrittäksessä kosteuden läpivirtaukselle altistunut pinta-ala

Δp vastaa osapainetta.

Vesihöyrynvastus Z_p on käänteisluku vesihöyrynläpäisykertoimelle. Vesihöyrynvastus voidaan laskea seuraavasti kaavalla 10:

$$Z_p = \frac{1}{W} \quad (10)$$

Vesihöyrynläpäisevyys δ saadaan laskettua hyödyntämällä vesihöyrynläpäisykerrointa seuraavasti (Kaava 11):

$$\delta_p = W \times d \quad (11)$$

jossa d tarkoittaa paksuutta.

9 Tulokset

Tutkitut näytteet saatiin testattua onnistuneesti ja tulokset laskettua. Tulokset esitellään tuotekohtaisesti, niin että kuppien eri läpäisyarvoja voidaan vertailla keskenään. Huomioitavaa on, että S_d -arvoon vaikuttaa mitatun näytteen kalvonpaksuus.

9.1 Paperin läpäisevyysarvot

Taulukossa 8 punnitustulosten perusteella lasketut alustojen vesihöyrynläpäisy nopeus V_s arvot eri kupeille.

Taulukko 8 Testisarjojen alustojen lasketut vesihöyrynläpäisy nopeusarvot V_s

| Testisarja | Lasi | Muovi | Metalli |
|------------|------|-------|---------|
| 1-1 | 394 | 447 | 480 |
| 2-1 | 400 | 470 | 573 |

9.2 Läpäisevän tuotteen tulokset

Taulukossa 9 on esitelty läpäisevän tuotteen arvot, jotka saatiin laskettua mitatuista tuloksista.

Taulukko 9 Lämpäisevän tuotteen lasketut arvot.

| | Yksikkö | Lasi | Muovi | Metalli |
|-----------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Kalvonpaksuus | µm | 52 | 57 | 57 |
| Vesihöyrynläpäsnopeus V_c | g/ (m ² · d) | 227 | 282,9 | 304,5 |
| S_d | m | 0,09 | 0,07 | 0,07 |
| | | | | |
| Vesihöyrynvastus Z_p | m ² ·s·Pa/kg | 0,72·10 ⁹ | 0,60·10 ⁹ | 0,55·10 ⁹ |
| µ-arvo | - | 1750 | 1286 | 1192 |

9.3 Puolilämpäisevä (1) tuotteen tulokset

Taulukossa 10 on esitelty puolilämpäisevän (1) tuotteen arvot, jotka saatiin laskettua mitatuista tuloksista.

Taulukko 10 Puoliläpäisevän tuotteen lasketut arvot.

| | Yksikkö | Lasi | Muovi | Metalli |
|---------------------------------------|---|-------------------|-------------------|-------------------|
| Kalvonpak- suus (μm) | μm | 52 | 51 | 50 |
| Vesihöyrynlä- päisynopeus V_c | $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ | 77,8 | 85,7 | 99,6 |
| S_d | m | 0,26 | 0,26 | 0,20 |
| | | | | |
| Vesihöyryn- vastus Z_p | $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ | $1,57 \cdot 10^9$ | $1,42 \cdot 10^9$ | $1,26 \cdot 10^9$ |
| μ -arvo | - | 5052 | 5100 | 4122 |

9.4 Puoliläpäisevän (2) tuotteen tulokset

Taulukossa 11 on esitelty puoliläpäisevän (2) tuotteen arvot, jotka saatiin lasket-
tua mitatuista tuloksista.

Taulukko 11 Puoliläpäisevän tuotteen lasketut arvot.

| | Yksikkö | Lasi | Muovi | Metalli |
|---------------------------------------|---|-------------------|-------------------|-------------------|
| Kalvonpak- suus (μm) | μm | 63 | 62 | 62 |
| Vesihöyrynlä- päisynopeus V_c | $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ | 70,8 | 79,2 | 113 |
| S_d | m | 0,29 | 0,26 | 0,19 |
| | | | | |
| Vesihöyryn- vastus Z_p | $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ | $1,64 \cdot 10^9$ | $1,45 \cdot 10^9$ | $1,08 \cdot 10^9$ |
| μ -arvo | - | 4609 | 4247 | 3126 |

9.5 Tiiviin tuotteen tulokset

Taulukossa 12 on esitelty tiiviin tuotteen arvot, jotka saatiin laskettua mitatuista tuloksista.

Taulukko 12 Tiivin tuotteen lasketut arvot.

| | Yksikkö | Lasi | Muovi | Metalli |
|---------------------------------------|---|-------------------|-------------------|-------------------|
| Kalvonpak- suus (μm) | μm | 50 | 52 | 52 |
| Vesihöyrynlä- päisynopeus V_c | $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ | 8,2 | 5,9 | 6,2 |
| S_d | m | 2,91 | 3,51 | 3,30 |
| | | | | |
| Vesihöyryn- vastus Z_p | $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ | $15,0 \cdot 10^9$ | $17,7 \cdot 10^9$ | $16,9 \cdot 10^9$ |
| μ -arvo | - | 57472 | 67821 | 65099 |

Testisarjojen suurimmat keskinäiset erot löytyvät tiivin tuotteen tulosten välillä. Taulukossa 13 esitelty tarkemmin mitattujen rinnakkaisten näytteiden suhteelliset diffuusiovastuskertoimet S_d , näiden keskiarvot ja keskihajonnat.

Lasikupeilla mitatut arvot vaihtelivat viiden rinnakkaisen kesken niin paljon, että ei voida varmasti sanoa, mitkä arvot poikkeavat. Muovikuppien arvot ovat tasaisia keskenään. Metallikupeilla selvästi poikkeavat arvot ovat näytteet 2 ja 3. Näiden arvojen aiheuttama poikkeama otettiin huomioon ja tulokset jätettiin pois laskennoista.

Taulukko 13 Tiiviillä näytteillä mitatut rinnakkaiset tulokset, keskiarvot ja keskihajonnat.

| Tiivis näyte | Lasi | Muovi | Metalli |
|--------------------|------|-------|---------|
| Kalvonpaksuus (µm) | 50 | 52 | 52 |
| 1 | 3,94 | 3,95 | 3,49 |
| 2 | 1,60 | 3,34 | 0,34 |
| 3 | 4,61 | 3,73 | 0,88 |
| 4 | 2,44 | 3,42 | 3,39 |
| 5 | 1,97 | 3,07 | 3,03 |
| Keskiarvo | 2,91 | 3,51 | 2,23 |
| Keskihajonta | 1,17 | 0,31 | 1,34 |

10 Johtopäätökset ja yhteenveto

Taulukosta 9 nähdään, että läpäisevän tuotteen S_d -arvot ovat hyvin liki toisiaan kaikilla kupeilla. Vesihöyrynläpäisy nopeuden V_c ja suhteellisen diffuusiovastuksen arvon S_d perusteella läpäisevä tuote kuuluisi standardin SFS-EN 1062-1 mukaan luokkaan V_1 korkea.

Taulukosta 10 nähdään, että vesihöyrynläpäisy nopeuden V_c ja suhteellisen diffuusiovastuksen arvon S_d perusteella puoliläpäisevä tuote kuuluisi standardin SFS-EN 1062-1 mukaan luokkaan V_2 keskimääräinen. Tuotteiden S_d -arvoissa on hieman eroa toisiinsa nähden, mutta eroavaisuus ei ole suuri.

Taulukosta 11 nähdään, että vesihöyrynläpäisy nopeuden V_c ja suhteellisen diffuusiovastuksen arvon S_d perusteella puoliläpäisevä tuote kuuluisi standardin

SFS-EN 1062 mukaan luokkaan V_2 keskimääräinen. Tuotteiden S_d -arvoissa on hieman eroa toisiinsa nähden, mutta eroavaisuus ei ole suuri.

Läpäisevän ja puoliläpäisevien tulosten perusteella kaikki näistä kupeista voisivat soveltua luokitusta hyödyntäen sisämaalituotteiden käyttöön, sillä keskinäiset erot eivät ole kovin suuret.

Taulukosta 12 nähdään, että vesihöyrynläpäisynepeuden V_c ja suhteellisen diffuusiovastuksen arvon S_d perusteella tiivis tuote kuuluisi standardin SFS-EN 1062-1 mukaan luokkaan V_3 matala. Tässä työssä muovinen kokoonpano antaa toistettavimpia tuloksia tiiviillä näytekappaleilla. Metall- ja lasimateriaalista tehdyissä kupeissa ilmeni enemmän poikkeamia.

Epäilynä tiiviiden tuotteiden taulukon 13 testisarjassa oli, että osassa kupeista on ilmavuoto, joka voi aiheutua esimerkiksi huonosti asennetusta kupista tai poikkeamasta näytteessä. Ilmavuoto aiheuttaa suuremman virtauksen ja huomattavasti suuremman kosteusvirran mitattavaan näytteeseen.

Tulokset siis indikoivat, että käytetyn kupin tiiveydellä ja tiiveyden varmistamisella on suuri merkitys, jos mitattava tuote on kovin tiivis. Vuoto kupista voi aiheuttaa suuren muutoksen tiiviin kalvon mittaustuloksille, mikä voi selittyä sillä, että vuoto korostuu, kun tuote ei normaalitilassa päästä suurta määrää vesihöyryä lävitseen.

Verrattaessa tuloksia vaatimuksiin taulukossa 5 kukin tuote osuu alkuperäisen oletuksen mukaiseen kategoriaan. Näytteiden vesihöyrynläpäisynepeuden V_c -arvon ja tuotteen suhteellisen diffuusiovastuskertoimien välillä on hieman keskinäistä eroa kuppien välillä, mutta laskennalliset arvot sijoittuvat selkeästi kaikkiin standardin luokitusarvoluokkiin V_1 , V_2 ja V_3 kaikilla kupeilla. Näytteiden tarkemmat tulokset liitteissä (Liite 1, Liite 2, Liite 3.)

Taulukko 14 Tuotteiden sijoittuminen standardin SFS-EN 1062-1 luokittelun mukaisesti. Sarakkeet on yhdistetty kuppien kesken sen takia, koska kaikki menivät samaan luokitukseen kupista huolimatta.

| Kategoria | Tuotteiden sijoittuminen standardin SFS-EN 1062-1 luokkiin saatujen tulosten perusteella | | |
|----------------|--|-------|---------|
| | Lasi | Muovi | Metalli |
| V ₁ | Läpäisevä | | |
| V ₂ | Puoliläpäisevä 1 ja puoliläpäisevä 2 | | |
| V ₃ | Tiivis | | |

Käyttäjänäkökulmasta jokaisessa kupissa oli erilaiset ongelmat. Lasikuppeihin asetettava liuosmäärä tuntui parhaimmalta. Tiivistys oli kuitenkin aikaa vievää, hankalaa, ja tiiviin tuotteen tuloksia ei voida katsoa kovinkaan luotettaviksi.

Muovikupit olivat suuren halkaisijansa vuoksi kierrekiinnityksen osalta haasteellinen ja epäergonominen, mutta nopea ja helposti toteutettavissa. Liuosmäärä näissä kupeissa on suurin, ja näin myös kokoonpano on painavin.

Metallikupit olivat ergonomisesti parhaimmat: helppo ja nopea kiinnitys, pieni määrä nestettä ja kokoonpano on vähän tilaa vievä ja kevyt. Testausten jälkeen valitettavasti huomattiin, että metallipinta oli alkanut värjäytymään sekä sisäpuolelta että kierteistä. Tämän vuoksi metallikuppeja ei olisi voitu suositella otettavaksi käyttöön, vaikka tiiviin tuotteen testaustulokset olisivat olleet luotettavampia.

Tämän insinööriyön tavoitteena oli tutkia menetelmää, joka soveltuu mittaamaan maalituotteiden vesihöyrynläpäisykyvyn arvoja. Työssä toteutetut testaukset voidaan katsoa onnistuneiksi tiiviiden tuotteiden tuloksista huolimatta, sillä tulokset ovat järkeviä ja suuri osa testikuppien tuloksista voitiin hyödyntää.

Testitulosten avulla saatiin arvokasta tietoa kuppityyppien toiminnasta eri läpäisykyvyn alueilla.

11 Pohdinta

Testisarjan mittausepävarmuuteen on voinut vaikuttaa mm. valmistelussa, kuivauksen näytteiden valmistelussa tapahtuvat asiat, kuivausolosuhteet tai testisarjan suorituksen aikana tapahtuvat muutokset.

Näytteiden valmistuksessa mittausepävarmuutta on voinut kasvattaa muun muassa kalvonpaksuusmittarin aiheuttama epävarmuus, näytteen heterogeenisuus ja applikoidun vedon onnistuminen.

Testisarjan mittaustuloksiin on voinut vaikuttaa moni asia, erityisesti testiolosuhteet eli vallitsevan tilan ilmankosteus ja lämpötila. Testaus toteutettiin vakioolosuhteissa, mutta voidaan epäillä, että myös pienemmät vaihtelut lämpötilassa ja kosteudessa voivat vaikuttaa kosteusvirrantiheyteen jossain määrin.

Lisäksi kahden eri vaa'an käyttö on voinut aiheuttaa jonkin verran mittausepävarmuutta tuloksiin, mutta tätä pyrittiin kontrolloimaan mittaamalla tulokset molemmilla vaa'oilta ja vertaamalla, vastaavatko molemmat vaa'at saatua tulosta.

Mikäli työssä olisi ollut enemmän rinnakkaisia määrittäyksiä, tuloksille olisi ollut kannattavaa tehdä tilastollinen analyysi ja tämän perusteella olisi mahdollisesti saanut tehtyä enemmän johtopäätöksiä saaduista tuloksista. Lisäksi testausta olisi voitu toteuttaa vielä pidemmän ajan, jolloin olisi ollut mahdollista tutkia testisarjan olosuhteiden merkitystä tuloksiin.

Menetelmän herkkyyttä voisi tutkia tarkemmin. Jokaiseen menetelmän työvaiheeseen liittyy erilaisia epävarmuutta lisääviä tekijöitä. Jos näihin asioihin saadaan perehdyttyä ja näitä saadaan tutkittua, voidaan tehdä parempia

johtopäätöksiä siitä, miten menetelmä saadaan optimoitua toimimaan parhaiten nykyisten tuotteiden käyttöön.

Viimeisimpänä asiana on näytteen kalvonpaksuuden merkitys tuloksiin. Suuremmalla kalvonpaksuudella olisi teoreettisesti saatu isompi vesihöyrynvastus ja diffuusiovastus näytteille. Tällä olisi voitu saada selville, näkyykö isommilla kalvonpaksuuksilla selkeämmät erot kuppien välillä.

Lähteet

- 1 Maalialan sanasto. Verkkoaineisto. Tikkurila Oyj. <<https://tikkurila.fi/tikkurilan-maalilinja/maalialan-sanasto>> Luettu 1.9.2021.
- 2 Raaka-aineet. Verkkoaineisto. Tikkurila Oyj. <<https://www.tikkurila-group.com/fi/vastuullisuuskestavat-ratkaisut/raaka-aineet>> Luettu 1.9.2021.
- 3 Maalin koostumus, Maalikemiaa. Verkkoaineisto. Tikkurila Oyj <<https://docplayer.fi/9281339-Maalin-koostumus-esim-5-25-40-30-liuotevesi-sideaine-pigmentti-apuaineet.html>> Luettu 1.10.2021.
- 4 Paints and solvents. Verkkoaineisto. <http://health.gov.vc/health/images/PDF/SAICM/paints_and_solvents.pdf> Luettu 12.12.2021.
- 5 BASF Handbook Goldschmidt, A. Streitberger, H. 2003. BASF HANDBOOK ON Basics of Coating Technology. Hannover:Primedia.
- 6 Mitä maalia mihinkin. 2004. Tikkurila Paints Oy. Toinen painos. Vantaa: Tikkurila Paints Oy.
- 7 Siikanen, Unto. 2014. Rakennusfysiikka, Perusteet ja sovellukset. Tampere: Rakennustieto Oy.
- 8 Ilmankosteus. Tekeville. Verkkoaineisto <<http://www.tekeville.fi/ilmankosteus>> Luettu 10.1.2022.
- 9 Siikanen, Unto. Rakennusten lämpö- ja kosteusfysikaalisia näkökohtia. Verkkoaineisto. <http://kosteusvauriokorjaus.savonia.fi/jdownloads/Muut%20julkaisut/Rakentajain%20kalenteri/Rakennusten_lampo_ja_kosteusfysikaalisia_ominaisuuksia_-_Siikanen_2012.pdf> Luettu 22.3.2022.
- 10 Relative Humidity. Sciencedirect. Verkkoaineisto. <<https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/relative-humidity>> Luettu 11.1.2022.
- 11 Absolute Humidity. Sciencedirect. Verkkoaineisto. <<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/absolute-humidity>> Luettu 11.1.2022.
- 12 Rakennusmateriaalien hygroskooppisuus. Kapillaari.fi. Verkkoaineisto. <<https://kapillaari.fi/materiaalien-hygroskooppisuus/>> Luettu 22.1.2022.

- 13 Materiaalien ominaisuudet. Sisäilmayhdistys ry. Verkkoaineisto. <<https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Materiaalien-ominaisuudet>> Luettu 12.2.2022.
- 14 Kokko, Erkki. 2002. Hengittävä puukuiturakenne. Fysikaalinen toimintaperiaate ja vaikutukset sisäilmaan. Verkkoaineisto. <https://ekovilla.com/wp-content/uploads/2021/01/Puukuiturakenne_koko_ohje.pdf> Luettu 13.2.2022.
- 15 Korhonen, Lauri. 2017. Solumuovieristettyjen betonielementtien kuivumistarkastelut. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Theseus-tietokanta.
- 16 Willman, Janne. 2015. Kosteudenhallinnan menetelmät. Opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 17 Absorptio. Betonitieto. Verkkoaineisto. <<https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/absorptio.html>> Luettu 1.3.2022.
- 18 Pitkäranta, Miia. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. 2016. Ympäristöopas. Verkkoaineisto. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/75517/YO_2016_Kuntotutkimus-opas.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Luettu 3.3.2022.
- 19 Kapillaarinen kosteus. Safe Drying. Verkkoaineisto. <<https://www.safedrying.fi/kapillaarinen-kosteus/>> Luettu 1.3.2022.
- 20 Veden painovoimainen siirtyminen. Sisäilmayhdistys ry. Verkkoaineisto. <<https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Kosteuden-siirtyminen>> Luettu 1.3.2022.
- 21 Huittinen Henna. 2017. Kasvikuitupohjaisten lämmöneristemateriaalien kosteustekninen toiminta. Opinnäytetyö. Saimaan ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 22 Vesihöyryn diffuusio. Raksystems. 2017. Verkkoaineisto. <<https://raksystems.fi/sanasto/vesihoyryn-diffuusio/>> Luettu 8.3.2022.
- 23 Asiaa kosteudesta ja sen liikkumisesta. Tiivistalo. Verkkoaineisto. <https://www.tiivistalo.fi/tiivistalo_wiki/> Luettu 22.3.2022.
- 24 Vapour resistances and μ -values. Builddesk. Verkkoaineisto. <<https://builddesk.co.uk/wp-content/uploads/2013/01/vapourResistances.pdf>> Luettu 12.4.2022.

- 25 Hyypöläinen, Tarja. Pentti, Matti. Ulkoseinärakenteiden kosteustekninen suunnittelu, verkkoaineisto <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/116664/pentti_hyypolainen_ulkoseinarakenteiden_kosteustekninen_suunnittelu.pdf?sequence=2&isAllowed=y> Luettu 22.3.2022.
- 26 Sisämaalien vesihöyrynvastus. Tikkurila Oyj. Verkkoaineisto. <<https://tikkurila.fi/artikkeli/sisamaalien-vesihoyrynvastus>> Luettu 25.3.2022.
- 27 SFS-EN ISO 7783. 2018. Paints and varnishes. Determination of water vapour transmission properties. Cup method. Suomen standardisoimisliitto SFS.
- 28 SFS-EN ISO 12572. 2016. Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water vapour transmission properties. Cup method. Suomen standardisoimisliitto SFS.
- 29 Narloch, Piotr. Piatkiewicz, Wojciech. Pietruszka, Barbara. The Effect of Cement Addition on Water Vapour Resistance Factor of Rammed Earth. Verkkoaineisto. <<https://www.mdpi.com/1996-1944/14/9/2249/htm>> Luettu 25.3.2022.
- 30 SFS-EN 1062-1. 2004. Maalit ja lakat. Pinnoiteaineet ja -yhdistelmät säärasitukseen joutuville kiviaines- ja betonipinnoille. Osa 1: Luokittelu. Suomen standardisoimisliitto SFS.

Lasisilla kupeilla saadut tulokset

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Alustat | | | | | |
| Vs 1 | 412,7 | 384,6 | 383,7 | | |
| Vs 2 | 401,2 | 385,5 | 412,0 | | |
| Läpäisevä | | | | | |
| Kalvonpaksuus μm | 52 | 52 | 50 | 51 | 52 |
| Vcs | 141,2 | 148,3 | 145,9 | 144,1 | 140,3 |
| Vc | 220,1 | 238,0 | 231,9 | 227,2 | 217,9 |
| Sd | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| μ | 1782,57 | 1648,42 | 1759,10 | 1760,31 | 1800,49 |
| G | 1,67E-08 | 1,76E-08 | 1,73E-08 | 1,71E-08 | 1,66E-08 |
| W | 1,36E-09 | 1,43E-09 | 1,40E-09 | 1,39E-09 | 1,35E-09 |
| Z | 7,36E+08 | 7,00E+08 | 7,12E+08 | 7,19E+08 | 7,40E+08 |
| δ | 7,06E-12 | 7,43E-12 | 7,02E-12 | 7,09E-12 | 7,02E-12 |
| Puoliläpäisevä 1 | | | | | |
| Kalvonpaksuus μm | 50 | 51 | 52 | 53 | 52 |
| Vcs | 71,5 | 62,9 | 67,6 | 66,8 | 62,6 |
| Vc | 87,4 | 74,9 | 81,6 | 80,4 | 74,4 |
| Sd | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| μ | 4667 | 5338 | 4809 | 4788 | 5272 |
| G | 8,55E-09 | 7,49E-09 | 8,01E-09 | 7,89E-09 | 7,41E-09 |
| W | 6,94E-10 | 6,08E-10 | 6,50E-10 | 6,40E-10 | 6,01E-10 |
| Z | 1,44E+09 | 1,65E+09 | 1,54E+09 | 1,56E+09 | 1,66E+09 |
| δ | 3,47E-12 | 3,10E-12 | 3,38E-12 | 3,39E-12 | 3,13E-12 |
| Puoliläpäisevä 2 | | | | | |
| Kalvonpaksuus μm | 63 | 60 | 68 | 64 | 60 |
| Vcs | 61,7 | 62,0 | 62,3 | 52,2 | 62,3 |
| Vc | 72,9 | 73,4 | 73,8 | 60,1 | 73,8 |
| Sd | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,34 | 0,28 |
| μ | 4440 | 4630 | 4063 | 5304 | 4606 |
| G | 7,33E-09 | 7,36E-09 | 7,38E-09 | 8,24E-09 | 7,40E-09 |
| W | 5,95E-10 | 5,97E-10 | 5,99E-10 | 6,69E-10 | 6,01E-10 |
| Z | 1,68E+09 | 1,67E+09 | 1,67E+09 | 1,49E+09 | 1,66E+09 |
| δ | 3,75E-12 | 3,58E-12 | 4,07E-12 | 4,28E-12 | 3,60E-12 |
| Tiivis | | | | | |
| Kalvonpaksuus μm | 49 | 49 | 55 | 50 | 47 |
| Vcs | 5,1 | 12,4 | 4,4 | 8,2 | 10,1 |
| Vc | 5,2 | 12,8 | 4,4 | 8,4 | 10,4 |
| Sd | 3,94 | 1,59 | 4,61 | 2,44 | 1,97 |
| μ | 80419 | 32529 | 83832 | 48755 | 41823 |
| G | 6,13E-10 | 1,48E-09 | 5,24E-10 | 9,77E-10 | 1,21E-09 |
| W | 4,97E-11 | 1,20E-10 | 4,25E-11 | 7,93E-11 | 9,79E-11 |
| Z | 2,01E+10 | 8,32E+09 | 2,35E+10 | 1,26E+10 | 1,02E+10 |
| δ | 2,44E-13 | 5,89E-13 | 2,34E-13 | 3,97E-13 | 4,60E-13 |

Muovisilla kupeilla saadut tulokset

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Alustat | | | | | |
| Vs 1 | 442,2 | 460,3 | 460,7 | 426,2 | |
| Vs 2 | 456,1 | 457,4 | 477,7 | 487,0 | |
| Läpäisevä | | | | | |
| Kalvonpaksuus μm | 55 | 59 | 55 | 57 | 58 |
| Vcs | 194,4 | 159,4 | 165,2 | 178,5 | 166,1 |
| Vc | 343,9 | 247,5 | 261,8 | 296,9 | 264,3 |
| Sd | 0,06 | 0,08 | 0,08 | 0,07 | 0,08 |
| μ | 1079 | 1397 | 1417 | 1205 | 1331 |
| G | 1,50E-08 | 1,18E-08 | 1,22E-08 | 1,32E-08 | 1,23E-08 |
| W | 1,95E-09 | 1,53E-09 | 1,59E-09 | 1,72E-09 | 1,60E-09 |
| Z | 5,12E+08 | 6,52E+08 | 6,29E+08 | 5,80E+08 | 6,25E+08 |
| δ | 1,07E-11 | 9,05E-12 | 8,75E-12 | 9,82E-12 | 9,28E-12 |
| Puoliläpäisevä 1 | | | | | |
| Kalvonpaksuus μm | 50 | 50 | 49 | 51 | 48 |
| Vcs | 843,5 | 69,8 | 69,2 | 75,8 | 73,5 |
| Vc | -952,5 | 82,7 | 81,8 | 91,3 | 88,0 |
| Sd | -0,02 | 0,25 | 0,25 | 0,22 | 0,23 |
| μ | -428 | 4936 | 5089 | 4382 | 4831 |
| G | 6,85E-08 | 5,19E-09 | 5,12E-09 | 5,64E-09 | 5,45E-09 |
| W | 8,93E-09 | 6,76E-10 | 6,67E-10 | 7,34E-10 | 7,10E-10 |
| Z | 1,12E+08 | 1,48E+09 | 1,50E+09 | 1,36E+09 | 1,41E+09 |
| δ | 4,46E-11 | 3,38E-12 | 3,27E-12 | 3,75E-12 | 3,41E-12 |
| Puoliläpäisevä 2 | | | | | |
| Kalvonpaksuus μm | 66 | 63 | 52 | 64 | 65 |
| Vcs | 67,5 | 68,5 | 69,2 | 55,5 | 77,5 |
| Vc | 78,8 | 80,2 | 81,1 | 63,0 | 92,9 |
| Sd | 0,26 | 0,25 | 0,25 | 0,32 | 0,22 |
| μ | 3924 | 4037 | 4837 | 5060 | 3379 |
| G | 5,02E-09 | 5,14E-09 | 5,12E-09 | 5,46E-09 | 5,75E-09 |
| W | 6,53E-10 | 6,69E-10 | 6,67E-10 | 7,11E-10 | 7,49E-10 |
| Z | 1,53E+09 | 1,49E+09 | 1,50E+09 | 1,41E+09 | 1,33E+09 |
| δ | 4,31E-12 | 4,22E-12 | 3,47E-12 | 4,55E-12 | 4,87E-12 |
| Tiivis | | | | | |
| Kalvonpaksuus μm | 51 | 48 | 59 | 60 | 43 |
| Vcs | 5,1 | 6,0 | 5,4 | 5,9 | 6,5 |
| Vc | 5,2 | 6,1 | 5,4 | 6,0 | 6,6 |
| Sd | 3,95 | 3,34 | 3,76 | 3,42 | 3,07 |
| μ | 77448 | 69629 | 63645 | 56957 | 71426 |
| G | 3,70E-10 | 4,48E-10 | 4,09E-10 | 4,71E-10 | 4,94E-10 |
| W | 4,82E-11 | 5,83E-11 | 5,33E-11 | 6,13E-11 | 6,43E-11 |
| Z | 2,07E+10 | 1,72E+10 | 1,88E+10 | 1,63E+10 | 1,55E+10 |
| δ | 2,46E-13 | 2,80E-13 | 3,14E-13 | 3,68E-13 | 2,77E-13 |

Metallisilla kupeilla saadut tulokset

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Alustat | | | | | |
| Vs 1 | 536,8 | 439,7 | 445,8 | 498,8 | |
| Vs 2 | 606,0 | 532,8 | 580,2 | | |
| Läpäisevä | | | | | |
| Kalvonpaksuus μm | 54 | 59 | 58 | 55 | 57 |
| Vcs | 180,8 | 200,6 | 176,4 | 188,3 | 184,6 |
| Vc | 290,0 | 344,4 | 278,8 | 309,6 | 299,9 |
| Sd | 0,07 | 0,06 | 0,07 | 0,07 | 0,07 |
| μ | 1303 | 1004 | 1262 | 1198 | 1194 |
| G | 5,22E-09 | 5,78E-09 | 5,07E-09 | 5,39E-09 | 5,43E-09 |
| W | 1,76E-09 | 1,94E-09 | 1,71E-09 | 1,81E-09 | 1,83E-09 |
| Z | 5,70E+08 | 5,14E+08 | 5,86E+08 | 5,51E+08 | 5,47E+08 |
| δ | 9,48E-12 | 1,15E-11 | 9,89E-12 | 9,98E-12 | 1,04E-11 |
| Puoliläpäisevä 1 | | | | | |
| Kalvonpaksuus μm | 50 | 51 | 49 | 48 | 51 |
| Vcs | 73,9 | 85,2 | 80,4 | 82,6 | 81,8 |
| Vc | 87,4 | 103,6 | 96,5 | 99,8 | 98,6 |
| Sd | 0,23 | 0,20 | 0,21 | 0,20 | 0,21 |
| μ | 4670 | 3862 | 4312 | 4258 | 4058 |
| G | 2,12E-09 | 2,44E-09 | 2,31E-09 | 2,37E-09 | 2,34E-09 |
| W | 7,14E-10 | 8,22E-10 | 7,77E-10 | 7,98E-10 | 7,88E-10 |
| Z | 1,40E+09 | 1,22E+09 | 1,29E+09 | 1,25E+09 | 1,27E+09 |
| δ | 3,57E-12 | 4,19E-12 | 3,81E-12 | 3,83E-12 | 4,02E-12 |
| Puoliläpäisevä 2 | | | | | |
| Kalvonpaksuus μm | 66 | 63 | 52 | 64 | 65 |
| Vcs | 92,4 | 89,4 | 106,9 | 60,8 | 118,7 |
| Vc | 110,1 | 105,9 | 131,5 | 68,0 | 149,6 |
| Sd | 0,19 | 0,19 | 0,16 | 0,30 | 0,14 |
| μ | 2807 | 3057 | 2984 | 4686 | 2097 |
| G | 2,63E-09 | 2,60E-09 | 3,11E-09 | 2,28E-09 | 3,49E-09 |
| W | 8,85E-10 | 8,75E-10 | 1,05E-09 | 7,65E-10 | 1,17E-09 |
| Z | 1,13E+09 | 1,14E+09 | 9,55E+08 | 1,31E+09 | 8,52E+08 |
| δ | 5,84E-12 | 5,51E-12 | 5,45E-12 | 4,90E-12 | 7,63E-12 |
| Tiivis | | | | | |
| Kalvonpaksuus μm | 51 | 48 | 59 | 60 | 43 |
| Vcs | 5,8 | 54,0 | 22,3 | 6,0 | 6,7 |
| Vc | 5,8 | 59,7 | 23,2 | 6,0 | 6,7 |
| Sd | 3,49 | 0,34 | 0,88 | 3,39 | 3,03 |
| μ | 68441 | 7124 | 14904 | 56505 | 70351 |
| G | 1,66E-10 | 1,58E-09 | 6,73E-10 | 1,72E-10 | 1,92E-10 |
| W | 5,57E-11 | 5,32E-10 | 2,26E-10 | 5,77E-11 | 6,45E-11 |
| Z | 1,80E+10 | 1,88E+09 | 4,42E+09 | 1,73E+10 | 1,55E+10 |
| δ | 2,84E-13 | 2,55E-12 | 1,34E-12 | 3,46E-13 | 2,77E-13 |