

Ilkka Tuurala

# **KALSIUMSILIKAATTILEVYJEN VESIHÖYRYNLÄPÄISYN MÄÄRITTÄMINEN KUIVAKUPPIKOEELLA**

Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Tammikuu 2020



# TIIVISTELMÄ

Ilkka Tuurala: Kalsiumsilikaattilevyjen vesihöyrynläpäisyn määrittäminen kuivakuppikokeella  
(Determination of the water vapour permeability of the calcium silicate sheets by the dry cup method)  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Tammikuu 2020

---

Työssä tutkitaan kalsiumsilikaattilevyjen vesihöyrynläpäisevyyttä kuivakuppikokeella. Tuloksia verrataan vastaaville koekappaleille tehtyihin märkäkuppikokeisiin. Tavoitteena on selvittää, saavutetaanko kuivakuppikokeella vertailukelpoisia tuloksia ja olisiko se joissakin tapauksissa käyttökelpoinen vaihtoehto märkäkuppikokeelle. Kuivakuppikoe sisältää selviä etuja märkäkuppikokeeseen nähden. Se on ajallisesti nopeammin suoritettavissa ja koekappaleita on helpompi käsitellä. Kuivakuppikoe soveltuu sellaisiin tarkoituksiin, joissa tutkitaan kosteudenläpäisevyyttä ympäristön alle 50 % RH kosteusolosuhteissa.

Kokeet tehtiin standardin SFS-EN ISO 12572 mukaisesti. Koejärjestelyn tavoitteena oli toistaa koe mahdollisimman pitkälti vastaavana kuin aiemmin toteutettu märkäkuppikoe. Toteutusohje ja laskentapohja olivat samat kuin märkäkuppikokeessa. Märkäkuppikokeessa kosteusvirran tasaantuminen kesti useita viikkoja. Nyt toteutettu kuivakuppikoe suoritettiin muutamassa päivässä.

Saadut tulokset ovat suhteellisen lähellä märkäkuppikokeen tuloksia. Erot selittyvät pitkälti erilaisilla kosteusolosuhteilla ja mittausepäätarkkuudella. Kuivakuppikokeen tulokset, samoin kuin märkäkuppikokeenkin tulokset, eroavat kirjallisuuden viitearvoista. Märkäkuppikoe-tutkimuksessa tätä selitetään mahdollisella kapillaarisella kosteudensiirtymisellä erityisesti kun ympäristön suhteellinen kosteus on korkea. Kuivakuppikokeen tulokset eroavat kirjallisuuden viitearvoista vähemmän kuin märkäkuppikokeen tulokset. Erot mahtuvat virhemarginaaliin standardin määrittämässä lämpötilan, kupin ilmatilan sekä ympäristön lämpötilan mittaustarkkuuksissa.

Tulosta voidaan pitää onnistuneena, koska koetulokset vastaavat märkäkuppikokeen tuloksia. Kuivakuppikoe soveltuu esimerkiksi silloin, kun määritetään diffuusiovastuserrointa. Diffuusiovastuserroin määritellään yleisesti kuivissa olosuhteissa, joissa ympäristön suhteellinen kosteus on alle 50 % RH. Kuivakuppikokeen soveltuvuuteen vaikuttaa kuitenkin se, että standardin mukaan kuivakuppikoe sopii huonosti hyvin kosteutta läpäiseville ( $S_d < 0,1m$ ) materiaaleille. Tällaisille materiaaleille kosteuden tasaantuminen on niin nopeaa, että koe epäonnistuu herkästi.

Lisäksi tutkimuksessa saatiin lisäohjeita ja tarkennuksia kokeen toteuttamisohjeeseen kun koe toteutetaan kuivakuppikokeena.

Avainsanat: vesihöyrynläpäisevyys, kuivakuppikoe, kalsiumsilikaattilevyt

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck – ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO .....	1
2	KOSTEUDENSIIRTYMINEN JA VESIHÖYRYNLÄPÄISEVYYS .....	2
2.1	Kosteus .....	2
2.2	Kosteudensiirtyminen.....	3
2.3	Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys .....	4
2.4	Kalsiumsilikaatti materiaalina.....	4
3	KUPPIKOKKEET .....	6
3.1	Standardi SFS-EN 12572:2001 .....	6
3.1.1	Koekappaleiden valmistelu .....	7
3.1.2	Märkä- ja kuivakuppikokeen eroavaisuudet .....	8
4	KOEJÄRJESTELY JA LASKENTA .....	10
4.1	Aiempien märkäkuppikokeiden toteutus.....	10
4.2	Yleistä kokeesta.....	10
4.3	Näytteet ja koekuppien valmistaminen .....	11
4.4	Mittauksien suorittaminen.....	12
4.5	Laskenta .....	13
4.5.1	Laskenta laskentapohjan kaavoilla.....	13
4.5.2	Laskenta standardin kaavoilla.....	17
5	TULOKSET JA VERTAILU.....	19
5.1	Koekappaleiden käsittely ja yleisesti kokeesta .....	19
5.2	Kokeiden eteneminen .....	19
5.3	Laskennan tulosten vertailu.....	22
6	YHTEENVETO .....	27
	LÄHTEET.....	29
	LIITE A: KÄYTÄNNÖN TOTEUTUSOHJEITA KUIVAKUPPIKOEELLE.....	31
	LIITE B: LASKENTAPOHJAAN TEHDYT MUUTOKSET .....	33
	LIITE C: ENSIMMÄISEN KOEKERRAN TAULUKOT .....	34

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

### Lyhenteet

RH	Suhteellinen kosteus (% RH suhteellinen kosteus prosentteina)
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto

### Merkinnät

A	koekappaleen avoin pinta-ala
d	koekappaleen paksuus
$d_a$	ilmatila koekupissa
$\Delta m_{12}$	massanmuutos peräkkäisissä punnituksissa $m_1$ ja $m_2$
g	massavirta
$g_k$	korjattu massavirta, jossa vahan peittävä reuna otettu huomioon.
G	viiden peräkkäisen onnistuneen punnituksen painonmuutoksen keski-arvo
$m_1$	punnitustulos ajanhetkellä $t_1$
$m_2$	punnitustulos ajanhetkellä $t_2$
$M_w$	veden moolimassa 18,02 kg/kmol
$\mu$	vesihöyryn diffuusionvastuskerroin
R	kaasuvakio 8314,3 J/kmolK
$\varphi_{huone}$	suhteellinen kosteus % RH koekappaleen kosteushuoneessa
$\varphi_{kuppi}$	suhteellinen kosteus % RH koekupissa
$S_d$	diffuusionvastuskerroin
$\delta_a$	ilman vesihöyrynläpäisevyys
$\delta_p$	vesihöyrynläpäisevyys osapaineiden avulla
$\delta_v$	vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuksien avulla
$t_1$	ajanhetki $t_1$ kokeen alusta
$t_2$	ajanhetki $t_2$ sekunteina kokeen alusta
$W_p$	vesihöyrynläpäisykerroin osapaineiden avulla
$W_v$	vesihöyrynläpäisykerroin vesihöyrypitoisuuksien avulla
$Z_p$	vesihöyrynvastus osapaineiden avulla
$Z_v$	vesihöyrynvastus vesihöyrypitoisuuksien avulla

# 1 JOHDANTO

Tässä työssä tutkitaan kalsiumsilikaattilevyjen vesihöyrynläpäisevyyttä. Kalsiumsilikaattilevyt ovat huokoisia eristemateriaaleja joita käytetään esimerkiksi maanvaraisten seinien sisäpuolisena lämmöneristeenä. Tässä käyttötarkoituksessa on tärkeää että eriste pääsee ja kykenee kuivumaan sisäänpäin.

Työssä täydennetään kokeita jotka on aiemmin tehty Tampereen Teknillisessä Yliopistossa (TTY) osana Maarit Vainion diplomityötä [1]. Tuossa työssä kalsiumsilikaattilevyjen vesihöyrynläpäisyä tutkittiin kosteusparilla 50/93 % RH. Tässä työssä täydennetään tuloksia kuivakuppikokeella, jossa kupissa on 0 % RH (oranssigeeli) ja huoneessa 50 % RH.

Vesihöyrynläpäisevyyden mittaaminen kuppikokeella perustuu kosteuden tasaiseen virtaamiseen. Materiaalinäyte asetetaan tiiviiksi kanneksi astiaan, jonka sisällä on vakiona pysyvä vesihöyrypitoisuus ja suhteellinen kosteus [9]. Märkäkuppikokeessa mitataan kosteusvirtaa kupista ulospäin. Kuivakuppikokeessa mitataan kosteusvirtaa ympäristöstä kupin sisälle.

Vaikka kuivakuppikoe on periaatteeltaan sama kuin märkäkuppikoe, toteutus eroaa aika-  
taulullisesti huomattavasti. Märkäkuppikokeessa tasaantuminen tapahtuu viikkojen, jopa kuukausien aikana, kun taas kuivakuppikokeessa mitattava kuivatusaineen painonmuutos on niin pieni, että koe on ohi muutamassa päivässä. Kuppikokeiden tulokset eivät myöskään ole täysin vertailukelpoisia kosteusolosuhteiden ollessa erilaiset [4].

Ensimmäisellä koekerralla kuivakuppikoe epäonnistui, koska koejärjestely tehtiin noudattamalla toteutusohjetta, joka oli tehty märkäkuppikokeelle. Seuranta-aikataulu otettiin märkäkuppikokeen toteutusohjeesta, joka oli noin 3-5 kertaa viikossa kahden kuukauden ajan. Käytännössä silikageeli oli ehtinyt saavuttaa kylläisyytensä jo ennen toista punnitusta. Toisella kerralla punnitukset toteutettiin muutaman vuorokauden aikana, tehden useita punnituksia vuorokauden aikana.

Tuloksena kokeista saatiin, että kuivakuppikokeen tulokset vastaavat märkäkuppikokeella saatuja tuloksia. Diffuusiovastuskertoimen osalta erot kirjallisuuden viitearvoihin mahtuvat virhemarginaaliin.

## 2 KOSTEUDENSIIRTYMINEN JA VESIHÖYRYN- LÄPÄISEVYYS

### 2.1 Kosteus

Vesi on kahden vetyatomin ja yhden happiatomin muodostama kemiallinen yhdiste. Vettä esiintyy maapallolla kolmessa olomuodossa: nestemäisenä vetenä, kiinteässä muodossa jäänä sekä kaasuna eli vesihöyryinä.

Kosteus ilmaisee veden tai vesihöyryyn määrää toisessa aineessa. Vesi voi olla joko aineeseen sitoutuneena, huokosilmatilassa tai aineen pinnalla [10, 15]. Ilmankosteus kuvaa vesihöyryyn määrää ilmassa. Eri asiayhteyksissä kosteudella saatetaan tarkoittaa eri asioita. Esimerkiksi puumateriaalin sopivuutta eri käyttötarkoituksiin arvioitaessa kosteudella tarkoitetaan kokonaiskosteutta. Kun tarkastellaan puun tai muun rakennusmateriaalin kosteusvaurioitumisesta, kosteudella tarkoitetaan yleisimmin materiaalin huokostilassa olevaa kosteutta.

Absoluuttinen kosteus (yksikkönä  $\text{kg/m}^3$ ) ilmaisee veden tai vesihöyryyn määrän tietyssä tilavuudessa toista ainetta [15]. Se kuvaa siis veden määrää, eikä muutu lämpötilan tai ilmanpaineen mukaan.

Suhteellinen kosteus (tässä esityksessä yksikkönä RH tai  $\varphi$ ) on todellisen vesihöyrynpaineen ja kyllästyshöyrynpaineen välinen suhde tietyssä lämpötilassa [4, 15]. Se siis kertoo, kuinka monta prosenttia absoluuttinen kosteus on vallitsevan lämpötilan kyllästyskosteudesta. Kastepistelämpötila, lyhyemmin kastepiste, on lämpötila, johon ilma on vakiopainessa jäädytettävä, jotta vesihöyry alkaisi tiivistyä [4, 15]. Suhteellinen kosteus laskeaan kaavalla

$$\varphi = \frac{p_{H_2O}}{p_{H_2O}^*} * 100\% \quad (2.1)$$

missä

$p_{H_2O}$  on veden osapaine kaasuseoksessa ja

$p_{H_2O}^*$  on kyllästysosapaine.

Suhteellisen kosteuden yksikkönä käytetään tässä esityksessä (% RH).

## 2.2 Kosteudensiirtyminen

Vesi siirtyy eri olomuodoissaan useilla eri tavoilla. Kaasumaisessa muodossaan vesi siirtyy diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. Nestemäisenä vesi siirtyy joko kapillaarisesti tai virtaamalla ulkoisen voiman vaikutuksesta.

Diffuusio on kaasumolekyylien liikettä, jonka seurauksena kaasuseoksessa oleva kaasupitoisuus ja osapaine-ero pyrkivät tasoittumaan. Paine-erot pyrkivät tasaantumaan myös materiaalin läpi. Kun lämpötila eroaa materiaalin eri puolilla, on tällöin myös vesihöyryn osapaine erilainen. Kosteus siirtyy vesihöyryn osapaine-eron vaikutuksesta alemman pitoisuuden suuntaan [4].

Konvektiossa kosteus siirtyy ilmavirran mukana. Ilmavirtauksen saa aikaiseksi lämpötilaltaan ja siten myös tiheydeltään erilaisten ilmassojen keskinäinen tasoittuminen. Tällöin puhutaan luonnollisesta konvektiosta. Jos ilmavirtauksen aiheuttaa pakottava voima, kuten tuuli tai ilmanvaihtokone, puhutaan pakotetusta konvektiosta.

Kun vesihöyry siirtyy diffuusion tai konvektion vaikutuksesta kylmempään ympäristöön ja vesihöyry kylmenee, tapahtuu tiivistymistä eli kondensoitumista vedeksi. Vastaavasti nestemäisen veden ollessa kastepistettä lämpimämmässä ympäröivää ilmaa kylmemmästä pinnasta tapahtuu sekä vesihöyryn siirtymistä ilmaan että mahdollisen nestemäisen veden haihtumista veden olomuodon muuttuessa kaasuksi, jonka konvektio kuljettaa pois.

Kapillaarisesti vesi siirtyy, kun vesimolekyylit ovat yhteydessä hydrofiilisen aineen kanssa. Tällöin vesimolekyylien osana olevat vetyatomit pyrkivät muodostamaan sidoksia viereisen aineen molekyylin kanssa. Kun tämän kemiallisen sidoksen voima ylittää veden pintajännityksen eli vesimolekyylien välisen sidoksen, vesimolekyylit siirtyvät. Tämä siirtyminen jatkuu niin kauan kuin sille on suosiolliset olosuhteet ja vesimolekyylien keskinäinen vetovoima edistää tätä ilmiötä. Kapillaarisessa siirtymisessä materiaalin olennainen ominaisuus on oikeankokoiset huokokset ja näiden yhteys toisiinsa. Kapillaarinen siirtyminen vaatii niin ohuen huokoksen eli kapillaarihuokoksen että viereisen hydrofiilisen aineen vetovoima voittaa vesimolekyylien välisen vetovoiman. Kapillaarinen siirtyminen riippuu siis oikeankokoisista huokosista ja näiden jatkuvuudesta materiaalissa. Esimerkiksi betonirakenteissa kapillaarinen kosteuden nousu on useita metrejä. Vesi jatkaa kapillaarisesti nousuaan betonirakenteessa kunnes pinnasta tapahtuva haihtuminen poistaa veden. Betonirakenteessa kapillaarista kosteuden nousua rajoittavana tekijänä on käytännössä betonirakenteen paksuus ja pinnan vesihöyrynläpäisevyys.

Virtaava nestemäinen vesi valuu yleisimmin painovoiman vaikutuksesta alaspäin. Mutta ulkoisen voiman, rakenteissa yleisimmin tuulenpaineen vaikutuksesta vesi voi virrata myös ylöspäin.



## 2.3 Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys

Vesihöyrypitoisuus  $v$  ilmoittaa ilmassa olevan vesihöyrynmäärän. Vesihöyrynläpäisykerroin  $W_v$  tai  $W_p$  ilmoittaa vesimäärän joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen rakenneosan, kun rakenneosan eri puolilla olevien ilmatilojen vesihöyrypitoisuuksien tai vesihöyryn osapaine-ero on yksikön suuruinen [16]. Vesihöyrynvastus on vesihöyrynläpäisykerroimen vastaluku. Tarkasti ottaen siihen kuuluu ottaa huomioon myös pintavastus, mutta käytännössä sen merkitys on pieni.

Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys ilmoittaa vesimäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suurien ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen vesihöyrypitoisuuksien ero on yksikön suuruinen. Kosteus voi siirtyä myös muissa olomuodoissa kuin vesihöyrynä, jolloin voidaan puhua kosteudenläpäisevyydestä [16].

Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys ei ole vakio, vaan riippuu lämpötilasta ja huokosilman suhteellisesta kosteudesta. Ilman vesihöyrynläpäisevyys muuttuu lämpötilan ja ilmanpaineen funktiona [4].

Materiaalien vesihöyrynläpäisevyys voidaan ilmoittaa ns. diffuusionvastuskerroimen  $\mu$  avulla. Vesihöyryn diffuusionvastuskerroin kuvaa materiaalin vesihöyrynläpäisevyyttä suhteessa ilman vesihöyrynläpäisevyyteen (mittausolosuhteissa vallitsevassa ilmanpaineessa). Tarkemmin diffuusionvastuskerroimen laskentakaava esitetään myöhemmin luvussa 3.

Kun mitataan materiaalin diffuusionvastuskerrointa, mittaus pyritään suorittamaan kosteusolosuhteissa, joissa muut kosteudensiirtymismuodot ovat mahdollisimman vähäisiä. Kuten myöhemmin todetaan, kuivakuppikoe soveltuu tämän vuoksi diffuusionvastuskerroimen määrittämiseen märkäkuppikoetta paremmin.

## 2.4 Kalsiumsilikaatti materiaalina

Kalsiumsilikaatti on kemiallinen yhdiste ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ). Kalsiumsilikaatti on aineena valkoista jauhetta jota voidaan erottaa muun muassa kalkkikivestä tai piimaasta. Se on yksi yhdisteistä, joita voidaan tuottaa yhdistämällä kalsiumoksidin ja piidioksidia kemiallisesti [1]. Kalsiumsilikaatilla on monia rakennusfysikaalisia etuja. Kalsiumsilikaatin tiheys on pieni ja sen vedenimukyky on suuri. Se on hyvin lämpöä eristävää ja kosteutta siirtävää. Se on myös palamatonta sekä alkalinen ( $\text{pH} > 10$ ) materiaali.

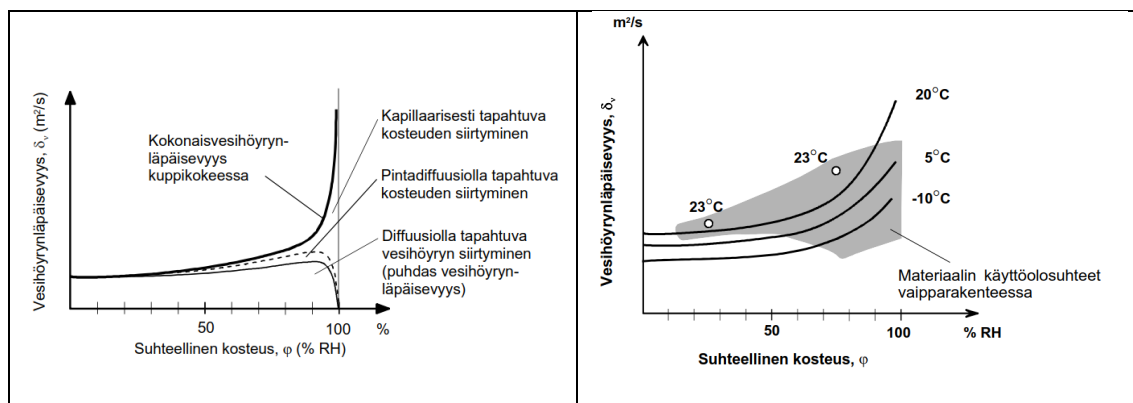
Kalsiumsilikaatin hyvien lämmöneristävyysominaisuuksien vuoksi sitä käytetään turvalisena vaihtoehtona asbestille. Kalsiumsilikaattilevyjä käytetään muun muassa palosuojausjauksessa silloin kun materiaalimenekki, ja siten korkea yksikkökustannus eivät ole merkittäviä tekijöitä. Tällainen kohde on esimerkiksi takkojen palosuojauslevy.

Koska kalsiumsilikaatti on alkalista, se estää tehokkaasti homeen kasvua. Kosteudensietokyvyn lisäksi kalsiumsilikaatilla on korkea kapillaarinen kosteudensiirtokyky. Kalsiumsilikaattirakenne siirtää kosteutta, jolloin rakenne pääsee kuivumaan. Näiden ominaisuuksiensa vuoksi mm. maanvastaisten seinien sisäpuolisessa eristämässä on Euroopassa hyviä kokemuksia kalsiumsilikaattilevyistä [12]. Myös TTY:llä osana Frame-hanketta tehdyissä laskentatarkasteluissa todettiin kalsiumsilikaattilevy toimivaksi kevytbetoniseinän sisäeristysmateriaaliksi. Levy vaikutti eristeen ja seinän välisiin kosteusolosuhteisiin, niin ettei homekasvulle otollisia olosuhteita syntynyt [17].

Materiaalina kalsiumsilikaatilla on pieni vesihöyrynvastus ja Sd -luku. Kuten seuraavassa luvussa todetaan, erityisesti korkeissa kosteuspitoisuuksissa kapillaarisesti siirtyvä kosteuden siirtyminen korostuu. Voi olettaa että kalsiumsilikaatilla kapillaarista siirtymistä tapahtuu jo matalammilla kosteuspitoisuuksilla.

### 3 KUPPIKOKEET

Kuppikokeilla tutkitaan materiaalien kosteudenläpäisevyyttä. Kuppikokeet mittaavat itseasiassa kappaleen kokonaiskosteudenläpäisevyyttä, eivät siis pelkästään vesihöyrynläpäisevyyttä (kuva 3.1.). Riippuu kosteusolosuhteista, kuinka suuri osa tästä voidaan arvioida olevan vesihöyrynä siirtyvää diffuusiota. Kuppikokeilla tulisi useimmiten valita sellainen kosteuspari jossa ei ole mukana kapillaarista kostedensiirtoa [11]. Erityisesti kuivakuppikoe on suunniteltu olosuhteisiin joissa ympäröivä suhteellinen kosteus ei nouse korkeaksi. Tavanomaisessa kuivakuppikokeen kosteusparissa ympäröivä suhteellinen kosteus on 50 % RH [2]. Tällöin suurin osa kostedensiirtymisestä on puhtaasti diffuusiolla tapahtuvaa vesihöyryn siirtymistä. Suuremmissa kosteuspitoisuuksissa kostedensiirtymistä tapahtuu yhä enemmän myös kapillaarisesti ja pintadiffuusiolla [2]. Tämän vuoksi kuivakuppikoe soveltuu märkäkuppikoetta paremmin diffuusiiovastuskertoimen määrittämiseen [4].



Kuva 3.1.a) Vesihöyrynläpäisevyys ja kostedensiirtymisen muodot kuppikokeessa eri suhteellisissa kosteuksissa. b) Vesihöyrynläpäisevyys eri lämpötiloissa ja suhteellisessa kosteudessa [4].

Erilaisille rakennusmateriaaleille on eri standardit, joiden mukaan kostedensiirtymisen tulee mitata. Tässä työssä kokeet suoritettiin Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) menetelmällä joka pohjautuu standardiin SFS-EN ISO 12572:2001.

#### 3.1 Standardi SFS-EN 12572:2001

Standardissa esitetään kaksi vaihtoehtoista tapaa toteuttaa kuppikoe. Nämä ovat märkäkuppikoe ja kuivakuppikoe. Märkäkuppikokeessa koekuppiin toteutetaan tunnettu suhteellinen kosteuspitoisuus, joka on suurempi kuin kupin ulkopuolella. Standardissa on

esitetty eri kosteuspareja (kuva 3.2). Kuivakuppikokeessa koekuppiin toteutetaan suhteellinen kosteus 0 % RH jollakin kuivatusaineella. Yleisesti käytetään silikageeliä. Standardissa esitetään kuivakuppikokeelle tyypilliseksi kosteuspariksi paria A, jossa kupin ulkopuolinen suhteellinen kosteus pidetään 50 % RH olosuhteissa ja 23 °C lämpötilassa.

Set	Condition °C - % RH	Temperature °C	Tolerances			
			Relative humidity <sup>a</sup>			
			Dry state		Wet state	
			Set point	Tolerance	Set point	Tolerance
A	23 - 0/50	23 ± 1	0	+5	50	±5
B	23 - 0/85	23 ± 1	0	+5	85	±5
C	23 - 50/93	23 ± 1	50	±5	93	±5
D	38 - 0/93	38 ± 1	0	+5	93	±3
E	23 - 50/100	23 ± 1	50	±5	100	

NOTE 1 "Dry cup" tests (condition A) give information about the performance of materials at low humidities when moisture transfer is dominated by vapour diffusion. "Wet cup" tests (condition C) give guidance about the performance of materials under high humidity conditions. At higher humidities, the material pores start to fill with water; this increases the transport of liquid water and reduces vapour transport. Tests in this area therefore give some information about liquid water transport within materials. This is discussed further in ISO 15148.

NOTE 2 Condition E is used for low resistance specimens ( $S_d \leq 0,1$  m).

<sup>a</sup> Saturated salt solutions, which regulate the relative humidity in the cup at some value less than 100 %, are used because, with many materials, there is a danger of condensation occurring on the underside of the sample, which disrupts the vapour flow. In the case of very low resistance materials with  $S_d < 0,1$  m, the vapour flow rates are so high that a) condensation is unlikely and b) the saturated salt solution might not remain in equilibrium for the duration of the rest. In this case, that distilled water should be used in the test cup. Further information about the use of saturated salt solutions is given in 9.6.

Kuva 3.2. Kuppikokeiden olosuhdeparit Standardin SFS-EN ISO 12572 taulukko 1 [2].

Aiheutuen kosteuserosta kupin sisä- ja ulkopuolen välillä, syntyy kosteusvirta. Märkäkuppikokeessa kosteusvirta on kupista ulospäin, kun taas kuivakuppikokeessa kosteusvirta on ulkoa kuppiin päin. Punnitsemalla koekuppia pystytään määrittämään koekupin massanmuutos ja siten myös kosteusvirta ajan funktiona.

### 3.1.1 Koekappaleiden valmistelu

Koekuppina käytetään yleisesti alumiini- tai lasiastiaa. Koekappale tulee mitoittaa siten, että se sopii kuppiin ja on helposti tiivistettävissä vahalla. Noin 3-5 mm rako koekappaleen ja kupin reunan välissä on sopiva. Tiivistyksessä käytetään muottia, jolla tuotetaan mahdollisimman toistettava ja tarkkarajainen avoin alue. Avoimen alueen tulisi olla vähintään 90 % pinta-alasta, jotta kosteusvirta on mahdollisimman pystysuoraan kappaleen läpi. Standardissa esitetään erilaisille materiaaleille sopivia tapoja toteuttaa ja varmistaa koekupin tiiveys. Myöhemmin koejärjestelyn yhteydessä on käsitelty tätä asiaa tarkemmin. Standardissa esitetään tiivistykseen sopivia materiaaleja ja yleisenä tiivistysaineena käytetään parafiinin ja steariinin yhdistelmää.

Koekappaletta tulee säilyttää tilassa, jossa suhteellista kosteutta ja lämpötilaa säädellään tarkasti vaihtelun ollessa kosteuden osalta korkeintaan  $\pm 5\%$  ja lämpötilan osalta  $\pm 1$  Kelviniä. Ilman tulisi kiertää  $0,02 - 0,3$  m/s. Standardissa mainitaan, että hyvin läpäiseville materiaaleille ilman kierto tulee varmistaa koekappaleen yläpuolella.

Koekappaleita tulisi olla viisi kappaletta, jos koekappaleen avoin pinta-ala on alle  $0,05$  m<sup>2</sup>. Muissa tapauksissa riittää kolme kappaletta. Koekappaleen ylä- ja alapinnassa avoimen alueen pinta-ala tulisi olla sama, eron ollessa homogeenisten materiaalien osalta korkeintaan 3 prosenttia ja muissa tapauksissa korkeintaan 10 prosenttia.

Ennen koetta koekappaleita tulee säilyttää riittävän pitkä aika  $23\text{ °C}$  ja  $50\%$  RH olosuhteissa tasaantumassa. Niitä tulee punnita päivittäin ja antaa tasaantua niin kauan että kolmena peräkkäisenä päivänä punnitustulosten keskinäinen ero on korkeintaan 5 prosenttia.

Koekappaleen paksuus tulee mitata  $0,2$  mm tarkkuudella. Jäykille kappaleille paksuus mitataan neljästä eri kohdasta tasavälein ja paksuus lasketaan näiden keskiarvona. Suolaliuosta tai kuivatusainetta tulee olla kupin pohjalla vähintään  $15$  mm kerros. Ilmatila koekappaleen ja suolaliuoksen/kuivatusaineen välillä tulisi olla  $15 \pm 5$  millimetriä. Ilmatilan korkeus tulisi mitata  $1$  mm tarkkuudella ilmatilan vesihöyrynläpäisevyyden ja -vastuksen laskemiseksi.

Standardissa esitetyt laskukaavat vesihöyrynläpäisevyyden laskemiseksi on esitelty tarkemmin seuraavassa 4. luvun laskentaosuudessa.

### 3.1.2 Märkä- ja kuivakuppikokeen eroavaisuudet

Vaikka märkä- ja kuivakuppikokeilla mitataan samaa asiaa eli massanmuutosta ajan funktiona, kosteusolosuhteet eroavat niin paljon, että tuloksia ei tule verrata suoraan keskenään [4].

Standardissa todetaan että alhaisen vastuksen omaavien kappaleiden, joilla  $S_d < 0,1$  m, testaaminen voi olla vaikeaa sekä märkä- että kuivakuppikokeella. Kosteusvirta kupista tai kuppiin voi olla niin suuri, että se vaikuttaa suolaliuoksen tai kuivatusaineen kykyyn luovuttaa tai sitoa kosteutta. Standardissa todetaan, että kuivakuppikoetta ei voida toteuttaa tällaiselle materiaalille. Tämä on ongelma, sillä kalsiumsilikaatin olennainen ominaisuus on alhainen vesihöyrynvastus. Standardissa esitetään että olosuhteet E, missä on  $50/100\%$  RH ja lämpötila  $23\text{ °C}$  tulisi käyttää alhaisen vastuksen omaaville materiaaleille ( $S_d < 0,1$  m). Kalsiumsilikaatin mitattu diffuusionvastuskerroin  $S_d$  on juuri  $0,1$  m ollen tällä rajalla.

Standardissa todetaan, että kuivakuppikoe antaa informaatiota materiaalien ominaisuuksista silloin kun ilman suhteellinen kosteus on alhainen ja kosteudensiirtyminen diffuusiolla on dominoiva suhteessa kosteudensiirtymiseen kapillaarisesti. Märkäkuppikoe soveltuu siis parhaiten olosuhteisiin, joissa on korkea suhteellinen kosteus kupin ulkopuolella (85–94 % RH), kun taas kuivakuppikoe standardissa esitetyille olosuhdeparille A 0/50 % RH.

Koekappaleita punnitaan kunnes viiden peräkkäisen punnituksen tulos on +/- 5 prosentin tarkkuudella vakio. Alhaisen kosteudenläpäisevyyden omaaville materiaaleille, joille  $\mu > 750\ 000$ ) riittää tarkkuus +/-10 prosenttia. Punnituksia jatketaan vielä tästä eteenpäin kunnes kupin massanmuutos ylittää sadalla prosentilla (100 %) näiden viiden hyväksytyin peräkkäisen punnituksen keskiarvon.

Koe lopetetaan ennenaikaisesti märkäkuppikokeessa, kun massanmuutos on puolet suolaliuoksen alkuperäisestä määrästä kupissa. Kuivakuppikoe lopetetaan kun koekappaleen painonmuutos on suurempi kuin 1,5 grammaa 25 millilitraa absorboivaa ainetta kohti. Hyvin läpäisevälle materiaalille tämä on olennainen raja, sillä kuivakuppikokeessa tämä raja saavutetaan jo ensimmäisten päivien aikana.

## 4 KOEJÄRJESTELY JA LASKENTA

### 4.1 Aiempien märkäkuppikokeiden toteutus

Aiemmin tehdyissä märkäkuppikokeissa tutkittavien materiaalien vesihöyrynläpäisevyys mitattiin 23 °C:n lämpötilassa yhdellä kosteusparilla. Kosteusolosuhdepariksi valittiin 23–50/93 standardin taulukosta 7.1 [2]. Kupin sisälle tehtiin 93 % RH kosteusolosuhteen muodostava suolaliuos (kaliumnitraatti KNO<sub>3</sub> 35 g/100 ml). Suolaliuos sekoitettiin suoraan muovilautaselle. Suolamäärä oli reilumpi kuin ohjeen mukainen annoskoko. Suolaliuoksen pinnan ja koekappaleen alapinnan väliin jätettiin 15 mm ilmarako [1]. Märkäkuppikokeessa kokeen kesto oli noin yksi kuukausi. Laskenta suoritettiin käyttäen samaa laskentapohjaa kuin tämän tutkimuksen kuivakuppikokeessa. Laskentapohja esitellään myöhemmin.

Tässä tutkimuksessa suoritettiin vastaavat kokeet kuivakuppikokeena.

### 4.2 Yleistä kokeesta

Kokeet suoritettiin Tampereen Teknillisen Yliopiston rakennushallin kosteushuoneessa, jossa oli 50 % RH ilman suhteellinen kosteus. Kokeet suoritettiin kahteen kertaan. Ensimmäisellä koekerralla noudatettiin samaa punnitusaikataulua kuin märkäkuppikokeessa eli kolme kertaa viikossa kuukauden ajan, joka johti kokeen epäonnistumiseen.

Kuppeihin laitettiin 200 millilitraa silikageeliä kuhunkin, joten standardin mukaisesti koe siis tuli lopettaa kun kappaleiden paino oli noussut 12 grammaa. Ensimmäisellä koekerralla havaittiin, että koekuppien painonnousu on luokkaa 0,3 grammaa tunnissa, jolloin odotettu kokeen kesto aika on noin 30 tuntia.

Kokeet tehtiin kolmelle kalsiumsilikaattilevy-tuotemerkille. Nämä olivat samat kuin märkäkuppikokeessa käytetyt: Kasil E, Promasil 1000 ja Epatherm.



Kuva 2.2. Kalsiumsilikaattilevyt [1]

Kasil E ja Epatherm –levyistä löytyy valmistajalta esite ominaisuuksista, joissa on annettu myös vesihöyryn diffuusionvastuskertoimelle  $\mu$  arvot. Kasil E:n esitteessä annetaan arvo  $\mu = 4,61$  ja ilmoitetaan käytetty standardi EN12086:1997–06 [6]. Epatherm – levyn osalta diffuusionvastuskertoimelle  $\mu$  annetaan arvo 3 [7]. Käytettyä menetelmää ei ole kerrottu. Valmistajan ilmoittamat arvot on myöhemmin lueteltu luvun 5. taulukoissa (taulukot 5.3-5.5).

### 4.3 Näytteet ja koekappien valmistaminen

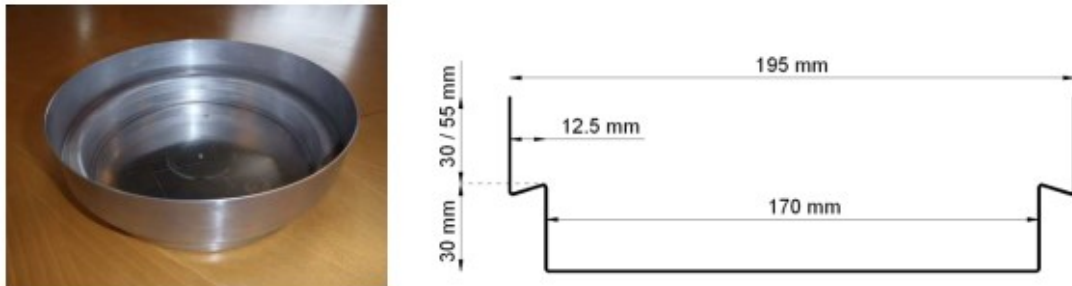
Kustakin levystä otettiin kolme käyttämätöntä näytettä kuivakuppikokeita varten. Kuten todettua kokeet jouduttiin uusimaan. Toisella koekerralla käytettiin samoja koekappaleita. Uusia kokeita varten koekappaleet purettiin irti koekupeista, ja vietiin välivarastoon kosteushuoneeseen, jossa niiden annettiin tasaantua.

Kokeessa käytettävä silikageeli oli valmistajan VWR Chemicals Chameleon 2-6mm rae-kokoa. Sen vedensitomiskyvyksi ilmoitetaan 23 °C lämpötilassa ja 50 % suhteellisessa ilmakeuudessa 23 %. Rakeet ovat kuivana tumman oransseja ja rakeet voidaan kuivata pitämällä niitä uunissa 120 – 140 °C lämpötilassa noin 3 tunnin ajan. Silikageeli kuivattiin



uunissa, jonka jälkeen se suljettiin muoviasiaan jäähtymään muutamaa päivää ennen koetta.

Koekappaleet valmistettiin alumiiniastioihin (kuva 3.1), joissa koekappale lepää kauluksen varassa. Vaha sulatettiin ja koekappaleen reunat sekä koeastian kaulus siveltiin vahalla. Koekappaleen reunoihin sivelty vaha estää vahan liiallista tunkeutumista koekappaleeseen. Kaulukseen siveltynä vaha estää sulan vahan valumista koekuppiin.



Kuva 3.1. Kokeessa käytetty koekuppi [11].

Silikageelin asettamisen jälkeen näyte asetettiin kaulukselle ja tiivistettiin koekappaleen reunat käyttäen muottina muoviasiaa. Käyttämällä samanlaista muoviasiaa sekä muottina, että koekupin pohjalla saatiin varmistettua, että kokeessa kosteusvirralle altis pinta-ala on sama kappaleen ylä- ja alapinnassa. Kukin koekappale siirrettiin kosteushuoneeseen ja punnittiin siellä heti kun se oli valmistettu.

#### 4.4 Mittauksien suorittaminen

Koe tehtiin siis kosteushuoneessa jossa koneellisesti ylläpidettiin koetta varten säädettyä kosteuspitoisuutta 50 % RH. Mittaukset suoritettiin kosteushuoneessa Precisa ES2220M vaa'alla.

Kuivakuppikokeessa punnitusaikataulu on huomattavasti märkäkuppikoetta nopeampi ja aikataulu riippuu enemmän tutkittavan materiaalin ominaisuuksista. Koekappaleita punnittiin heti valmistamisen jälkeen tunnin välein kuuden tunnin ajan. Ensimmäisten punnitusten perusteella arvioitiin, että 12 gramman painonnousu saavutettaisiin noin 60 tunnin kuluessa. Tämän perusteella laadittiin punnitusaikataulu siten, että punnituskertoja tuli 14 kertaa 60 tunnin aikana. Tuolloin painonnousu oli jo saavuttanut tai oli hyvin lähellä 12 gramman rajaa. Tämän jälkeen kappaleet punnittiin vielä kerran 120 tunnin kuluttua.

Tulokset merkittiin suoraan laskentapohjaan. Näin voitiin jo kokeen aikana seurata, vaikuttavatko tulokset järkeviltä oletuksiin nähden.

## 4.5 Laskenta

Koska tarkoitus oli vertailla kokeen tuloksia märkäkuppikokeiden tuloksiin, laskenta suoritettiin ohjeen mukaisesti TTY:n laskentapohjalla. Standardissa on kuitenkin annettu suoraviivaisemmat kaavat ja laskenta suoritettiin vertailun vuoksi myös niillä.

Laskentapohjassa lasketaan ensin vesihöyrypitoisuuksilla lasketut arvot vesihöyrynläpäisykerroinille  $W_v$ , vesihöyrynvastukselle  $Z_v$ , ja vesihöyrynläpäisevyydelle  $\delta_v$ . Näitä arvoja on käytetty osapaineiden kautta ilmoitettujen arvojen  $W_p$ ,  $Z_p$  ja  $\delta_p$  laskemiseen.

Standardissa vesihöyrynläpäisykerroin  $W_p$  lasketaan suoraan osapaineiden avulla. Standardissa on annettu suoraan myös arvot yleisille kosteuspareille. Myös vesihöyrynläpäisevyys  $\delta_p$  ja diffuusiovastuskerroin on laskettu suoraviivaisemmin.

### 4.5.1 Laskenta laskentapohjan kaavoilla

Laskentapohja on tehty märkäkuppikoetta varten, missä kosteusvirta on kupista ulospäin ja kappaleen paino siis laskee. Kuivakuppikoetta varten laskentapohjaan tehtiin muutoksia. Muutokset olivat lähinnä teknisiä, kuten etumerkkien vaihtamisia, jotta laskennan tulokset ovat oikein kun kosteusvirta on päinvastainen. Muutoksien jälkeen tarkistettiin myös märkäkuppikokeiden laskentatulokset, jotta varmistuttiin siitä että muutokset eivät vaikuttaneet tulosten suuruuteen. Tehdyt muutokset on esitetty liitteessä C.

Punnitustuloksista lasketaan ensin massanmuutos ( $\Delta m_{12}$ ). kaavalla

$$\Delta m_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

missä

$t_1$  ja  $t_2$  ovat peräkkäisten punnituskertojen ajanhetkiä kokeen alusta [s]

$m_1$  ja  $m_2$  ovat näissä punnituksissa saatuja punnitustuloksia [kg]

Edelleen lasketaan liukuva keskiarvo  $G$  vähintään viiden peräkkäisen punnitusvälin massanmuutoksista. Lopullinen arvo  $G$  saadaan, kun kunkin viiden perättäisen punnituksen massanmuutos eroaa niiden keskinäisestä keskiarvosta  $G$  korkeintaan  $\pm 5\%$ . Kosteusvir-

ran tiheys eli massavirta saadaan laskettua kaavalla (3). Kaavassa on lisätty itseisarvo-merkit, jolloin samaa laskentapohjaa voi käyttää sekä märkäkuppi- että kuivakuppiko-keelle. Massavirran suunta on tiedossa, joten etumerkkiä ei tarvita.

$$g = \left| \frac{G}{A} \right| \quad (3)$$

missä

$A$  on koekappaleen avoin pinta-ala (muuttina käytetyn lautasen pohjan pinta-ala) [ $m^2$ ]

Kokeessa, jossa koekuppien reunat on sinetöity vahalla, lasketaan korjattu kosteusvirran tiheys ( $g_k$ ) kaavalla 4. Tällä kaavalla pyritään ottamaan huomioon kosteusvirta, joka kulkeutuu vahalla peitetyn reuna-alueen kautta. Tämä tulisi ottaa erityisesti paksuilla kappaleilla huomioon.

$$g_k = \frac{g}{\left(1 + \frac{4d}{\pi S} \ln\left(\frac{2}{1 + \exp(-2 \cdot \pi \cdot \frac{b}{d})}\right)\right)} \quad (4)$$

missä

$d$  on koekappaleen paksuus [m]

$b$  on peitetyn reunan leveys [m]

$S$  on avoimen alueen läpimitta [m]

Vesihöyrynläpäisykerroin  $W_v$ , vesihöyrypitoisuuksien avulla ilmaistuna, lasketaan kaavalla

$$W_v = \frac{g_k}{A \cdot \Delta v_{koekappale}} \quad (5)$$

missä

$\Delta v_{koekappale}$  on vesihöyrypitoisuusero koekappaleen eri puolilla [ $kg/m^2$ ]

Vesihöyrypitoisuusero lasketaan kaavalla

$$\Delta v_{koekappale} = \frac{\Delta \varphi_{koekappale}}{v_{sat}} \quad (6)$$

missä

$\Delta\varphi_{koekappale}$  on suhteellisen kosteuden muutos kappaleen läpi [%]

$v_{sat}$  on ilman kyllästyskosteuspitoisuus [ $kg/m^2$ ]

Edelleen suhteellisen kosteuden muutos kappaleessa lasketaan erotuksena

$$\Delta\varphi_{koekappale} = |\varphi_{huone} - \varphi_{kuppi}| - \varphi_{ilmatila} \quad (7)$$

missä

$\varphi_{huone}$  on kosteushuoneen suhteellinen kosteus RH [%]

$\varphi_{kuppi}$  on koekupissa oleva suhteellinen kosteus RH [%]

$\Delta\varphi_{ilmatila}$  on suhteellinen ilmankosteuden muutos silikageelin ja koekappaleen alapinnan välillä

Koekupin ilmatilan suhteellinen kosteus saadaan laskettua kaavalla

$$\Delta\varphi_{ilmatila} = \frac{\Delta v_{ilmatila}}{v_{sat}} \quad (8)$$

Koekupin ilmatilan vesihöyrypitoisuuden muutos ( $\Delta v_{ilmatila}$ ) saadaan laskettua kaavalla

$$\Delta v_{ilmatila} = \frac{\Delta p_{ilmatila} \cdot R \cdot M_w}{273,15 + T} \quad (9)$$

missä

R on yleinen kaasuvakio

$M_w$  on veden moolimassa

ja edelleen  $\Delta p_{ilmatila}$  eli osapaine koekupin ilmatilassa saadaan laskettua kaavalla

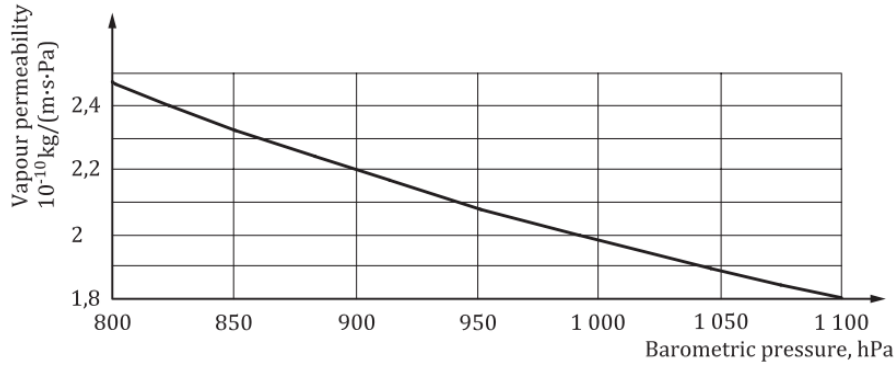
$$\Delta p_{ilmatila} = \frac{g_k \cdot d_a}{\delta_a} \quad (10)$$

missä

$d_a$  on koekupin ilmatilan korkeus [m]

$\delta_a$  on ilman vesihöyrynläpäisevyys

Ilman vesihöyrynläpäisevyys saadaan taulukosta (1.1)



Taulukko 3.1. Ilman vesihöyrynläpäisevyys ilmanpaineen funktiona 23°C lämpötilassa [2]

Tämän jälkeen lasketaan vesihöyrynläpäisykerroin osa-paineiden avulla ilmaistuna kaavalla

$$W_p = \frac{W_v}{\frac{R}{M_w} \cdot (273,15 + T_{huone})} \quad (11)$$

Vesihöyrynvastukset lasketaan vastaavien vesihöyrynläpäisykertoimien vastalukuna

$$Z = \frac{1}{W} \quad (12)$$

Vesihöyrynläpäisevyydet lasketaan kaavalla

$$\delta = W \cdot d \quad (13)$$

Diffuusiovastuskerroin lasketaan kaavalla

$$\mu = \frac{\delta_p}{\delta_a} \quad (14)$$

missä

$\delta_p$  on vesihöyrynläpäisevyys osapaineiden avulla ilmaistuna

$\delta_a$  on ilman vesihöyrynläpäisevyys

### 4.5.2 Laskenta standardin kaavoilla

Standardissa lasketaan suoraan vesihöyrynläpäisykerroin  $W_p$  osapaineiden avulla. Normaalisissa tapauksessa tämä lasketaan kaavalla

$$W_p = \frac{G}{A\Delta p} \quad (15)$$

Hyvin läpäiseville materiaaleille joille ( $S_d < 0,2m$ ), otetaan huomioon kupin ilmatila

$$W_p = \frac{1}{\frac{A\Delta p_v}{G} \frac{d_a}{\delta_a}} \quad (16)$$

missä

$\Delta p_v$  on vesihöyrynläpäisykerroin ero koekappaleen eri puolilla

Paine-ero voidaan laskea kaavalla (16).

$$\Delta p_v = 610,15 \left( \frac{\varphi_{huone}}{100} \cdot e^{\frac{17,269 \cdot T_{huone}}{273,15 + T_{huone}}} - \frac{\varphi_{kuppi}}{100} \cdot e^{\frac{17,269 \cdot T_{kuppi}}{273,15 + T_{kuppi}}} \right) \quad (16)$$

Standardissa on myös taulukoitu (taulukko 3.2) arvot yleisille kosteuspareille.

Tapaus	olosuhteet [°C – % RH]	paine-ero $\Delta p$ [Pa]
A	23 - 0/50	1404
B	23 - 0/85	2387
C	23 - 50/93	1207
D	38 - 0/93	6157
E	23 - 50/100	1404

Taulukko 3.2: paine-ero yleisillä kosteuspareilla [2]

Massavirran  $g = \frac{G}{A}$  avulla ilmaistuna vesihöyrynläpäisykerroimen kaava (16) tulee muotoon

$$W_p = \frac{1}{\frac{\Delta p_v}{g} \frac{d_a}{\delta_a}} \quad (17)$$

Vesihöyrynvastus lasketaan aiemmin esitetyllä kaavalla (12) vesihöyrynläpäisykerroimen vastalukuna. Vesihöyrynläpäisevyys lasketaan vastaavasti kaavalla (13). Diffuusio-  
vastuskerroin on laskettu vastaavasti kuin jo aiemmin esitetyssä kaavassa (14).

## 5 TULOKSET JA VERTAILU

### 5.1 Koekappaleiden käsittely ja yleisesti kokeesta

Kuivakuppinäytteen valmistus ja käsittely on huomattavasti helpompaa, kuin märkäkuppikokeessa. Koekappaletta käsitellään toistuvasti punnituksissa ja säilytetään kosteushuoneessa, missä tehdään samanaikaisesti muita kokeita. Tällöin riski koekappaleen tärvelymiselle on huomattavasti pienempi, koska kupissa ei ole suolaliuosta joka voisi läikkyessään koskettaa näytemateriaalia.

Kuivakuppikoe on myös huomattavasti märkäkuppikoetta nopeampi kokeen ollessa ohi muutamassa päivässä. Toisaalta näiden päivien aikana punnituksille on varattava aikaa enemmän kuin märkäkuppikokeessa jossa koekappaletta käydään punnitsemassa noin kolme kertaa viikossa

### 5.2 Kokeiden eteneminen

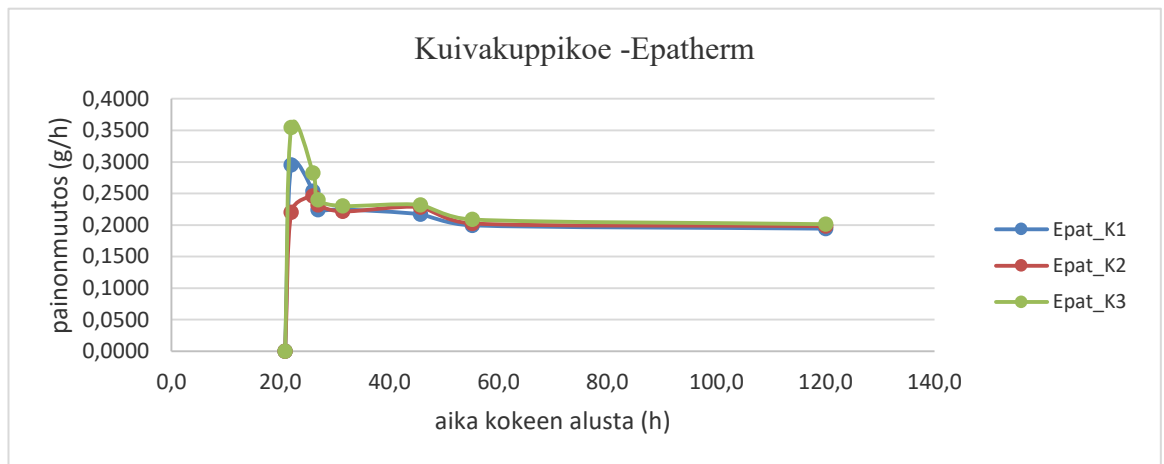
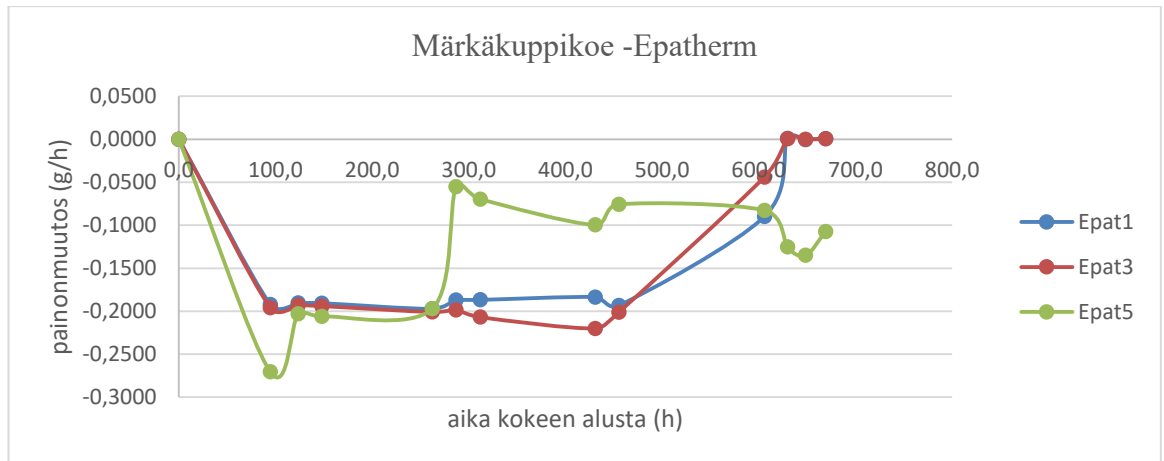
Taulukoissa 4.1–4.3 on esitetty pareina painonmuutoksen nopeus ajan funktiona märkä- ja kuivakuppikokeissa. Märkäkuppikokeiden kaaviot ja laskentatulokset on otettu Vainion laskenta-aineistosta [1].

Märkäkuppikokeissa on havaittavissa selkeä jakso jolloin kosteusvirta on ollut tasaista asettuen luokkaan 0,2 grammaa tunnissa. Tämän jälkeen massanmuutos tasaantuu ja pienenee kohti nollaa. Muiden näytteiden muutos on odotusten mukaista, mutta Epatherm-kokeiden osalta on havaittavissa poikkeama, ja sen kohdalla voi epäillä, että näytteelle Epatherm5 on tapahtunut jotain kokeen aikana.

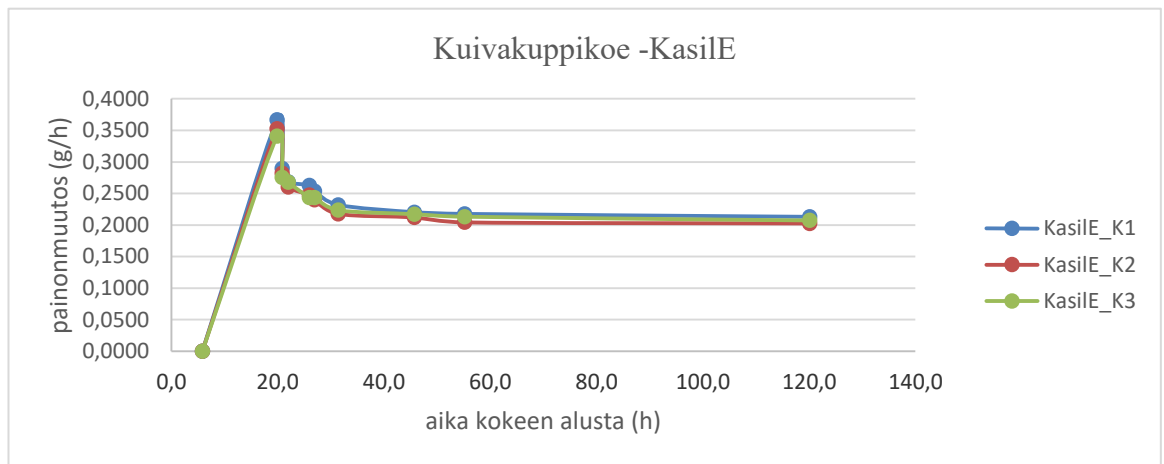
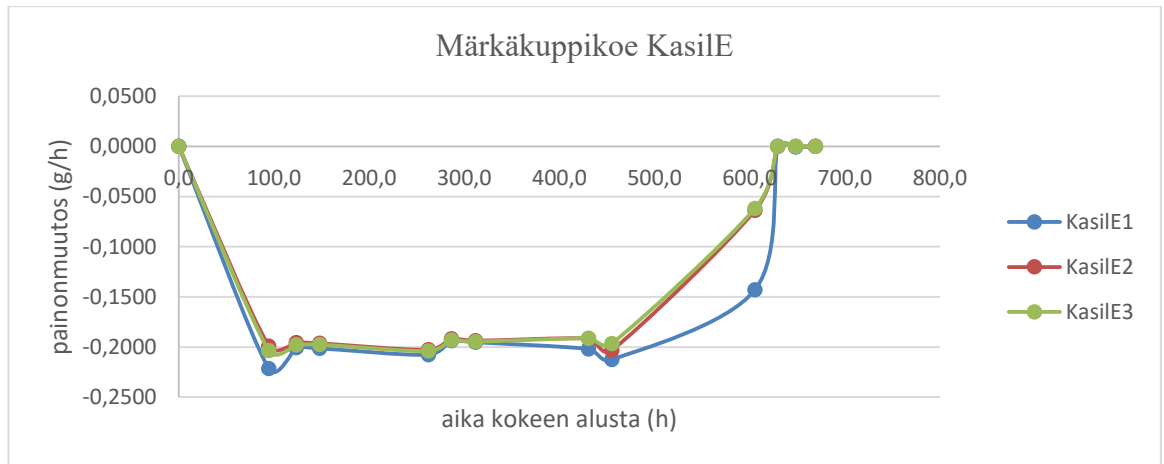
Kuivakuppikokeissa on havaittavissa n. 30–120 tunnin kuluttua kokeen alusta tasainen jakso, jossa massanmuutos on samaa luokkaa kuin märkäkuppikokeissa. Kuivakuppikokeessa koekappaleiden välillä ei ole suurta eroa, vaan massanmuutokset eri näytteiden välillä ovat hyvin lähellä toisiaan.

Liitteessä C on esitetty ensimmäisen koekerran vastaavat taulukot. Ensimmäisen koekerran tuloksissa on nähtävissä että tasaantumisen jälkeen on terävä huippu jonka jälkeen massanmuutos ja muutosnopeus alkavat tasaantua.

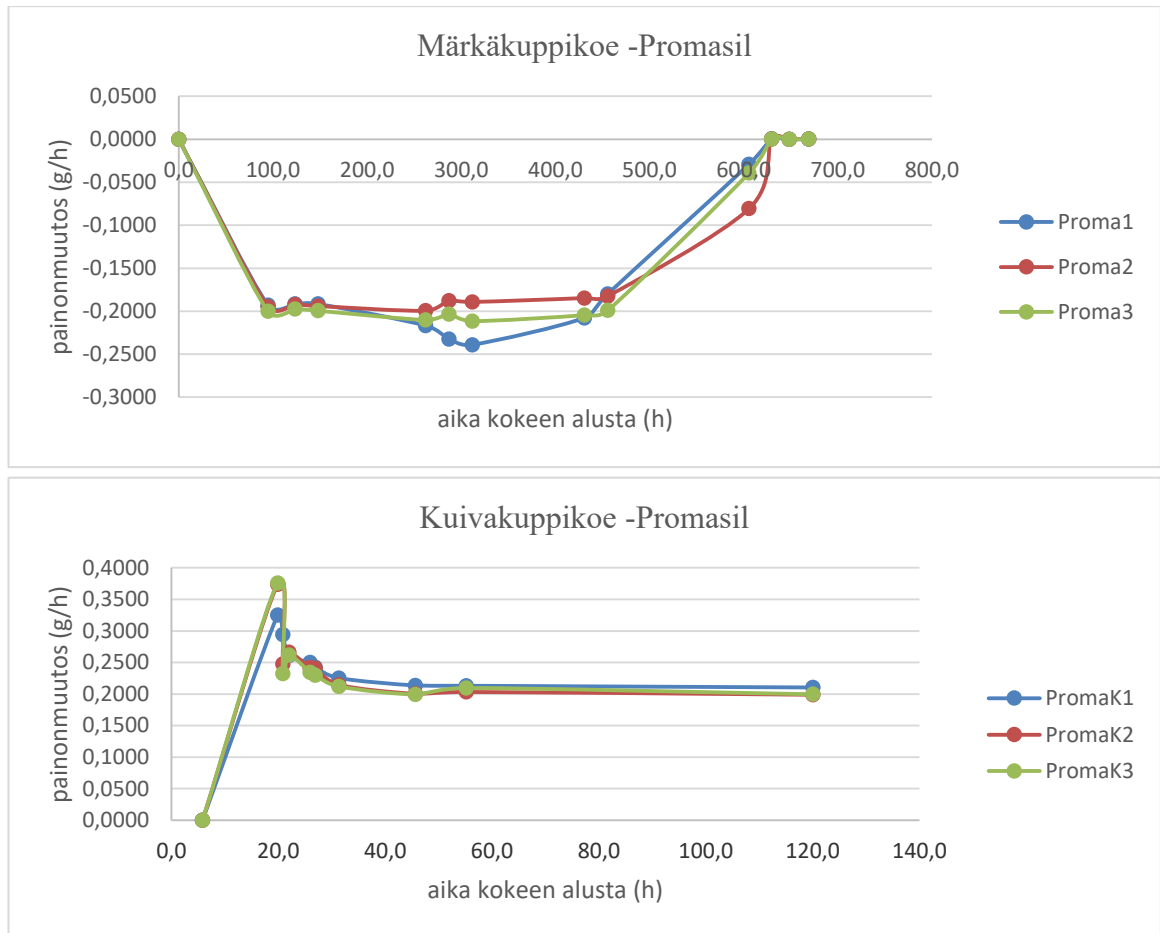




Taulukko 4.1: Märkä- ja kuivakuppikokeiden eteneminen. Epatherm



Taulukko 4.2: Märkä- ja kuivakuppikokeiden eteneminen Kasil E



Taulukko 4.3 Märkä- ja kuivakuppikokeiden eteneminen Promasil

### 5.3 Laskennan tulosten vertailu

Taulukoihin 4.4–4.6 on koottu yhteen märkä- ja kuivakuppikokeiden laskennasta saadut tulokset. Märkäkuppikokeen osalta tulokset on otettu suoraan Vainion laskenta-aineistosta. Tuloksista näkyy, että kuivakuppikokeella saaduissa tuloksissa on eroa märkäkuppikokeissa saatuihin tuloksiin.

Korjattujen massavirtojen osalta kuivakuppikokeissa massavirta on luokka  $0,2 \text{ kg/m}^2\text{s}$  suurempi. Epatherm-koekappaleiden osalta eroa on  $0,03 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . Vesihöyryläpäisykertoimien osalta kuivakuppikokeissa saadut luvut ovat pienempiä. Tällöin vesihöyrynvastus, joka on edellisen vastaluku, on vastaavasti suurempi.

Vesihöyrynläpäisevyysarvojen  $\delta_v$  ja  $\delta_p$  arvot ovat lähellä toisiaan. Märkäkuppikokeen arvot ovat hieman suurempia. Tämä oli odotettavissa, sillä märkäkuppikokeen olosuhteiden suuremmassa suhteellisessa kosteudessa vesihöyrynläpäisevyys tyypillisesti kasvaa.

Diffuusiovastuskerroin on kuitenkin hyvin lähellä märkäkuppikokeen vastaavaa arvoa. Varsinkin Kasil E - ja Promasil – koekappaleilla eroa on 0,7-0,22 yksikköä. Epatherm osalta kuivakuppikokeen arvo on kauempana valmistajan ilmoittamasta arvosta, kun taas KasilE osalta kuivakuppikokeen arvo on valmistajan ilmoittamaa arvoa lähempänä.

Epatherm					
		Märkä- kuppikoe	Kuiva- kuppikoe	Kuiva- kuppikoe (lyhyem- mät kaa- vat)	viitearvo (*)RIL 255- 1-2014 (**) valmistajan ilmoittama
Paksuus	mm	29.7	30.0	30.0	
Massavirta g	kg/m <sup>2</sup> s	2.34E-06	2.31E-06	2.31E-06	
Korjattu massavirta g <sub>k</sub>	kg/m <sup>2</sup> s	2.15E-06	2.12E-06	2.12E-06	
Vesihöyrynläpäisykerroin W <sub>v</sub>	m/s	2.85E-04	2.36E-04		
Vesihöyrynläpäisykerroin W <sub>p</sub>	kg/m <sup>2</sup> sPa	2.09E-09	1.73E-09	1.70E-09	
Vesihöyrynvastus Z <sub>v</sub>	s/m	3.51E+0 3	4.23E+0 3		
Vesihöyrynvastus Z <sub>p</sub>	m <sup>2</sup> sPa/kg	4.79E+0 8	5.78E+0 8	5.89E+0 8	
Vesihöyrynläpäisevyys δ <sub>v</sub>	m <sup>2</sup> /s	8.46E-06	7.09E-06		5- 6(E-06)
Vesihöyrynläpäisevyys δ <sub>p</sub>	kg/msPa	6.19E-11	5.19E-11	5.09E-11	3.7-4.4 (E- 11)
Vesihöyrynläpäisevyys kerroin μ	-	3.20	3.82	3.89	3**
Diffuusiovastuskerroin Sd	m	0.09	0.11	0.12	

Taulukko 4.4 Laskennan tulokset ja vertailu. Epatherm

KasilE					
		Märkä- kuppikoe	Kuiva- kuppikoe	Kuiva- kuppikoe (standar- din lyhy- emmät kaavat)	viitearvo *)RIL 255- 1-2014 **) valmistajan ilmoittama
Paksuus	mm	25.6	25.6	25.6	
Massavirta g	kg/m <sup>2</sup> s	2.35E-06	2.52E-06	2.52E-06	
Korjattu massavirta g <sub>k</sub>	kg/m <sup>2</sup> s	2.17E-06	2.36E-06	2.36E-06	
Vesihöyrynläpäisykerroin W <sub>v</sub>	m/s	2.80E-04	2.67E-04		
Vesihöyrynläpäisykerroin W <sub>p</sub>	kg/m <sup>2</sup> sPa a	2.05E-09	1.96E-09	1.93E-09	
Vesihöyrynvastus Z <sub>v</sub>	s/m	3.57E+0 3	3.75E+0 3		
Vesihöyrynvastus Z <sub>p</sub>	m <sup>2</sup> sPa/k g	4.87E+0 8	5.12E+0 8	5.20E+0 8	
Vesihöyrynläpäisevyys δ <sub>v</sub>	m <sup>2</sup> /s	7.19E-06	6.81E-06		5- 6(E-06)*
Vesihöyrynläpäisevyys δ <sub>p</sub>	kg/msPa	5.26E-11	4.99E-11	4.91E-11	3.7-4.4 (E-11)*
Vesihöyrynläpäisevyys kerroin μ	-	3.76	3.98	4.04	4.61**
Diffuusiovastuskerroin S <sub>d</sub>	m	0.10	0.10	0.10	

Taulukko 4.5 Laskennan tulokset ja vertailu. Kasil E

Promasil					
		Märkä- kuppikoe	Kuiva- kuppikoe	Kuiva- kuppikoe (lyhyem- mät kaa- vat)	viitearvo (*)RIL 255- 1-2014 (**) valmistajan ilmoittama
Paksuus	mm	24.9	25.4	25.4	
Massavirta g	kg/m <sup>2</sup> s	2.33E-06	2.51E-06	2.51E-06	
Korjattu massavirta g <sub>k</sub>	kg/m <sup>2</sup> s	2.15E-06	2.38E-06	2.38E-06	
Vesihöyrynläpäisykerroin W <sub>v</sub>	m/s	2.78E-04	2.69E-04		
Vesihöyrynläpäisykerroin W <sub>p</sub>	kg/m <sup>2</sup> sPa	2.04E-09	1.97E-09	1.94E-09	
Vesihöyrynvastus Z <sub>v</sub>	s/m	3.60E+0 3	3.72E+0 3		
Vesihöyrynvastus Z <sub>p</sub>	m <sup>2</sup> sPa/kg	4.91E+0 8	5.07E+0 8	5.15E+0 8	
Vesihöyrynläpäisevyys δ <sub>v</sub>	m <sup>2</sup> /s	6.94E-06	6.82E-06		5- 6(E-06)*
Vesihöyrynläpäisevyys δ <sub>p</sub>	kg/msPa	5.08E-11	5.00E-11	4.92E-11	3.7-4.4 (E- 11)*
Vesihöyrynläpäisevyyskerroin μ	-	3.90	3.97	4.03	
Diffuusiovastuskerroin S <sub>d</sub>	m	0.10	0.10	0.10	

Taulukko 4.6. Laskennan tulokset ja vertailu. Promasil

Molemmissa kokeissa arvot ovat suuremmat kuin kirjallisuuden vertailuarvot [3]. Kuiva-kuppikokeessa saadut arvot ovat lähempänä kirjallisuuden viitearvoja, kuin märkäkuppikokeen tulokset. Joten tältäkin osin koetta voi pitää onnistuneena. Vainio esittää märkäkuppikokeen eroavaisuuksien johtuvan todennäköisesti siitä, että mitatuissa arvoissa on mukana kapillaarisesti siirtyvää kosteutta [1]. Kuivakuppikokeessa suhteellinen kosteus on kuitenkin pienempi, eikä kokeessa käytetä nestemäistä liuosta. Tällöin kapillaarista kosteudensiirtymistä ei tapahdu.

Laskenta tehtiin myös osapaineiden avulla ilmoitetuilla arvoilla standardissa esitetyillä kaavoilla, jolloin laskenta on huomattavasti suoraviivaisempi. Saadut arvot ovat tällä laskennalla hyvin lähellä samoja arvoja kuin laskentapohjan kaavoilla, pyöristettynä käytännössä samoja. Erot selittyvät käytetyillä likiarvoilla ja mittaustarkkuudella. Esimerkiksi jo pelkästään 0,25 lämpöasteen ero kaavassa 11 vaikuttaa niin, että tulos eri laskentakaavoilla on sama. Standardin antama toleranssi mitattavalle lämpötilalle on +/- 1 astetta, joten arvot ovat toleranssin sisällä.

Vastaavasti kaavalla 16 laskiessa, jos kupin ilmatila onkin 1,5 mm enemmän kuin arvioitu 15 mm, eli 16,5 mm, niin arvot eri laskentakaavoilla ovat samat. Vastaavasti kaavassa 16 on käytetty standardin taulukoitua arvoa 1404 Pa paine-erolle kosteusparilla 0/50. Jos todellinen paine-ero on 1390 Pa eli 14 Pa pienempi, arvot eri laskentatapojen välillä ovat samat.

Erot valmistajien ilmoittamiin viitearvoihin ovat myös pieniä. Esimerkiksi 1,5 mm ero kappaleen mitatun ja todellisen paksuuden välillä, sekä 1 mm heitto kupin ilmatilan korkeuden mitatun ja todellisen arvon välillä pienentää vesihöyrynläpäisevyyden arvon samaksi kuin lähteen RIL 255-1-2014 viitearvo. Standardissa todetaan että koekappaleen paksuus tulee mitata 0,2 mm tarkkuudella ja ilmatila koekappaleen ja suolaliuoksen/kuivatusaineen välillä tulisi olla 15 +/- 5 millimetriä. Standardi siis antaa ilmatilankin suhteen enemmän toleranssia kuin 1 mm heitto. Kokeen tulosten voikin todeta olevan virhemarginaalin sisällä.

## 6 YHTEENVETO

Kuivakuppikoe on nopeampi ja helpompi suorittaa kuin märkäkuppikoe, joten se on houkutteleva vaihtoehto. Koska lähtökohtana oli vertailla tuloksia, tavoitteena oli toteuttaa kokeet mahdollisimman pitkälti samalla tavalla. Tämä johti myös virheisiin, joista tuli lisätietoa kokeiden eroavaisuuksista ja muutama korjaus laskentapohjaankin.

Standardissa todetaan, että kuppikoe on vaikea suorittaa hyvin kosteutta läpäisevälle materiaalille ( $S_d < 0,1m$ ). Kalsiumsilikaatti on tällainen materiaali. Kuppikokeiden soveltuvuuden vertailuun voisi tämän vuoksi sopia jokin toinen hitaammin kosteutta läpäisevä materiaali.

Koe tehtiin käyttäen TTY:n toteutusohjetta ja laskentapohjaa. Toteutusohje on tehty märkäkuppikokeelle. Kuivakuppikoe eroaa punnitusten aikataulutuksen osalta huomattavasti märkäkuppikokeesta. Tämän vuoksi ensimmäisellä koekerralla tapahtui virhe siinä, että punnituksia suoritettiin samalla aikataululla kuin märkäkuppikokeessa eli kolme kertaa viikossa. Tässä ajassa hyvin läpäisevälle materiaalille silikageeli oli jo ehtinyt imeä itseensä kosteutta standardin määrittämän 1,5 grammaa per 25 millilitraa silikageeliä. Näin tuli käytännössä todettua, kuinka paljon kuiva- ja märkäkuppikokeet eroavat toisistaan. Toinen olennainen virhe oli se, että punnitusten tuloksia ei kirjattu laskentapohjaan jo kokeen aikana vaan vasta lopuksi. Jos näin olisi toimittu, jo kokeen alkuvaiheessa olisi ollut havaittavissa, että painonmuutos aikayksikköä kohti ei tasaannu.

Toisella koekerralla itse punnitukset onnistuivat kohtuullisen hyvin ja tuloksena oli odotustenmukainen tasainen massanmuutos ajan funktiona. Laskentapohjan korjausten jälkeen myös laskenta antoi samanlaisia tuloksia kuin märkäkuppikokein. Eroavaisuudet märkäkuppikokeeseen selittyvät pitkälti eri kosteusolosuhteilla.

Tulokset eivät myöskään eroa merkittävästi kirjallisuuden viitearvoista. Tulokset ovat niin lähellä myös märkäkuppikokeiden tuloksia, että eroavaisuudet voivat selittyä olosuhde-eroilla koetilanteissa. Eroja selittävät jo eroavaisuudet koekappaleiden paksuudessa sekä ilmatilan korkeuden mahdollinen epätasaisuus. Syyt eroavaisuuksiin voivat mittaasepätkäkkyydet, jotka edelleen ovat standardin hyväksymissä rajoissa. Osasyynä eroihin voi olla myös painonmuutoksen nopeus hyvin kosteutta läpäisevällä materiaalilla, joka aiheuttanee suurempaa varianssia tuloksiin.

Jotta saadaan lisävarmuutta kuivakuppikokeen soveltuvuudesta, kokeet voisi toistaa toisenseläiselle suuremman kosteusvastuksen omaavalle materiaalille siten, että samaan aikaan toteutetaan märkäkuppi- ja kuivakuppikoe samanaikaisesti. Vertailun vuoksi kokeen voisi suorittaa myös koekupille jossa ei ole koekappaleita lainkaan, vaan avoimen pinta-alan kokoinen aukko vahassa ja suoraan silikageeliä. Tällaisella koekappaleella saataisiin



vertailutulos, kuinka nopeasti silikageeli absorboi kosteutta suoraan ilmasta kyseisissä olosuhteissa.

Lopputuloksena saatiin vertailukelpoiset arvot märkäkuppikokeisiin nähden ja tämän puolesta tuloksia voi pitää onnistuneina. Lisätuloksena kokeesta saatiin tarkennuksia ja toteutusohje kuivakuppikokeelle sekä korjauksia TTY:n laskentapohjaan. Nämä on esitetty liitteissä.

# LÄHTEET

- [1] Vainio, Maarit, Kalsiumsilikaattilevyjen ja ontelolaattojen rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet, Diplomityö, Tampereen Teknillinen Yliopisto, 2016
- [2] SFS-EN ISO 12572:2001 Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water vapour transmission properties. Brussels, European Committee for Standardization
- [3] RIL 255-1-2014. Rakennusfysiikka 1. Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. 2014.
- [4] Vinha, Juha. Rakennusfysiikka luentomoniste. 2011.
- [5] Ilmatieteen Laitos. <http://ilmatieteenlaitos.fi/lampotila-ja-kosteus#5>. Viitattu 3.11.2019
- [6] Kasil E -levyn ominaisuudet.  
<http://www.kasil.fi/images/tiedostot/E-Levy/Kasil%20E-Levy%20ominaisuudet.pdf>
- [7] Epatherm – levyn ominaisuudet  
[http://www.procoatpaints.fi/media/EPATHERM\\_-\\_ESITE\\_3.pdf](http://www.procoatpaints.fi/media/EPATHERM_-_ESITE_3.pdf). Viitattu 3.11.2019
- [8] Tuotetiedot VWR Chemicals, Silica gel granules, Chameleon 2-6mm  
<https://uk.vwr.com/store/product/4786498/silica-gel-granules-chameleon-c-2-6-mm-drying-agent-in-sachets>. Viitattu 3.11.2019
- [9] Manelius, Elina. Rakennusmateriaalien vesihöyrynläpäisevyyskokeiden kehittäminen. Diplomityö, Tampereen Teknillinen Yliopisto. 2013
- [10] Gorse, Christopher et al. A Dictionary of Construction, Surveying and Civil Engineering. Oxford University Press.2012
- [11] Tampereen Teknillinen Yliopisto. Rakennusfysiikan tutkimusryhmän toteutusohje. Vesihöyrynläpäisevyyskoe. 15.12.2016.
- [12] Häupl, Peter et al. Interior Retrofit of Masonry Wall to Reduce Energy and Eliminate Moisture Damage: Comparison of Modeling and Field Performance. ASHRAE. 2004.
- [13] ASTM E96. Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. 2016.
- [14] <https://www.labthinkinternational.com/literatures/discuss-desiccant-method-and-water-method-from-development-trend-of-wate-permeability-test.html>. Viitattu 2.11.2019
- [15] VTT MIKES. Mittayksiköt. Lämpötila ja kosteus.  
<https://www.mikes.fi/mittayksik%C3%B6t/l%C3%A4mp%C3%B6tila-ja-kosteus>. Viitattu 3.11.2019
- [16] Vinha et al. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Tampereen teknillinen yliopisto. Tutkimusraportti 129. 2005

[17] Vinha et al. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen yliopisto. Tutkimusraportti 159. 2013 [https://tem.fi/documents/1410877/2735615/vinha\\_ilmastonmuutoksen\\_ja\\_lammoneristyksen\\_lisayksen\\_vaikutukset.pdf](https://tem.fi/documents/1410877/2735615/vinha_ilmastonmuutoksen_ja_lammoneristyksen_lisayksen_vaikutukset.pdf)

## LIITE A: KÄYTÄNNÖN TOTEUTUSOHJEITA KUIVAKUPPIKOEKELLE

### Esivalmistelut

- Mittaa koekappaleiden paksuus toteutusohjeen mukaisesti. Vie koekappaleet kosteushuoneeseen tasaantumaan. Kun ne ovat tasaantuneet, punnitse koekappaleet ja merkitse ylös tiedot suoraan laskentapohjaan.
- Kuiva silikageeli on tumman oranssia. Kuivaa tarvittaessa silikageeli pellillä uunissa, n. 3 tuntia. Sulje kuivattu silikageeli tiiviisti muoviasiaan ja käytä mieluiten muutaman päivän aikana.
- Koeastiaan kannattaa mitata silikageeli millilitroina. Varaa tätä varten tilavuudeltaan sopiva mittakuppi. TTY:llä käytettävälle aluslautaselle sopii noin 200 millilitraa. *(Kuiva-aineen mittausta tilavuuden mukaan helpottaa laskentaa. Koe lopetetaan kun painonnousu ylittää 1,5 grammaa per 25 millilitraa, joten edellä mainitulla määrällä koe lopetetaan kun painonnousu ylittää 12 grammaa)*

### Koekuppien valmistukseen ohjeita

- Vahaa kannattaa sulattaa uunissa isompi määrä (alumiinivuoka) kerralla. Tämä on siistimpää ja helpompaa kuin sulattaa vaha kattilassa.
- Kaada nokallinen kaatoastia täyteen ja jätä se jäähtymään pöydälle. Kun vaha on sopivan jäähtynyttä, se muuttuu sameaksi.
- Valmistele kerralla sarja koekappaleita, vahaa astiat valmiiksi ja aseta aluskupit, mittaa silikageeli kuppeihin ja aseta koekappale astiaan kaulukselle painaen se siveltyyn vahaan. Näin estyy vahan valuminen kuppiin sinetöidessä astiaa.
- Tässä vaiheessa vaha on jo varmastikin sopivasti jäähtynyt. Kaada sopivasti jäähtynyt vaha koekuppeihin käyttäen aluslautasta muottina. Paina aluslautasta koekappaletta vasten ja ole huolellinen että koekappale peittää kynnyksen. Annostele vahaa tasaisesti koekuppeihin. Koekuppeja ei tule täyttää kerralla vaan mieluiten 2-3 täyttökerralla jotta ilmakuplat ehtivät poistua ja vahakerroksesta tulee tiiviimpi. Tämä estää myös vahan halkeilua.
- Kaada uusi annos kattilasta jäähtymään kaatoastiaan.
- Kun kaadat viimeistä kerrosta joka ylittää koekappaleen reunat, varmista että vaha on riittävän jäähtynyttä, jotta vaha ei mene alusvadin alle.
- Vie kappaleet kosteushuoneeseen ja punnitse ne ensimmäistä kertaa. Tasaantumiseen menee muutama tunti, joten tässä vaiheessa voi pitää tauon.

### Koekuppien punnitseminen

- Koekupit asetetaan kosteushuoneeseen ja punnitaan heti kerran. Käytä punnitukseen vaakaa, jonka kapasiteetti on 2,2 kg ja tarkkuus 1 mg.
- Koekuppia punnitaan aluksi n. 1-2 tunnin välein siihen asti kunnes massannousu on tasaantunut ja voidaan arvioida massannousu tunnissa. Tämän perusteella laaditaan punnitusaikataulu.
- Koe lopetetaan kun koekappaleen massa on noussut 1,5 grammaa per 25 millilitraa, joten edellä mainitulla määrällä koe lopetetaan kun massa on noussut 12 grammaa. Esimerkiksi kalsiumsilikaattilevyllä massannousu on noin 0,2-0,3 grammaa tunnissa, jolloin koe on ohi arviolta 36 - 60 tunnissa.

### Koekappaleiden purkaminen

- Aseta koekupit uuniin uunipellille oikeinpäin. Vaha pehmeää noin 20 minuutissa niin ettei se ole täysin sulanut ja pilaa koekappaletta ja silikageeliä.
- Älä kippaa koekappaletta vaan yritä nostaa jollakin, esimerkiksi lastalla koekappaletta reunasta. Jos koekappaletta ei tarvita ehjänä tai se kestää, voit myös varovasti kammata sitä mutta varo vaurioittamasta alumiiniastian reunaa samalla. Kun koekappaleen saa nostettua pois kupista pitäen sen oikeinpäin, suurin osa silikageelistä on uudelleenkäytettävissä. Koekappaleen nostamiseen kupista voi keilla myös imukuppia tai pölynimuria.
- Koekupit voi vielä laittaa uunipellille uuniin jolloin niistä valuu ylimääräinen vaha pois ja ne on helppo puhdistaa. Käytä uunipeltiä alusena jotta vaha ei valu uunin pohjalle.

## LIITE B: LASKENTAPOHJAAN TEHDYT MUUTOKSET

Jotta laskentapohja antaa oikeanlaisia tuloksia kuivakuppikokeelle, tarvitaan seuraavat muutokset.

Kosteusvirta-välilehti, Solu F6.

Keskiarvon laskentakaavasta on poistettava miinusmerkki korvattava se itseisarvomerkillä. Etumerkki (-) toimii märkäkuppikokeen negatiivisten lukujen muuttamisessa positiiviseksi, mutta kuivakuppikokeessa tämä muuttaa valmiiksi positiiviset arvot negatiiviseksi.

```
=JOS(D6="-","-",-KESKIARVO(INDEKSI(F10:F49,VASTINE(D6,$A10:$A49,1)):INDEKSI(F10:F49,VASTINE(E6,$A10:$A49,1))))
```

->

```
=JOS(D6="-","-","ITSEISARVO(KESKIARVO(INDEKSI(F10:F49,VASTINE(D6,$A10:$A49,1)):INDEKSI(F10:F49,VASTINE(E6,$A10:$A49,1))))
```

Laskenta-välilehti, Rivi 20

```
= D12-D10-D19
```

->

```
=ITSEISARVO(D12-D10)-D19
```

## LIITE C: ENSIMMÄISEN KOEKERRAN TAULUKOT

