

Kotelon tiiveyttä analysoiva algoritmi kosteus- ja
lämpötilamittauksilla, sekä kosteuden haitat
mikropiireille

Pro Gradu -tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikan ja tähtitieteen laitos
Fysiikka
Kevät 2020
Jarkko Hanhela
Tarkastajat:
Prof Petriina Paturi
FM Toni Rumpunen

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan ja tähtitieteen laitos

HANHELA, JARKKO Kotelon tiiveyttä analyysoiva algoritmi kosteus- ja lämpötilamittauksilla, sekä kosteuden haitat mikropiireille

Pro Gradu -tutkielma, 59 s.

Fysiikka

kevät 2020

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -järjestelmällä.

Elektroniikan yleistyttyä myös tuotteiden vesitiiveyteen on kiinnitetty entistä enemmän huomiota. Elektroniikan altistuminen suurille kosteuksille voi aiheuttaa laitteiden toimintahäiriöitä ja pahimmillaan tulipaloon johtavia oikosulkuja. Yksinään suojakuoren vesitiiveys ei kaikissa tapauksissa riitä suojaamaan elektroniikkaa, sillä vettä piilee myös valmiiksi laitteiden sisällä. Hyvä tiiveys kuitenkin pidentää tuotteen käyttöikää, jonka vuoksi on kehitetty tekniikoita tiiveyden mittaamiseen.

Vesitiiveyttä voidaan mitata lukuisilla tavoilla, jotka kuitenkin vaativat erillisiä mittausjärjestelyitä. Haastavissa olosuhteissa tuotteen vesitiiveyttä olisi kannattavaa mitata kuitenkin reaaliaikaisesti, jotta voitaisiin ennustaa kosteusvuodon aiheuttama vaara jo ennen laitteen vioittumista. Ilman kosteustasoa suojakuoren sisältä voidaan mitata helposti kosteus- ja lämpötila-antureilla. Koska ilmankosteus reagoi vuotojen lisäksi mm. piirilevyn sisältämän veden desorptioon, nestemäisen veden haihtumiseen ja höyryn kondensoitumiseen, vuotoja on haastavaa mallintaa.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin, voitiinko kaapelitelevisioverkkoon suunnitellun kuitusolmutuotteen suojakuoren sisälle sijoitetulla kosteus- ja lämpötila-anturilla selvittää mahdollisten vuotojen suuruudet. Ilmankosteuden fysikaalisille ilmiöille määritettiin aluksi pohja teoriaosuudella, jonka jälkeen teoriaa sovellettiin käytännön kokeisiin vaihtelevissa ympäristöolosuhteissa.

Avainsanat: kosteus, elektroniikka, vuotomittaus, RH, AH, kostudentorjunta, diffuusio.

Sisältö

Johdanto	1
1 HFC-verkko ja laitteen asennusympäristö	2
2 Ilmankosteuden yhteys kaasun tilanmuuttujiin	4
2.1 Ideaalikaasu ja termodynaaminen tasapaino	4
2.2 Suhteellinen kosteus ja osapaineet	7
2.3 Absoluuttinen kosteus	9
3 Ilmankosteus vaarana mikropiireille	10
4 Kosteudentorjuntakeinot	11
4.1 Vesitiiveys	11
4.2 Kondensioveden hallinta	14
5 Kotelon tiiveyden määrittäminen lämpötilasta ja ilmankosteudesta	16
5.1 Teoreettinen malli	16
5.1.1 Vuodot ympäristön ja systeemin välillä	16
5.1.2 Sitoutuneen veden desorptio	23
5.1.3 Veden haihtuminen ja kondensoituminen	25
5.1.4 Yhteisvaikutus absoluuttiseen kosteuteen	27
5.2 Koelaitteisto	29
5.3 Testiympäristö	33
5.4 Kokeelliset mittaukset	35
5.4.1 Kalibrointitarpeen testaaminen	35
5.4.2 Tiivis tapaus	37
5.4.3 Kannen pulttien kireyden vaikutus	48
5.4.4 Systeemissä haihtuvan veden vaikutus	50
5.4.5 Vertailumittaukset lämpökaapissa	52
6 Tulokset	54
7 Yhteenveto	55

Johdanto

Kosteus on aina ollut elektroniikan vihollinen. Yritys ja erehdys ovat varmasti alunperin luoneet ajatuksia siitä, mitä kosteus voi sähkölaitteille aiheuttaa sekä nopeasti että ajan kanssa. Sähkön aikakautena onkin keksitty lukuisia eri tapoja pitää elektroniikka suojassa kosteudelta sekä menetelmiä testata kehitelmien tiiveyttä.

Hyvä vesitiiveys on tarkan suunnittelun tulos, ja sillä voidaan taata tuotteelle huomattavasti pidempi käyttöikä ja varmempi toimivuus. Myös elektronisen laitteen tehokkuus pysyy ehompana, kun kosteus ei pääse vaikuttamaan yksittäisiin komponentteihin ja niiden sähköisiin ominaisuuksiin. Esimerkiksi kondensaattoreiden ja puolijohteiden ominaisuudet reagoivat merkittävästi ilman suhteelliseen kosteuteen [1].

Vesitiiveyttä osataan hyvin mitata tuotteen valmistusvaiheessa erilaisilla kokeilla, mm. paineilmalla, ultraäänellä, ja indikaattoriaineilla, kuten saippuavedellä. Nämä ovat kuitenkin suhteellisen hitaita menetelmiä tuotteen asennuksen jälkeen toistettavaksi, ja vaativat erityisen koejärjestelyn. Suurempia lämpimän kaasun vuotoja löydetään helposti myös lämpökameralla, ja painevuotoja modernilla äänitutkalla [2]. Näitä voidaan käyttää helposti ja nopeasti tuotteen ollessa asennettunakin. Ne eivät silti toimi laitteisiin, joissa vuoto ei aiheuta ääntä eikä merkittävää lämpöhukkaa. Reaaliaikainen vuotojen monitorointi jo käytössä olevissa tuotteissa on haastavampaa.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, onnistuuko tiiveyden mittaustavalla laitteen kotelon sisään sijoitetulla kosteus- ja lämpötila-anturilla. ICON9000-niminen kaapelitelevisioverkon kuitusolmutuote altistettiin vaihteleville olosuhteille, joissa kosteusvuodot pyrittiin selvittämään. Tuloksista kävi ilmi mittaustavan edut ja haasteet. Tutkielma aloitettiin kuitenkin perehtymällä tuotteen asennusympäristöön ja nostamalla esiin kosteuden aiheuttamat haitat elektroniikalle.

1 HFC-verkko ja laitteen asennusympäristö

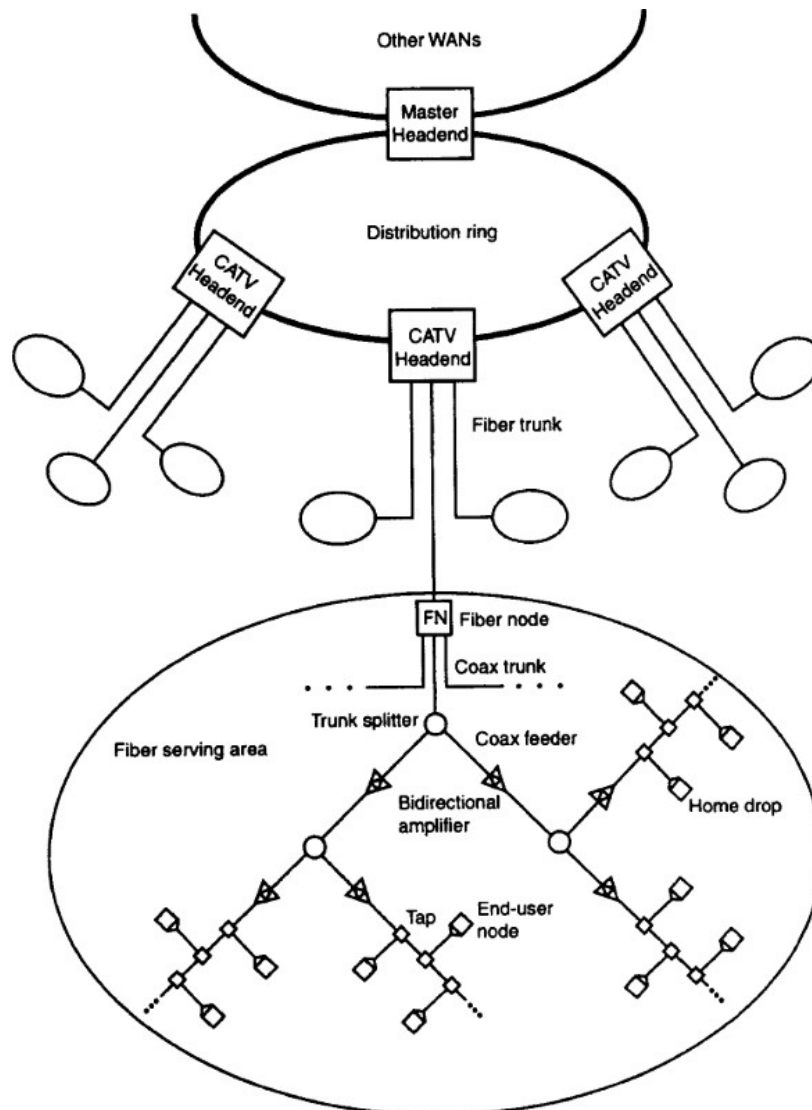
Kaapelitelevisioiden alkuaikoina signaali välitettiin koaksiaalikaapeleilla koko matkalta aina palveluntarjoajalta asiakkaille. Kaapelissa signaalin voimakkuus heikkeni suhteellisen lyhyelläkin välimatkalla, minkä vuoksi tarvittiin useita signaalivahvistimia pitkin verkkoa. Jokainen vahvistin voimisti kuitenkin osaltaan myös virhesignaaleita, joita pyrittiin minimoimaan. Onneksi viestintäteknologiassa on nyt edetty valokuitutasolle.

Valokuidussa signaali heikkenee paljon hitaammin, ja tiedonsiirtonopeus on reilusti suurempi. Kuituverkossa yksi lähetin tai vahvistin kattaa siten laajemman alueen, mikä parantaa verkon toiminnan laatua ja luotettavuutta pienemmällä komponenttimäärällä. Nykyisin Suomenkin kaapelitelevisiot saavat signaalinsa valokuitua hyödyntävistä kuitukoaksiaalihybridit (engl. hybrid fiber-coax, HFC) -kaapelitelevisioverkoista. [3, 4].

HFC-verkko koostuu palveluntarjoajan puolen lähettimestä, valokuidusta, solmupisteestä ja koaksiaalikaapelista. Lähetin lähettää signaalin valokuitua pitkin solmussa olevaan laitteeseen, joka muuttaa informaation valosta sähköiseksi koaksiaalikaapeliin. Koaksiaali johtaa signaalin edelleen asiakkaiden taloihin ja televisioihin. Tässä tutkimuksessa keskityttiin ICON-nimiseen tuotteeseen, joka tulee toimimaan juuri tällaisena valon ja sähköisen signaalin välisenä kuitusolmutuotteena HFC-verkossa [4].

Signaali, jota HFC-verkossa välitetään, voidaan jaotella monella eri tavalla. Informaatiotyyppeihin jaoteltuna se sisältää kuvaa, ääntä sekä muuta dataa. Muuta dataa on mm. interaktiivinen kommunikaatio kaapeliverkon laitteiden ja palveluntarjoajan välillä. Eri kanaviin signaali voidaan osittaa esimerkiksi kansallisen televisiojärjestelmäkomitean (engl. National Television Systems Committee, NTSC) standardin mukaisesti taajuusalueiden perusteella. Tätä käytetään lähinnä Amerikassa ja Japanissa. Kanavajaottelu vaihtelee hieman aluekohtaisesti, ja siirtyvään dataan liittyy myös monia laajemman tason standardeja [3].

Amerikasta Eurooppaan ja Suomeen asti levinnyt kaapelidatastandardi (engl. Data over Cable Service Interface Specification, DOCSIS) mahdollistaa verkossa kulkevan informaation jakamisen palveluntarjoajan näkökulmasta menosuunnan lisäksi myös paluusuuntaisesti. Yhdessä koaksiaalikaapelissa yhdistyy molemmat suunnat, kun taas solmulaitteen kuitupuolella on molemmille suunnille omat erilliset valokuitunsa. DOCSIS-standardeja noudattavasta HFC-verkosta on esimerkkikuvassa 1. Siinä palveluntarjoaja on merkitty ylös, ja siitä lähtee valokuidut lähettimien kautta alaspäin solmuja kohti. Solmusta (kuvassa merkitty tunnuksella FN) lähtee



Kuva 1: Havainnekaavio DOCSIS-standardia noudattavasta HFC-verkosta [3].

koaksiaalikaapelihaaroja lähialueille, ja pidemmissä haaroissa on vahvistimia säännöllisin välimatkoin ylläpitämässä signaalin voimakkuutta. Tietovirran menosuunta on kuvassa ylhäältä alaspäin jokaiseen asiakaspäätteeseen, ja paluusuunta on asiakaspäätteeltä kohti palveluntarjoajaa [3, 4].

ICON on varsinaisesti kuitusolmutuote, mutta sen toiminta sisältää myös signaalin vahvistusta, kun informaatio muunnetaan valosta jännitteiksi johtimiin. Tällaisissa solmutuotteissa sekä varsinaisissa vahvistimissa samaa kaapelia käyttävien signaalien kulkusuunnat on kyettävä erottamaan toisistaan. Tähän tarkoitukseen on diplekserit. Erotus voi tapahtua muun muassa taajuuden perusteella, kuten eri kaanavienkin välillä. Menosuuntaan menevä signaali voidaan siirtää esimerkiksi 85 MHz

taajuudella, ja paluusuuntaan menevä 110 MHz taajuudella, jolloin niiden väliin jää epä määräinen välialue. Välialueella tapahtuu siirtymä menosuunnasta paluusuuntaan, ja on siten vahvistusoperaatiossa alttiimpi virhesignaaleille kohinoineen ja sä röineen. Siksi se on määritelty käyttämättömäksi estokaistaksi. Taajuuspohjaisen jaottelun perusteella paluukaista ja estokaista vievät tilaa menokaistalta. Koska menokaistassa tapahtuu suurin tietoliikenne kuljettaessa asiakkaille katseltavaa, sille on varattu suurin kaistanleveys, ja estokaistan leveys pyritään luonnollisesti minimoimaan [4].

2 Ilmankosteuden yhteys kaasun tilanmuuttujiin

2.1 Ideaalikaasu ja termodynaaminen tasapaino

Tiiveyden luotettava määrittäminen makrotasolla edellyttää perusteellista ymmärrystä mitattavien fysikaalisten suureiden keskinäisestä käyttäytymisestä aina mikrotasolta lähtien. Aivan ensimmäiseksi selvitetään ilman käyttäytymisen perusperiaatteet, ja niihin tehdyt approksimaatiot tässä tutkimuksessa.

Kaasufaasissa olevan aineen fysikaalisen tilan määrittävät kaasun tilanmuuttujat. Ne ovat paine p , lämpötila T , ainemäärä n sekä kaasun täyttämä tilavuus V . Normaaliolosuhteissa (Normal Temperature and Pressure, NTP), joissa $p = 101,3$ kPa ja $T = 293,15$ K, kaasun lämpötila ja paine ovat niin pienet, etteivät hiukkaset juurikaan reagoi niiden keskinäisissä törmäyksissä [5]. Tässä tutkimuksessa ilma oli lähellä NTP-olosuhteita, joten sen tilaa kuvasi ideaalikaasun tilanyhtälö

$$pV = nRT, \quad (1)$$

missä R on moolinen kaasuvakio. Yhtälön perusteella esimerkiksi suljetussa systeemissä vakio tilavuudessa lämpötilan kaksinkertaistaminen aiheuttaa välittömästi paineen kaksinkertaistumisen. Usein kaasu täyttää kuitenkin ison tilavuuden, eivätkä intensiiviset suureet muutu täsmälleen samaan aikaan koko kaasun tilavuudessa. Esimerkiksi suljetun systeemin seinämästä saapuva lämpö vaikuttaa nopeimmin ilmaan seinämän vieressä, mikä synnyttää systeemiin tilapäisen epätasapainon [5].

Termodynaaminen tasapaino on tila, johon jokainen systeemi pyrkii spontaanisti. Tasapainoon hakeutuminen on seurausta termodynamiikan 2. pääsäännön mukaisesta pyrkimyksestä maksimoida systeemin entropia. Suurin entropia on termodynaamisessa tasapainossa, joka koostuu termisestä, mekaanisesta ja kemiallisesta tasapainosta [6].

Termisessä tasapainossa lämpötila jokaisessa systeemin pisteessä on sama. Lämpötila tasaantuu lämmön siirtymänä joko johtumalla, säteilemällä tai kuljettumalla. Mekaaninen tasapaino tarkoittaa yhdenmukaista vakiopainetta systeemin jokaisessa osassa. Se tasoittuu hiukkasten ja kappaleiden liikkeen seurauksena, eli kaasujen tapauksessa yksittäisten paine-eroalueiden tilavuudenmuutoksista kaavan (1) mukaisesti [6].

Kemiallinen tasapaino tarkoittaa ilmalle sitä, että kaasu on jakautunut koostumukseltaan tasaisesti joka puolelle tilavuudessaan. Eksaktimmin ilmaistuna kaasun jokaisen ainesosan konsentraatiot pysyvät vakioina kaikkialla kaasussa. Myös kemiallinen tasapaino saavutetaan ainesosien liikkeessä paikasta toiseen - suuremmasta konsentraatiosta pienempään. Tätä kutsutaan diffuusioksi [6].

Yksinkertaisen laskutavan konsentraatiogradientin aiheuttaman diffuusion nopeudelle antaa Fickin ensimmäinen diffuusiolaki

$$\frac{dJ}{dt} = -D \frac{dc_{\text{H}_2\text{O}}}{dx}, \quad (2)$$

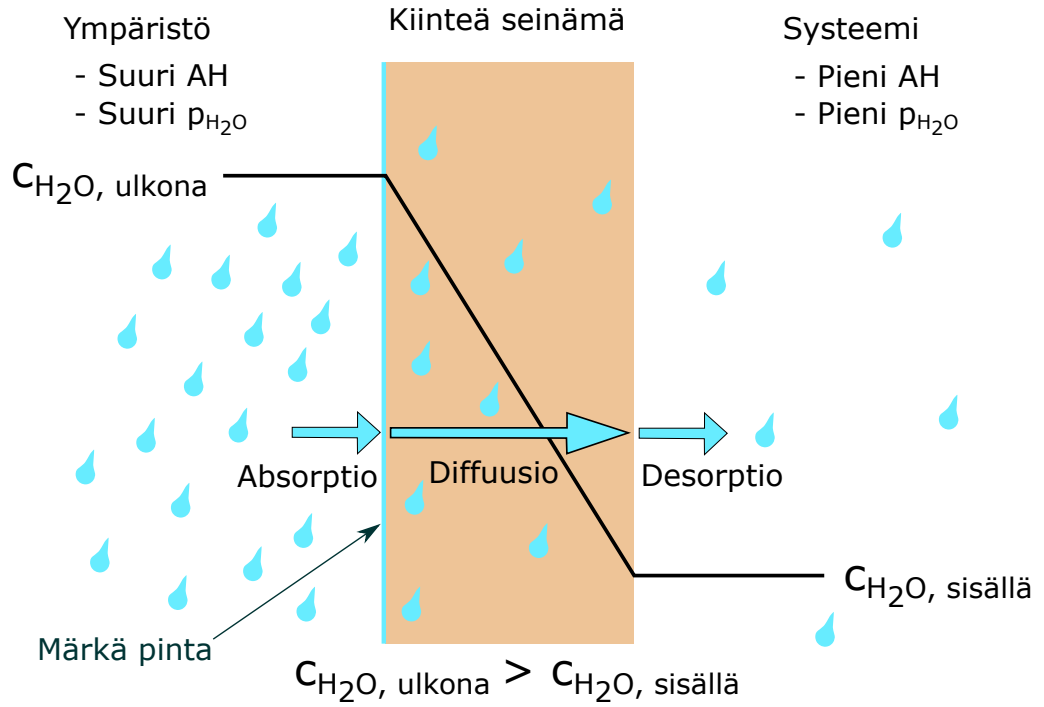
missä $\frac{dJ}{dt}$ kuvaa veden diffuusionopeutta pinta-alayksikön läpi yksikössä $[\frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}]$. Positiivisena se kohdistuu matalampaan konsentraatioon, eli negatiivisen gradientin suuntaan, ja siksi yhtälössä on miinus. Myös diffuusiokerroin D on positiivinen. On tärkeää huomata, että D riippuu sekä diffusoituvasta että läpäistävästä materiaalista. Siten vesihöyryn kerroin D on aivan eri kuin kuivan ilman $D_{\text{kuiva ilma}}$.

Diffuusiokertoimen yksikkö on $[\text{m}^2/\text{s}]$, ja lämpötilariippuvuutta kuvaa Maxwell-Boltzmannin jakaumiin perustuva Arrheniuksen yhtälö

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right), \quad (3)$$

missä D_0 on kertoimen arvo jossain vertailupisteessä, R on ideaalikaasuvakio, T on lämpötila ja E_D kuvaa diffuusion aktivoitumisenergiaa yksikössä $[\text{J/mol}]$. Aktivoitumisenergian suuruusluokka veden diffuusiolle on tyypillisesti joitain kymmeniä kJ/mol . Esimerkiksi tietyillä piirilevyissäkin käytetyillä polymeereillä $E_D = 35 \text{ kJ/mol}$ [7, 6]. Tärkein huomio yhtälössä on kuitenkin se, että suurempi diffuusiokerroin ja siten nopeampi diffuusiointi saavutetaan korkeammassa lämpötiloissa.

Diffuusiota tapahtuu sekä yksittäisen faasin, kuten kaasun, sisällä että faasien rajapinnoilla. Kuvassa 2 on havainnollistava esimerkki tapauksesta, jossa vesihöyry diffuusiointi ympäristön ilmasta kiinteän aineen läpi sisälle systeemin ilmaan. Tämä aiheuttaa fysikaalisen tilan muutoksia niin kaasussa kuin kiinteässäkin aineessa. Aluksi vesimolekyylit adsorboituvat kiinteälle pinnalle nestemäiseksi kalvoksi, josta vesi sitten absorboituu pinnan sisään. Tämä tapahtuu ympäristön vesihöyryn



Kuva 2: Kosteuden diffusoituminen kaasusta kaasuun väliseinämän lävitse.

osapaineen vaikutuksesta. Ideaalista adsorptiota kuvaa Henryn laki

$$c_{\text{H}_2\text{O}, \text{pinta}} = S \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (4)$$

Pinnalle adsorboituva konsentraatio on siis suoraan verrannollinen kaasun osapaineeseen ilmassa pinnan vieressä [7]. Vaikka suljetussa systeemissä ilman kosteuskonsentraatio pysyisi samana, myös paineen nousu lämpötilan vaikutuksesta voi kohottaa adsorboituvaa kosteuskonsentraatiota pinnassa. S on materiaalikohtainen lämpötilasta riippuva liukoisuuskerroin:

$$S = S_0 \exp\left(\frac{-\Delta H_S}{RT}\right),$$

missä S_0 on liukoisuuskerroimen arvo tietyssä vertailupisteessä, R kaasuvakio, T lämpötila ja ΔH_S kuvaa entalpiamuutosta adsorboituvan aineen liuetessa materiaalin pintaan. Suuremmassa lämpötilassa T myös liukoisuuskerroin S on suurempi, mikä johtaa suurempaan vesikonsentraatioon pinnassa. Siten lämmitys kosteassa ilmassa altistaa pintoja kostumiselle. Lisäksi vesihöyryn tiivistyminen vapauttaa energiaa pinnalle lämpönä, mikä nopeuttaa myös diffuusiota [7].

Henryn laki pätee parhaiten nesteille ja pienille adsorboituville konsentraatioille. Vedelle ja orgaanisille höyryille adsorptio usein poikkeaa hieman Henryn laista: adsorboitunut konsentraatio on suurempi kuin samasta aineesta koostuvilla nesteillä, ja se noudattaa yhtälöä

$$c_{\text{H}_2\text{O}, \text{pinta}} = a \cdot c_{\text{H}_2\text{O}, \text{ilma}}^b,$$

missä a ja b ovat kokeellisesti määritettäviä vakiokertoimia. Kosteuden adsorptiolle eksponentin b arvo on yleensä välillä 1 - 2, ja se on siis melkein suoraan verrannollinen vesihöyryn osapaineeseen, kuten Henryn lailla voidaan approksimoida [7]. Tässä tutkimuksessa käytetäänkin yksinkertaistaen Henryn lakia.

Kuvan 2 esimerkin systeemin sisällä on pienempi kosteuden osapaine kuin systeemin ulkopuolella, joten seinämän sisäpuolelle sitoutuu myös vähemmän vettä. Siten seinämän eri puolilla vallitsee vesikonsentraatioero, joka pyrkii tasoittumaan veden diffuusion avulla. Näin diffuusio kuljettaa vesimolekyylejä hitaasti kiinteään aineeseen lävitse, ja pyrkii loiventamaan konsentraation gradienttia. Kun vesimolekyylit lopulta saavuttavat sisäpinnan, ne siirtyvät kiinteästä aineesta ensin ohueen nestepintaan, ja sitten kuivempaan kaasuun systeemin sisällä. Tätä kutsutaan desorptioksi, ja se on yksinkertaistettuna absorptiolle ja adsorptiolle päinvastainen ilmiö.

Diffuusiota tarkasteltaessa on tärkeää ottaa huomioon, että eri kaasuilla on erilainen diffuusiokäyttäytyminen. Tämänkin tutkimuksen kokeissa havaitaan, että kuivan ilman tyyppiä ja happea huomattavasti pienemmät vesimolekyylit diffusoituvat aivan eri nopeuksilla kuivaan ilmaan verrattuna.

2.2 Suhteellinen kosteus ja osapaineet

Ulkoilma on kaasuseos, jossa on sekoittuneena lukemattomia eri aineita kaasumuodossa. Seisova kaasu aiheuttaa tasaisen paineen rajapinnoilla kiinteään aineeseen, kuten ympäröiviin seinämiin tai paineanturiin. Kokonaispaineen suuruus on Daltonin lain mukaan yksittäisten ainesosien tuottamien osapaineiden summa. Tavallisessa ulkoilmassa olevista alkuaineista ylivoimaisesti suurin osa on tyyppiä, jonka jälkeen eniten on happea. Näiden ainemääräkonsentraatiot kuivassa ilmassa merenpinnan tasolla ovat tyyppiä 78,08 % ja hapelle 20,95 % [5]. Muiden alkuaineiden osuuksien summaksi jää vain vajaa prosenttiyksikkö, minkä perusteella niiden vaikutus kokonaispaineeseen on häviävän pieni. Teoreettisesti voitaisiin laskea eri alkuaineiden aiheuttamat osapaineet niiden suhteellisista ainemääristä, mutta tässä tutkimuksessa oltiin kiinnostuneita kosteudesta, eli vain veden aiheuttamasta osapaineesta.

Ilmanpaineen voidaan ajatella koostuvan kuivan ilman ja siihen sekoittuneen vesihöyryn aiheuttamista osapaineista, joiden summa Daltonin lain mukaan esitettyinä on

$$\begin{aligned} p &= p_{\text{kuiva}} + p_{\text{vesi}} \\ &= p_{\text{kuiva}} x_{n,\text{kuiva}} + p_{\text{H}_2\text{O}} x_{n,\text{H}_2\text{O}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Tässä kertoimet x_i ovat ainemäärien suhteelliset osuudet koko kaasuseoksessa. Niiden suhde kuvaavaa siis sekoittuneiden kaasujen ainemäärien suhdetta [5].

Veden kyllästysosapaine $p_{\text{H}_2\text{O}}^*$ on paine, jossa kaasu ei enää pysty sitomaan yhtään enempää vettä itseensä, ja ylimääräinen kosteus alkaa tiivistyä vesipisaroiksi. $p_{\text{H}_2\text{O}}^*$ riippuu ainoastaan lämpötilasta ja aineen kemiasta [5].

Suhteellinen kosteus RH ilmassa kuvaa veden osapaineen suhdetta sen kyllästysosapaineeseen $p_{\text{H}_2\text{O}}^*$. Kaasufaasissa olevan veden osapaine p_{vesi} ei voi ikinä ylittää sen kyllästysosapainetta, jolloin RH voi saavuttaa korkeimmillaan arvon 100 %. Todellisuudessa tätä ilmankosteusprosenttia ei kuitenkaan yleensä savuteta, sillä luonnossa veteen on lähes aina sitoutuneena epäpuhtauksia. Haihtuminen on suoraan verrannollinen nesteen ja kaasun väliseen pinta-alaan, ja epäpuhtaudet vievät osan tästä alasta. Erilaisista fysikaalisista ominaisuuksistaan johtuen epäpuhtaudet eivät kuitenkaan haihdu veden haihtuessa. Siten vettä haihtuu suhteessa vähemmän, ja tasapaino haihtumisen ja kondensaation välillä siirtyy matalampaan osapaineeseen. Epäpuhtaudet siis laskevat kylläisen vesihöyryn painetta. Seurauksena vesi alkaa tiivistyä kaasusta nesteeksi jo hieman matalammassa kosteudessa [5].

Kosteusmittareiden toimintaperiaatteet tuovat myös omat rajansa havaittaviin RH -arvoihin, eivätkä elektroniset anturit yleensä edes kestä kosteudesta saturoitunutta ilmaa, eli sumua. Näitä kosteusmittareiden ominaisia rajoja voidaan tarkemmin kappaleessa 5.2 - Koelaitteisto.

Liuenneiden epäpuhtauksien vaikutuksen lisäksi $p_{\text{H}_2\text{O}}^*$ riippuu ainoastaan kaasun lämpötilasta. Puhtaan veden lämpötilariippuvuudelle on määritetty artikkelissa [8] erittäin tarkasti kokeellisia tuloksia vastaava yhtälö:

$$\begin{aligned} p_{\text{H}_2\text{O}}^*(T) &= \frac{\exp(34,494 - \frac{4924,99}{T-273,15+237,1})}{(T-273,15+105)^{1,57}} \\ &= \frac{\exp(34,494 - \frac{4924,99}{T-36,05})}{(T-168,15)^{1,57}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Tämän perusteella suhteellinen kosteus voidaan laskea, jos tiedetään vesihöyryn osapaine ja lämpötila:

$$RH = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}^*(T)}. \quad (7)$$

Yleensä RH saadaan kuitenkin suoraan kosteusmittarilta, jolloin kaavasta (7) voidaan halutessa ratkaista veden osapaine.

Paine riippuu kuitenkin aina monista tekijöistä, eikä se siten ole erityisen hyödyllinen kosteuden kuvaamisessa yksinään [5]. Sama pätee siihen suoraan verrannolliseen suhteelliseen kosteuteen. Ilman tarkempaa kontekstia esimerkiksi suhteellinen kosteus $RH = 90\%$ ei kerro juurikaan muuta, kuin että pieni muutos olosuhteissa voi synnyttää sankankin sumun, ja että kaasun kanssa kontaktissa olevat kylmät pinnat ovat alttiita kondensaatiolle. Varsinaisen kosteusmäärän mittaamiseen tarvitaan yksiselitteinen suure, joka kertoo vesihöyryn määrän tietyllä alueella. Kosteuden siirtymisen ja systeemin tiiveyden tarkkailussa on järkevintä selvittää absoluuttinen kosteus.

2.3 Absoluuttinen kosteus

Absoluuttinen kosteus AH tarkoittaa veden tiheyttä ilmassa. Se määritellään siis vesihöyryn massan ja sen täyttämän tilavuuden suhteena. Massa voidaan tarkemmin ottaen ilmaista veden moolimassan $M_{\text{H}_2\text{O}}$ ja ainemäärän $n_{\text{H}_2\text{O}}$ tulona [5]:

$$AH = \frac{m_{\text{vesi}}}{V} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot n_{\text{H}_2\text{O}}}{V}. \quad (8)$$

Yhtälössä esiintyy kaksi kaasun tilanmuuttujaa, V ja $n_{\text{H}_2\text{O}}$. Näistä jälkimmäistä ei voida suoraan mitata, joten se kannattaa ilmaista muiden tilanmuuttujien avulla.

Sijoittamalla veden osapaineen kaava (7) ja ideaalikaasun tilanyhtälöstä (1) ratkaistava ainemäärä veden tiheyden yhtälöön (8), saadaan absoluuttinen kosteus ilmaistua vesihöyryn lämpötilan T ja suhteellisen kosteuden avulla muodossa

$$AH(T, RH) = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}^*(T) \cdot RH}{RT}. \quad (9)$$

Nyt AH :n määrittämiseen tarvitaan vakioiden lisäksi tieto lämpötilasta T ja suhteellisesta kosteudesta RH , jotka saadaankin helposti mitattua. Näin vesihöyryn määrän lisääntyminen ja väheneminen ilmassa voidaan selvittää kosteus- ja lämpöanturilla, olipa kyseessä sitten suljettu tai avoin systeemi.

Tarvittaessa absoluuttisesta kosteudesta voidaan laskea tunnetussa tilavuudessa olevan veden massa:

$$m_{\text{vesi}} = AH \cdot V. \quad (10)$$

Yhtälön vaatimuksena on kuitenkin se, että kaasu on termodynaamisessa tasapainossa kyseisessä tilavuudessa. Massasta (10) voitiin edelleen määrittää veden aine-

määrä

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_{\text{vesi}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{AH \cdot V}{M_{\text{H}_2\text{O}}}. \quad (11)$$

Vesihöyryn konsentraatio lasketaan ainemäärästä [6]:

$$c_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{V} = \frac{AH}{M_{\text{H}_2\text{O}}}. \quad (12)$$

Vastaavasti suhteellisen kosteuden käyttäytyminen lämpötilan funktiona tietyllä AH -arvolla voidaan esittää ratkaisemalla RH yhtälöstä (9):

$$RH(T, AH) = \frac{R \cdot T \cdot AH}{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}^*(T)}. \quad (13)$$

3 Ilmankosteus vaarana mikropiireille

Kosteus koostuu monista vaaratekijöistä elektroniikkaa ajatellen. On välittömiä vaikutuksia ja pitkällä aikavälillä kumuloituvia ongelmia. Jotkut haitat ovat lieviä, ja tietyt tilanteet ovat niin kriittisiä, että voivat johtaa laitteen rikkoutumiseen ja tulipaloon. Tällaisia ovat yleisesti oikosulut.

Oikosulku syntyy, kun jännitteellisten sähköjohteiden väliin syntyy sähköä johtava kontakti. Tällainen kontakti on esimerkiksi kondensiovesi, johon on liuennut piirilevystä ioneja [7]. Tällaisen nopeasti syntyvän oikosulun lisäksi mm. johteiden hapettuminen pitkällä aikavälillä voi estää virrankulun haluttua reittiä, joka altistaa suurempiresistanssiset polut tarkoitustaan suuremmille virroille. Tämä voi johtaa piirin odottamattomaan kuumenemiseen, mikä voi edelleen johtaa eristekerrosten häviämiseen metallikontaktien väliltä, jolloin on vaarana oikosulku. Lämpenemistä aiheuttaa myös kapeiksi hapettuneet johtimet, sillä resistiivisyys kasvaa johtimen poikkipinta-alan kaventuessa [6]. Siten korrosio on yksi vaaratekijä sähkölaitteille. Korrosionopeus on sitä suurempi, mitä suurempi on ilmankosteus ja hapettuvien pintojen lämpötila [9]. Ilmankosteus kasvattaa myös vuotovirtaa piirilevyn eristekerroksen läpi. Normaalkosteudessa, eli kun $RH < 70$ % vuotovirta on kuitenkin yleensä alle 1 nA [1]. Ympäristön ilmankosteus ei ole kuitenkaan ainoa haittatekijä elektroniikalle.

Jo piirilevyn valmistuksessa komponenttien juottamisvaiheessa levyyn sitoutunut kosteus voi aiheuttaa vakavia vahinkoja levyille. Vesi voi kuumentessaan rikkoa piirilevyn kerrosrakennetta, joka voi johtaa sähköisten kontaktien muodostumista väärin paikkoihin, mikä pahimmillaan aiheuttaa oikosulun. Tämän estämiseksi IPC:n ohjeistuksen mukaan piirilevyn sisältämän kosteuden osuus massaprosentteina tulisi

olla alle 0,1 m-% 260 °C juotoslämpötilassa ja alle 0,2 m-% 230 °C juotoslämpötilassa [10].

Jännitteellisten juotosten on huomattu kasvattavan piirilevystä pois päin ulottuvia ohuita kuituja, joita nimitetään tinaviiksiksi (engl. tin whiskers). Ne ovat ylisyneet lyijyttömien juotteiden käyttöönoton myötä, ja niitä voi muodostua mistä tahansa tinapinnoitteisesta metallista. Ajan saatossa nämä pyrkivät luomaan kontakteja lähekkäisten juotosliitosten välille piirilevyllä, mikä voi aiheuttaa oikosulun. Tinaviiksien kasvunopeutta voidaan hidastaa pitämällä juotoksia alemmassa lämpötilassa ja suhteellisessa ilmankosteudessa [9].

Korkealla kosteudella ja lämpötilalla on myös sellaisia lievempiä haittavaikutuksia, jotka vaikuttavat välittömästi. Tällaisia ovat mm. puolijohteiden sähköisten ominaisuuksien, kondensaattoreiden kapasitanssien ja vastusten resistanssien muutokset. Kun nämä muuttuvat, myös laitteen toiminta voi muuttua. Eriytyisen tarkkaa tämä on vaativissa mittalaitteissa, mutta komponenttien ylimitoituminen voi johtaa myös muunlaisten laitteiden ylikuumentumiseen tai laitteen vioittumiseen. Eriytyisen vahvasti kosteuteen reagoi juurikin kondensaattorit. Kosteus vaikuttaa sekä niiden dielektriseen vakioon, että niiden vuotovirran suuruuteen [1].

4 Kosteudentorjuntakeinot

4.1 Vesitiiveys

Ajan saatossa ja erityisesti elektroniikan valmistuksen lisääntyessä kosteuden torjumisesta on tullut entistä tärkeämpi huolenaihe. Sen torjumiseksi on kehitetty monia yksinkertaisia keinoja, jotka toimivat yleisimmissä tuoteratkaisuissa. Yksinkertaisimmillaan puhutaan saumojen tiivistämisestä, mutta monissa tilanteissa on syytä huomioida myös tilanteet, joissa kosteutta voi syntyä tiivistetyn laitteen sisäpuolella. Tässä osiossa käydään läpi kosteudentorjuntakeinoja, ja niiden toiminta perustellaan yksinkertaisilla fysiikan ilmiöillä.

Yleensä kosteudelta suojattavat laitteet ympäröidään jonkinlaisella kuorella, joka estää vähintäänkin nestemäisen kosteuden pääsyn sisäpuolelle. Mahdollisimman tiiviin kuoren saa helpoiten tehtyä minimoimalla tiivistettävien saumojen lukumäärän. Tämä onnistuu käyttämällä mahdollisimman vähän osia. Kaikkein tiivein olisi kiinteä täysin yhtenäinen yhden kappaleen muodostama kuori, kuten hehkulampan lasikupu. Erilaisissa rajapinnoissa kohtaa yleensä materiaalit, joilla on hyvinkin erilainen nanorakenne, ja siten yhtymäkohtiin jää helposti mikroskooppisia rakoja.

Sopivissa olosuhteissa veden kaltaiset pienet molekyylit voivat läpäistä vastaavia rakkoja, joskin hyvin hitaasti. Onneksi täysin yhtenäisten kuorien valmistaminen ei ole kuitenkaan juuri koskaan tarpeellista, eikä tuotteen toiminnallisuuden vuoksi edes toivottavaa [7].

Monet laitteet edellyttävät tiiveyden lisäksi erilaisia liitosmahdollisuuksia ja läpivientejä. Periaatteessa näiden tiivistämiseen on sovellettava samoja periaatteita, kuin edellä mainituissa kuoren osien liitosten tiivistämisessä. Läpivienneistä vedetään usein johtoja, joiden eristepinta on tuotteen kuorta pehmeämpää materiaalia. Näin johto itsekin voi toimia tiivisteenä, kun sitä ympäröi hieman tiiviimpi mukautuva materiaali, joka on edelleen kantta pehmeämpää. Pääajatus tiivistämisessä on, että rajapintojen muodostavat materiaalit ovat kovuudeltaan sopivasti erilaisia.

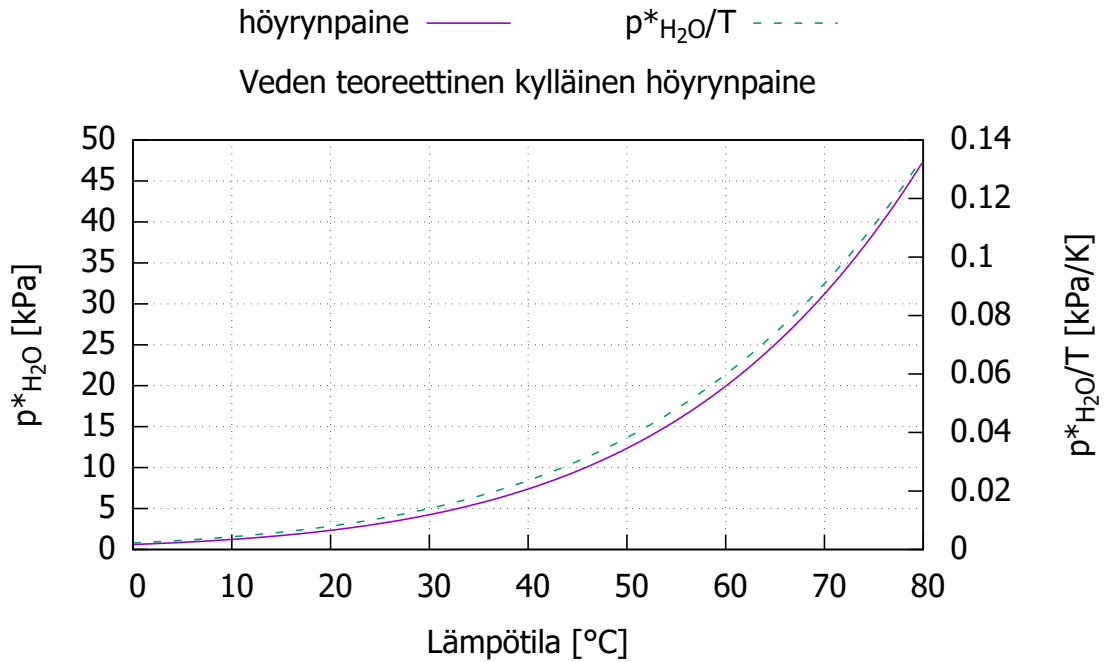
Kannattaa huomioida, että tiivisteiden ei välttämättä aina tarvitse olla kiinteitä. Joissain tapauksissa, kuten monissa laakeroinneissa, rasvapohjainen fluidi on äärimmäisen hyvä eriste vettä vastaan. Vesi ei sekoitu rasvaan, sillä rasvat ovat yleisesti hydrofobisia materiaaleja [11]. Niistä erityisesti vaseliini mukautuu loistavasti pieniin uriin pysyen samalla yhtenäisenä eikä vuoda pois tiivistettävästä välistä. Tämä juontuu sen osittain kiteytyneestä rakenteesta [12]. Hyvinä esimerkkeinä vaseliinin kaltaisten liitosrasvojen käyttökohteista ovat kierteelliset läpivienti- ja tulppausliitokset, jotka ovat yleisiä myös elektroniikan tuotteissa [7].

Joissain tuotteissa voi syntyä suuriakin yli- tai alipaineita. Suljetussa systeemissä ylipaine voi syntyä ilman nopeasta kuumenemisesta ja alipaine sen viilenemisestä. Veden osapaine kasvaa suljetun tilan lämpötilan kasvaessa, mikä vaikuttaa korottavasti suhteelliseen kosteuteen ja on siten huono asia. Hyvä puoli lämpötilan nousussa on se, että se myös korottaa veden kyllästysosapainetta huomattavasti nopeammin kuin veden osapainetta. RH siis pienenee lämpötilan noustessa, kuten seuraavaksi todistetaan.

Kuvaaja 3 esittää kyllästysosapaineen riippuvuutta lämpötilasta. Samassa on esitetty myös suhde $\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^*}{T}$, jotta nähdään lämpötilan kokonaisvaikutus esimerkiksi RH -arvoon kaavassa (13). Kuvasta nähdään, että esimerkiksi lämpötilan nousu arvosta $T = 20 \text{ °C}$ arvoon $T = 40 \text{ °C}$ kasvattaa kyllästysosapaineen kolminkertaiseksi. Ideaalikaasun tilanyhtälön (1) perusteella paineen muutos on suoraan verrannollinen lämpötilan muutokseen, ja Daltonin lain (5) mukaan kokonaispaine on osapaineiden summa, joten osapaineen kasvun kertoimeksi voidaan laskea

$$\frac{p_{\text{H}_2\text{O}, \text{korkea}}}{p_{\text{H}_2\text{O}, \text{matala}}} = \frac{T_{\text{korkea}}}{T_{\text{matala}}} \approx 1,07.$$

Tämä 7 % kasvu veden osapaineessa on todellakin mitätön verrattuna kyllästysosa-



Kuva 3: Paine, jossa vesihöyry saturoituu, sekä sen suhde lämpötilaan.

paineen 200 % kasvuun. Täten näiden vaikutusten summana suhteellinen kosteus pienenee lämpötilan kasvaessa [5].

Suhteellista kosteutta voi laskea lämpötilan nousun yhteydessä myös mahdollisesti muodostunut ylipaine ympäristön paineeseen verrattuna. Se pyrkii poistamaan kaasua hieman vuotavasta systeemistä ympäristöön. Vesihöyry poistuu kuivaa ilmaa helpommin pienen molekyylikokonsa ansiosta, kunhan ympäristön vesihöyryn osapaine on pienempi kuin systeemissä. Näillä perusteilla lämpötilan nousu ja ylipaine suljetussa systeemissä ovat itse asiassa hyviä asioita kosteuden vähentämisen kannalta.

Jos melko tiivis systeemi on alipaineistettu ympäristöönsä nähden, vallitsee dynaaminen epätasapaino, joka pyrkii tasoittumaan. Mitä suurempi paine-ero on, sitä nopeammin ympäristöstä vuotaa ilmaa systeemin sisään. Kuiva ilma ei haittaa, mutta samalla ympäristöstä siirtyy myös kosteutta, jos kosteuden osapaine on sisällä pienempi. Veden tulon rajoittaminen on erittäin hankalaa juuri vesimolekyylien pienestä koosta johtuen.

Paineen tasaamiseksi on kehitetty erilaisia huohotus- eli paineentasausventtiilejä, jotka pitävät nestemäisen veden käytännössä kokonaan ulkopuolella päästäten vain kaasufaasin lävitseen. Tällaisessa venttiilissä avainasemassa on puoliläpäisevä kalvo, jonka toiminta perustuu mekaaniseen erotteluun ja materiaalin hydrofobisuu-

teen. Tiheä hydrofobinen verkko hylkii nestemäistä vettä sekä sen poolisuuden että suuren pintajännityksen vuoksi. Vesihöyryssä molekyylit ovat kuitenkin etäällä toisistaan, joten niillä ei ole samanlaista pintajännitystä kuin nesteellä, ja siten ne kulkeutuvat hyvinkin tiiviin verkkorakenteen läpi vaivatta [13, 14]. Paineentasauksessa vesihöyryn kulkua ei siis voida estää huohotusventtiileilläkään.

Edellä esitetyt ympäristöstä eroteltuun suljettuun systeemiin pyrkivät kosteudentorjuntakeinot ovat yksinkertaisen tehokkaita, mutta eivät aina riitä yksinään kunnolliseen kosteuden torjuntaan. Vaikka systeemi saataisiin täydellisesti suljetuksi, vaara on silti olemassa sisäpuolella - kondensaatio.

4.2 Kondensioveden hallinta

Kondensaation vaatimuksena on se, että tiivistymispinnan lämpötila on korkeintaan kaasuun sekoittuneen vesihöyryn kastepisteen suuruinen. Tiivistymispinta voi olla joko kiinteä tai nestemäinen pinta - myös ilmassa oleva suurempi epäpuhtaushiukkanen käy. Mikäli systeemin sisällä tapahtuu lämpötilan muutoksia ajan funktiona, tai siinä on stabiili nollasta poikkeava lämpötilagradientti, on riski veden tiivistymiselle kylmille pinnoille.

Sähkölaitteissa on aina osia, jotka lämpenevät resistanssin ja impedanssin vaikutuksesta virtojen ollessa päällä. Muuntajat ja prosessorit kuumenevat usein muita komponentteja enemmän. Toisaalta eristämättömän systeemin kuori, joka on suorassa kosketuksessa ympäristöön, mukailee ulkopuolen lämpötilaa. Siten aina kun ympäristön lämpötila ei kasva samaa vauhtia piirilevyn lämpötilan kanssa, kuori on piirilevyä viileämpi, ja näin kondensaatiolle altistava lämpögradientti on syntynyt.

Vesihöyryn kondensoitumisen estämiseksi on onneksi olemassa kaksi keinoa. Josko systeemin lämpötilaeroja on loivennettava, tai sisällä olevan ilman kosteutta on vähennettävä. Ilman kosteuden lisääntymistä voidaan hidastaa sulkemalla kuori kuivassa ympäristössä, jossa absoluuttinen kosteus on pieni. Mitä parempi on kuoren vesitiiveys, sitä hitaammin ympäristön kosteus diffusoituu systeemin sisään. Tässä pyritään siis hidastamaan kemiallisen tasapainon syntymistä, mutta sitä on käytännössä mahdoton estää kokonaan ilman aktiivista vesihöyryn poistoa systeemin kaasufaasista. Aktiivinen poisto tarkoittaisi käytännössä tyhjiöpumppua, mikä olisi hyvin epäkäytännöllinen perinteiselle elektroniikalle. Passiivisena kosteudenpoistona voitaisiin käyttää jotain kemiallisesti aktiivista pintaa, joka absorboi itseensä vettä. Tämä ei olisi kuitenkaan pitkäaikaisesti huoltovapaa ratkaisu. On paljon helpompaa lähestyä ongelmaa lämpötilojen näkökulmasta.

Kondensaatiota voidaan torjua pitämällä laitteista lämpönä haihtuva hukkate-

ho matalana ja jäähditys kunnossa. Hukkatehon määrittää lähinnä virtapiireissä käytetyt virrat ja komponentit sekä laajemmassa mittakaavassa koko piirin suunnittelu. Lämpöä syntyy kuitenkin aina väistämättä, nykyajan elektroniikassa vielä paljonkin. Tälläkin hetkellä kehitellään uusia vähemmän hukkalämpöä tuottavia komponentteja nykyisten korvaajaksi, kuten parempia passiivisia muisti- ja logiikkakomponentteja mm. tulevaisuuden elektroniikan - spintroniikan - keinoilla [15]. Sillä välin, kun vähemmän hukkalämpöä tuottava teknologia on vasta kehitteillä, on keskityttävä enemmän viilennykseen.

Lämmön tasaamiseen pääidea on tiedostaa tuotteen kuumimmat ja kylmimmät alueet, ja pyrkiä siirtämään lämpöä mahdollisimman vaivatta näiden välillä. Lämpöä voidaan siirtää kolmella tavalla. Yksinkertaisin ja usein tehokkain tapa on lämmön johtaminen hyvillä lämmönjohteilla. On olemassa monia sopivia tahnoja, joiden terminen resistanssi on hyvin pieni samalla kun niiden resistanssi sähkölle on erittäin suuri [16]. Tällaisilla voidaan varmistaa laaja-alainen lämpöä johtava kontakti vaikkapa suoraan kuumasta mikroprosessorista laitteen viileään metallikuoreen.

Lämpöä voidaan siirtää myös konvektiolla, eli kohdistamalla vaikkapa tuuletin puhaltamaan ilmaa kuumasta kohdasta kylmää kohti tai päinvastoin. Lämpösäteily puolestaan voidaan maksimoida kasvattamalla kuuman osan pinta-alaa. Tämä onnistuu venyttämällä kappaletta leveämmäksi pyrkimällä välttämään pallomaisia muotoja, nimittäin pallon pinta-alan suhde tilavuuteen on geometrisista muodoista pienin mahdollinen. Erilaiset litistettyjen muotojen yhdistelmät, kuten jäähditysriivastot, ovat laajapinta-alaisina kappaleina tehokkaita lämmön säteilijöitä. Tässä tutkimuksessa käytettiin laitetta, jonka piirilevyn viilennys hoidettiin johtamalla lämpöä kuoreen ja sen ulkopinta koostui kauttaaltaan jäähditysriivoista. Niistä lämpö siirtyi säteilemällä ja tuulen kanssa konvektiona.

Lämmön tasauskeinoista huolimatta usein lämmintä laitetta ympäröivän tiiviin kuoren sisälle muodostuu lämpötilaeroja, ja suurilla suhteellisilla kosteuksilla kondensioivettä voi syntyä viileimpiin pintoihin. Nestemäinen vesi ei itsessään ole välittömäksi vaaraksi virtapiireille niin kauan, kun se ei ole kosketuksissa piirin johtavien osien kanssa. Tuote kannattaa suunnitella siis siten, että mikäli sisään pääsee vettä, sen ei anneta päästä kyseisille alueille.

Kondensationvedelle voidaan rakentaa reitti, mitä pitkin se pääsee valumaan kylmiltä pinnoilta vaikkapa laitteen pohjalle turvallisesti. Samalla virtapiirit kannattaa pitää irti pohjasta. Lämpö siirtyy ilmassa tiheyserojen ajamana yläosiin, mutta mikäli katto-osa jää silti viileäksi, voi siitä tippua kondensioivettä alas virtapiirille. Sen estämiseksi yläosa voidaan muotoilla viistoksi, jotta vesi valuu sitä pitkin hallitus-

ti seinämiin. Niitä pitkin vesi voidaan johdattaa alas asti kondensiovesikaukaloihin, ja mahdollisesti poistoletkun kautta ulos systeemistä. Toisaalta vedelle alttiit osat voitaisiin suojata myös lämpimämmällä välikatoksella, mutta se ei edellä mainitun suojauksen jälkeen ole tarpeen.

Vaikka yleensä kylmimmät pinnat jäävätkin tuotteen kuoreen, saattaa sellaisia löytyä myös virtapiiristä. Kannattaakin varmistaa, ettei mikään piirillä kiinni oleva osa jää liian kylmäksi kondensoitumisalustaksi suhteessa muihin osiin. Esimerkiksi sisäiset jäähdytyselementit ovat alttiita kondensaatiolle. Yksi tärkeä kondensoitumista vastaan käytetty suojaus on piirilevyjen suojaus hydrofobisella pinnoitteella. Usein käytetään erilaisia oksidikerroksia, jotka eivät ole poolisia eivätkä siten vedä poolista vettä puoleensa. Lisäksi sellaiset suojaavat myös pölyltä, mikä vähentää palonsyttymisriskejä. Pinnoittamattomat metallit vetävät hieman hydrofilisinä pintoina vettä puoleensa, vaikkei niillä olekaan vastaavaa kemiallista polaarisuutta. Niissä vetovoiman aiheuttavat dispersiivoimat, joiden myötä vesi levittäytyy kattavasti koko metallialueen pinnalle [13].

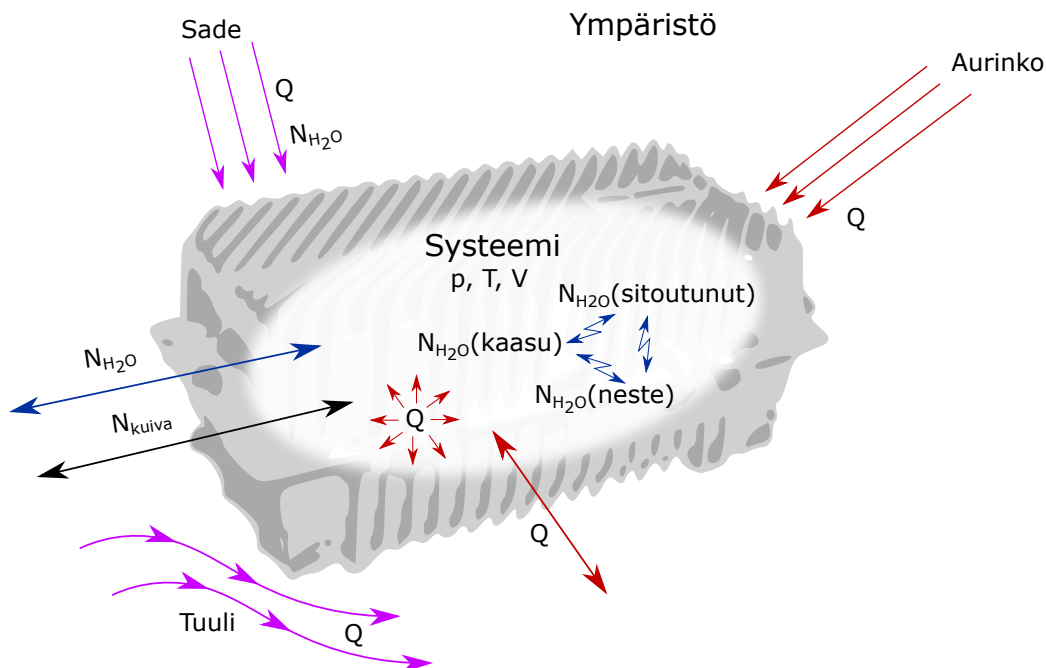
Hyvin hydrofobisten (engl. Super hydrophobic, SHO) pintojen, joilla vesipisara muodostaa yli 150° kontaktikulman pinnan kanssa, käyttö on hieman yleistynyt mm. mobiililaitteissa. SHO-pinnoitteella luvataan usein jopa 30 min käyttöaika veden alla, korkeintaan 1,5 m syvyydessä. Niiden valmistus on kuitenkin toistaiseksi melko kuormittavaa ympäristölle, eikä niitä siten käytetä vielä suuremmassa mittakaavassa laajasta käyttökohteiden kirjosta huolimatta [13].

5 Kotelon tiiveyden määrittäminen lämpötilasta ja ilmankosteudesta

5.1 Teoreettinen malli

5.1.1 Vuodot ympäristön ja systeemin välillä

Systeemin muodosti tässä tutkimuksessa ICON-nimisen kuitusolmutuotteen sisäosa ja koko ulkokuori. Systeemi, sen tärkeimmät fysikaaliset suureet ja niihin vaikuttavat tekijät on koottu yhteen havainnekuvassa 4. Siinä Q viittaa lämpöön, jota syntyy ICON:in sisällä ja siirtyy johtumalla kuoren ja ympäristön välillä. Samoin kuivaa ilmaa n_{kuiva} ja kosteutta n_{H_2O} liikkuu diffuusiona. Se on hiukkasten siirtymistä paikasta toiseen missä tahansa faasissa satunnaiskulkuna, johon vaikuttaa konsentraatiogradientti. Kosteus voi systeemissä esiintyä edelleen piirilevyyn ja tiivistisiin sitoutuneena, nestepisaroina ja kaasuna ilmassa. Näiden osuudet reagoivat systeemin



Kuva 4: Systeemi, sen tilanmuuttujat ja niihin vaikuttavat tekijät.

tilanmuuttujien vaihteluihin ja hakeutuvat jatkuvasti kohti uutta tasapainoa.

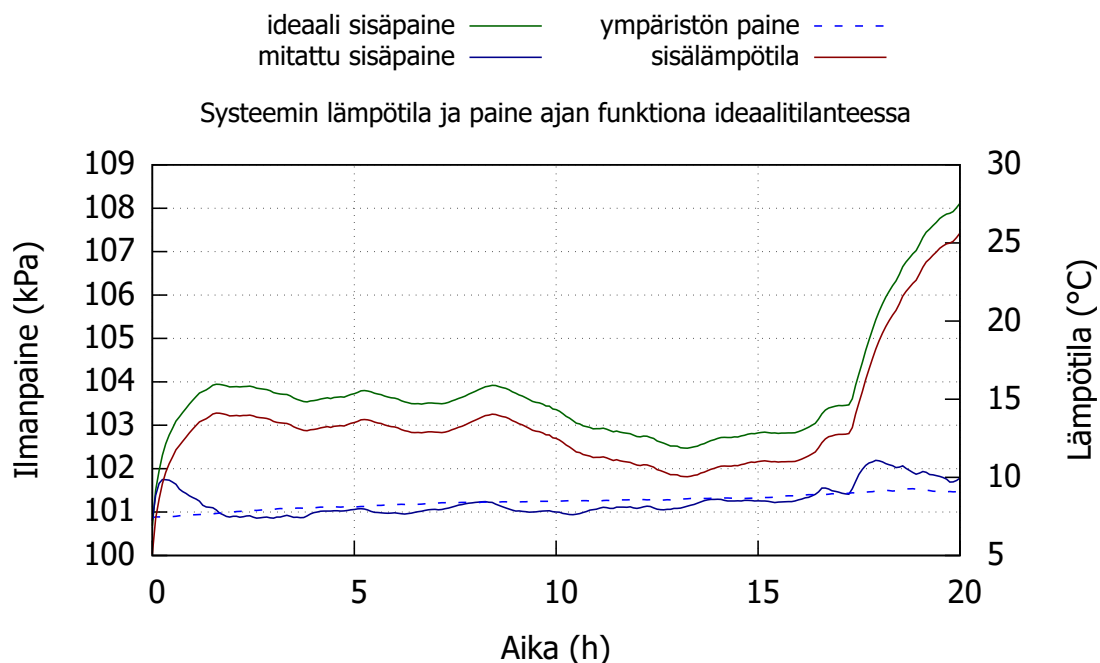
Mikäli ICON olisi täysin suljettu systeemi, ei sen ja ympäristön välillä siirtyisi muuta kuin lämpöä. Ideaalitilanteessa tämä tarkoittaisi, että ideaalikaasun tilanyhtälössä (1) ainoat muuttuvat parametrit olisivat toisiinsa suoraan verrannolliset paine p ja lämpötila T , jolloin paine laskettaisiin suoraan kaavasta

$$p = \frac{p_0}{T_0} \cdot T, \quad (14)$$

missä p_0 ja T_0 ovat paineen ja lämpötilan arvot alkuhetkellä.

Ideaalitilanteessa voitaisiin mitata ajan funktiona esimerkiksi kuvan 5 mukaiset käyrät lämpötilalle ja siitä ideaalisesti riippuvalle kaavalla (14) lasketulle paineelle. Kuvassa näkyy myös todellinen sisäpaine, joka poikkesi selvästi ideaalitilanteesta.

Ideaalitilanteessa sisäpaine kasvaisi ylipaineeksi samaa tahtia kuin lämpötilakin laitteen käynnistyttyä. Todellisuudessa sisäpaine pyrkii tasoittumaan kohti ympäristön ilmanpainetta, mikä todistaa painevuodon. Itse asiassa kuvan 5 mukaan sisä- ja ulkopaine näyttäisivät olevan hetkellisesti tasapainossa tilanteessa, jossa sisäanturi näyttää hieman ulkoanturia pienempää arvoa. Näin käy kuvaajassa aikavälillä 15 h



Kuva 5: Esimerkkimittaus, joka osoittaa systeemin vuotavan painetta.

$\leq t \leq 16$ h, jolloin lämpötila pysyy lähes vakiona. Tämä johtuu painemittareiden välisestä pienestä kalibrointierosta.

Vaikka ICON olisi likimain suljettu, kosteutta voi siirtyä systeemin sisäilmaan monilla eri mekanismeilla. Kuten vesihöyryäkin, myös kuivaa ilmaa voi jotain reittiä pitkin vuotaa ympäristöstä systeemiin, mikä myös vaikuttaa systeemin tilaan. Yksinkertaisimmin vuoto voidaan havaita paineen muutoksena systeemissä ilman että se johtuisi systeemin lämpötilanmuutoksesta. Toisin sanoen ideaalikaasun tilanyhtälö (1) saadaan pitämään paikkaansa vain, jos systeemiin tuodaan lisää kaasua, eli jos systeemissä hiukkasmäärän muutos

$$\Delta n = \Delta \frac{pV}{RT} \quad (15)$$

poikkeaa nolasta. Lyhyellä aikavälillä varsinkin lämpötilan muuttuessa nopeasti on oletettavissa mittareista aiheutuvaa kohinaa, joten tarkemman tuloksen saamiseksi muutosta kannattaa seurata pidemmällä aikavälillä.

Pelkästä kaasun ainemäärän muutoksesta ja paineen tasautumisesta ei voida sanoa, kuinka suuri osa siitä aiheutui kosteuden siirtymisestä, tai miten kosteutta siirtyi. Kuiva ilma ja vesihöyry vuotavat systeemin ja ympäristön välillä diffuusiona eri nopeuksilla, sillä niiden konsentraatiogradientit ja osapaineet ovat erit, ja diffuusio riippuu muistakin diffusoituvan aineen ominaisuuksista. Näitä käsitellään

tarkemmin myöhemmin. Siten kaavalla (15) voidaan määrittää vain ilmaseoksen ainemäärän muutosnopeus kokonaisuudessaan. Senkin arvo voi vaihdella epälineaarisesti, kun osa ilman kaasukomponenteista saavuttaa tasapainonsa nopeammin kuin toiset.

On hyvin mahdollista, että systeemin ja ympäristön rajapinnassa olevassa kuorella on mikrohalkeamia. Ne mahdollistavat kapillaari-ilmion ja siten veden nopean imeytymisen syvemmälle kuoreen ja sen läpi. Myös materiaalien rajapinnat, esimerkiksi tiivistetyissä alueissa ja läpiviennissä, tarjoavat helposti mikrotasolla kanavia, joita pitkin kosteus kulkeutuu sisään tai ulos. Ne voivat toimia myös hyvinä kondensoitumispintoina. Vesihöyry voi myös diffuusoitua läpi kaikista vähänkään huokoisista materiaaleista, joiden rakenteeseen taipuu vähintään vesimolekyylin suuruisia kulkureittejä. Sitä, kuinka nopeasti diffuusiota tapahtuu, on kuitenkin suhteellisen haastavaa mallintaa tarkasti, sillä se riippuu monesta eri tekijästä [7].

Ohuissa materiaaleissa, kuten muovikalvoissa, kosteus diffuusoituu suhteellisen nopeasti kalvon läpi korkeammasta pitoisuudesta pienempään, kunnes kemiallinen tasapaino saavutetaan. Paksumpien kappaleiden läpäisy kestää huomattavasti pidempään, sillä kosteuden tasapainon saavuttamiseen kuluva aika on suoraan verrannollinen kappaleen paksuuden neliöön. Monissa tapauksissa tähän voi kulua jopa useita vuosia [7].

Diffuusionopeutta seinämän läpi, eli absorptio- ja desorptionopeutta, kasvattaa suuremmat konsentraatioerot seinämän eri puolilla, ohuempi läpäistävä seinämä, korkeampi lämpötila ja diffuusoituvien hiukkasten pienempi koko. Vesimolekyylit ovat tyypillisesti ulkoilman pienimpiä hiukkasia, joten ne läpäisevät lähes kaiken minkä kuiva ilmakin läpäisee. Lisäksi materiaalille ominainen läpäistävyys ja läpi kulkeutuvien hiukkasten kemia vaikuttavat diffuusion nopeuteen [17].

Edellä luetellut ominaisuudet eivät suinkaan ole yksiselitteisiä, vaan voivat vielä reagoida seinämään imeytyneen kosteusmäärän muutokseen. Kosteuden adsorptio pinnalla ja absorptio syvemmällä saattavat nimittäin aiheuttaa materiaaliin reversiibeileitä tai kemiallisia irreversiibeileitä muutoksia, kuten korroosiota. Lisäksi osmoosi ja seinämän turpoaminen ovat mahdollisia materiaalista riippuen [7].

Korkean lämpötilan lisäksi myös lämmön gradientti läpäistävissä seinämässä edesauttaa aineen diffuusiota. Jos kuoren sisäpinta on lämpimämpi kuin ulkopinta, termien diffuusio pyrkii muodostamaan termisen tasapainon siirtämällä lämpöä diffuusoituvilla hiukkasilla lähemmäs viileätä ympäristöä. Tämä johtaa suurempimassaisten hiukkasten diffuusoitumiseen kohti viileyttä ja kevyempien hiukkasten diffuusioon lämpöä kohti. Vesimolekyylit pienen kokonsa vuoksi ajautuvat siten läm-

pöä kohti, vaikka se johtaisi konsentraatio- ja osapaine-eron kasvamiseen [18].

Mikrotasolla termien diffuusio perustuu massan lisäksi mm. hiukkasen, kokoon ja hiukkasten välisiin vuorovaikutuksiin [18]. Yksinkertaistaen, poispyrkivät pienimassaiset vesimolekyylit kimpoavat suurempimassaisista typpi-, ja happimolekyyleistä takaisin korkeamman paineen suuntaan pienen liikemääränsä vuoksi.

Termistä diffuusionopeutta pinta-alayksikön läpi kuvataan kaavalla

$$\frac{dJ}{dt} = -D \frac{k_T c}{T} \frac{dT}{dx}, \quad (16)$$

missä D on diffuusiokerroin, T lämpötila, c diffusoituvan aineen konsentraatio, $\frac{dT}{dx}$ lämpötilan gradientti ja k_T termien diffuusiosuhde, joka riippuu mm. diffusoituvien molekyylien kokosuhteista ja lämpötilasta. Termien diffuusion voimakkuus on siis suoraan verrannollinen lämpötilagradientin ja lämpötilan suhteeseen, joten suuremmissa lämpötiloissa saman gradientin vaikutus on pienempi [18]. Siten se havaitaan parhaiten kylmissä olosuhteissa.

Kokonaisdiffuusio on termien (16) ja kemiallisen (4) diffuusion summa:

$$\frac{dJ}{dt}_{\text{kokonais}} = \frac{dJ}{dt}_{\text{kemiallinen}} + \frac{dJ}{dt}_{\text{termien}} = -D \left(\frac{dc}{dx} + \frac{k_T}{T} \frac{dT}{dx} \right).$$

Tilanteessa, jossa paine-ero systeemin ja ympäristön välillä johtuu lämpötilan muutoksesta, paineen ja lämpötilan gradientit ovat samansuuntaiset. Tällöin termien diffuusio voi vaimentaa vesihöyryn ja voimistaa kuivan ilman kemiallista diffuusiota.

Tässä tutkimuksessa termien diffuusion oletettiin pysyvän pienenä verrattuna kosteuskonsentraation diffuusioon, sillä alumiinikuori tasoittaa lämpögradientit melko nopeasti johtaen lämpöä ICON:in ja ympäristön välillä. Seuraavaksi pohditaan vain kemiallisen diffuusion voimakkuutta ympäristön ja systeemin välillä ICON:in tapauksessa.

Alumiinikuori on hyvin tiivis, eikä vesi pääse juurikaan diffusoitumaan sen läpi. Jo pelkkä alumiinifolio estää hyvin diffuusion [17], joten ICON:in noin senttimetrin paksuisen alumiinikuoren läpäisy on erittäin vaivalloista. Tiivisteet sen sijaan ovat huokoisempaa materiaalia, silikonia, joten suurin diffuusio tapahtuu niiden läpi. Myös läpiviennit voivat vuotaa sekä läpi vietyjen johtojen sisäosista että kiinnityksen ulkopuolelta. Kiinnitys oli tehty kierteillä, ja niitä tiivistävinä materiaaleina oli käytetty NBR-, eli nitrilikumitiivisteitä sekä liitosrasvaa. Vaikka diffuusion simulointi huokoisten tiivisteiden läpi onkin suoraviivaista, diffuusiolakiin (2) sellaisenaan on hankalaa sijoittaa mitattavia koetuloksia.

Muuttujan dJ suuruutta ei pystytä suoraan mittaamaan. Se voidaan kuitenkin esittää ainemäärän muutoksen suhteena poikkipinta-alaan, jonka diffusoituvat

hiukkaset läpäisevät:

$$dJ = \frac{dn}{A}. \quad (17)$$

Jos systeemin sisäilman ainemäärämuutos ja vuotokohdan pinta-ala ovat tiedossa, voidaan niistä laskea vuoto, eli diffuusio ympäristöstä systeemiin. Ainemäärämuutos dn lasketaan paineen ja lämpötilan suhteen muutoksen perusteella kaavalla (15). Näin saadaan kostean ilman ainemäärän muutosnopeudeksi

$$\frac{dn}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{p}{T} \right) \cdot \frac{V}{R}. \quad (18)$$

Sisäpaineen ja -lämpötilan muutoksista ajan suhteen voidaan yhtälöllä (18) määrittää kostean ilmaseoksen ainemäärän muutosnopeus ICON:in sisällä systeemin ja ympäristön paine-eron funktiona. Se ei silti yksinään kerro vuotoa, sillä absoluuttiseenkin kosteuteen vaikuttaa moni muukin tekijä samaan aikaan, kun sitä vuotaa kuivan ilman mukana ympäristön ja ICON:in välillä. Kuivan ilman konsentraatioon sen sijaan vaikuttaa käytännössä vain vuoto. Siten kuivan ilman vuotonopeus voidaan kaavojen (1) ja (5) perusteella määrittää ICON:ille ilmaseoksen ja kosteuden muutosnopeuksien erotuksena

$$\frac{dn}{dt}_{\text{kuiva ilma}} = \frac{dn}{dt}_{\text{ilmaseos}} - \frac{dn}{dt}_{\text{kosteus}}. \quad (19)$$

Kosteuden ainemäärä ilmaistiin absoluuttisen kosteuden avulla kaavalla (11), jolloin kaavoista (18) ja (19) saatiin

$$\frac{dn}{dt}_{\text{kuiva ilma}} = \frac{V}{R} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{p_{\text{sisä}}}{T_{\text{sisä}}} \right) - \frac{V}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot \frac{dAH}{dt},$$

josta kuivan ilman vuotonopeudeksi tilavuusyksikköä kohden, eli konsentraatiomuutokseksi, saatiin

$$\frac{dc}{dt}_{\text{kuiva ilma}} = \frac{1}{R} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{p_{\text{sisä}}}{T_{\text{sisä}}} \right) - \frac{1}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot \frac{dAH}{dt}. \quad (20)$$

Paineet ja lämpötilat saadaan mittauksista, ja $\frac{dAH}{dt}$ lasketaan suoraan yhtälöstä (9).

Vesihöyryn tapauksessa vuoto $dn_{\text{H}_2\text{O}}$ voidaan ilmaista edelleen helpommin ymmärrettävän muuttujan - absoluuttisen kosteuden - muutoksena käyttäen kaavaa (11). Siten yhtälö (17) saadaan muotoon

$$\begin{aligned} dJ_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{dn_{\text{H}_2\text{O}}}{A} \\ &= \frac{V}{AM_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot dAH. \end{aligned} \quad (21)$$

Absoluuttinen kosteus AH voidaan laskea lämpötiloista ja ilmankosteuksista kaavalla (9)

Diffuusion mallinnusta voidaan approksimoida siten, että kosteuskonsentraation oletetaan koko ajan olevan lineaarinen matkalla paikasta x_1 suuremman konsentraation pisteeseen x_2 . Tämä näytettiin myös kuvassa 2. Siten konsentraatiogradientti voidaan esittää vakiona koko läpäistävän materiaalin paksuudella Δx :

$$\frac{dc_{\text{H}_2\text{O}}}{dx} \approx \frac{c_{\text{H}_2\text{O}}(x_2) - c_{\text{H}_2\text{O}}(x_1)}{\Delta x}. \quad (22)$$

Tällä oletuksella Fickin ensimmäinen diffuusiolaki (2) voidaan esittää yhtälöillä (21) ja (22) ainemäärämuutosnopeutena muodossa

$$\frac{dAH}{dt} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{V} \frac{DA}{\Delta x} \cdot [c_{\text{H}_2\text{O}}(x_1) - c_{\text{H}_2\text{O}}(x_2)]. \quad (23)$$

Aiemmin kaavassa esiintyneestä miinusmerkistä päästiin eroon kääntämällä konsentraatioiden erotus. Nimetään selkeyden vuoksi uusi muuttuja

$$X \equiv \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{V} \frac{DA}{\Delta x}, \quad (24)$$

joka kuvaa veden diffuusionopeutta tietyn kappaleen sisällä. X on vakio, jos myös muuttujat D , A ja Δx pysyvät kappaleessa vakioina. Ilman absoluuttisen kosteuden muutosnopeus $\frac{dAH}{dt}$ on X :llä ilmaisten

$$\frac{dAH}{dt} = X \cdot [c_{\text{H}_2\text{O}}(x_1) - c_{\text{H}_2\text{O}}(x_2)]. \quad (25)$$

Tällä tavoin esitettynä kosteuden diffuusio systeemin ja ympäristön välillä tiivisteiden läpi Henryn lakia (4) hyödyntäen on

$$\begin{aligned} \frac{dAH}{dt}_{\text{tiiviste}} &= \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{V} \frac{D_{\text{tiiviste}} A_{\text{tiiviste}}}{\Delta x_{\text{tiiviste}}} \cdot (c_{\text{H}_2\text{O}, \text{ulkopinta}} - c_{\text{H}_2\text{O}, \text{sisäpinta}}) \\ &= X_{\text{tiiviste}} \cdot S_{\text{tiiviste}} \cdot (p_{\text{H}_2\text{O}, \text{ulko}} - p_{\text{H}_2\text{O}, \text{sisä}}). \end{aligned} \quad (26)$$

Vesihöyryn paine lasketaan ilman suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta kaavalla (7), eli $p_{\text{H}_2\text{O}, \text{sisä}} = RH_{\text{sisä}} \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}^*(T_{\text{sisä}})$ ja $p_{\text{H}_2\text{O}, \text{ulko}} = RH_{\text{ulko}} \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}^*(T_{\text{ulko}})$.

Koska diffuusio on suoraan verrannollinen läpäistävien materiaalien poikkipinta-alaan, eri pintoja läpäisevät diffuusiovaikutukset systeemiin summautuivat keskenään. $AH \sim J$, joten myös absoluuttisen kosteuden muutosnopeudet (25) ovat additiivisia:

$$\begin{aligned} \frac{dAH}{dt}_{\text{kaikki}} &= \sum_i \left(X_i \cdot (c_{\text{H}_2\text{O}, x_i} - c_{\text{H}_2\text{O}, \text{systemi}}) \right) \\ &= \sum_i (X_i \cdot c_{\text{H}_2\text{O}, x_i}) - c_{\text{H}_2\text{O}, \text{systemi}} \cdot \sum_i X_i. \end{aligned} \quad (27)$$

Kaikki absoluuttista kosteutta muuttavat termit voitiin siis lopulta summata helposti yhteen.

Absoluuttista kosteutta muuttivat vuodot sekä tiivisteen että mikrorakojen läpi. Mikrorakojenkin vaikutusta voitiin mallintaa diffuusion kaavalla (2), sillä kaasut siirtyivät niidenkin kautta saman diffuusio-ilmion takia, vaikkakin helpommin kuin tiheään molekyyli-rakenteen lävitse. Tässä tutkimuksessa oltiin kiinnostuneita vuotojen yhteisvaikutuksesta, joten vuoto nopeudeksi summattiin yhtälön (27) avulla

$$\begin{aligned} \frac{dAH}{dt}_{\text{vuoto}} &= \frac{dAH}{dt}_{\text{tiiviste}} + \sum \frac{dAH}{dt}_{\text{rako}} \\ &= (X_{\text{tiiviste}} + X_{\text{raot}}) \cdot (c_{\text{H}_2\text{O}, \text{ulkopinta}} - c_{\text{H}_2\text{O}, \text{sisäpinta}}) \\ &= X_{\text{vuoto}} \cdot S_{\text{tiiviste}} \cdot (p_{\text{H}_2\text{O}, \text{ulko}} - p_{\text{H}_2\text{O}, \text{sisä}}). \end{aligned} \quad (28)$$

Etsimällä mittausdatasta ajanjakson, jossa ympäristöolosuhteet ja siten myös $p_{\text{H}_2\text{O}, \text{ulko}}$ pysyvät likimain muuttumattomina, voidaan ajanjaksoon sovittaa suoran yhtälö

$$\frac{dAH}{dt} = C_1 \cdot p_{\text{H}_2\text{O}, \text{sisä}} + C_0. \quad (29)$$

Silloin funktion $\frac{dAH}{dt}(p_{\text{H}_2\text{O}, \text{sisä}})$ kulmakerroin $C_1 = -X_{\text{vuoto}}S_{\text{tiiviste}}$ ja pystyakselin leikkauspiste $C_0 = X_{\text{vuoto}}S_{\text{tiiviste}}p_{\text{H}_2\text{O}, \text{ulko}}$. Jos suoraa ei muodostu, täytyy $c_{\text{H}_2\text{O}, \text{ulkopinta}}$, $c_{\text{H}_2\text{O}, \text{sisäpinta}}$, S_{tiiviste} tai D -kertoimien muuttua alkuoletusten vastaisesti, tai sitten systeemin vesihöyrykonsentraatioon AH vaikuttaa jokin muukin ilmiö. Yksi mahdollinen tekijä on ICON:in kiinteisiin osiin sitoutuneen veden desorptio ilmaan systeemissä.

5.1.2 Sitoutuneen veden desorptio

ICON:issa on tiiviin metallin lisäksi myös huokoisia materiaaleja, ja niihin on todennäköisesti ajan saatossa absorboitunut kosteutta. Tällaisia ovat erityisesti piirilevyt ja tiivistet.

Piirilevy voi sisältää paljonkin kosteutta. Sitä voi olla jo valmiina piirilevyn valmistusvaiheessa käytetyissä materiaaleissa, tai sitä voi imeytyä kesken valmistuksen ja erityisesti tämän jälkeen varasto-olosuhteissa. Piirilevyjä on erityyppisiä, kuten keraamisia, silikoni-hartsia-, fenoli- ja epoksi-lasikuitusubstraatteja. Lasikuituun perustuvat ovat näistä yleisimpiä. Lisäksi levyihin seostetaan muita aineita mm. paloturvallisuuden ja mekaanisen rasitussietokyvyn parantamiseksi. Substraattien pinnalle lisätään metallikontaktit ja johdeväylät, jotka ovat yleensä kuparia. Metallikerroksia on usein useita, ja niiden välillä on substraattimateriaalia. Päälimmäisenä

on vielä suojakerros, joka torjuu metallien hapettumista ja piirin kostumista. Imeytynyt kosteus sijaitsee yleensä polaarissa hartsissa, sen ja lasikuidun rajapinnoilla sekä mikrohalkeamissa [19].

Kosteuden desorptiota piirilevystä systeemin sisäilmaan alkaa tapahtua, kun RH on piirilevyn materiaalikohtaista veden aktiivisuutta A_w pienempi. Kun $RH = A_w$, veden osapaine on sama sekä ilmassa että kiinteän materiaalin sisällä. Jos taas $RH > A_w$, materiaali absorboi kosteutta itseensä, ellei se ole jo kyllästetty vedestä [5]. Sekä absorptio että desorptio voidaan selittää vesimolekyylien diffuusiona kiinteän materiaalin sisällä sekä pinnan ja kaasun välillä. Näistä kahdesta nopeutta rajoittaa eniten materiaalin sisäinen diffuusio, joka voi olla hyvinkin hidaskäyttöprosessi [10].

ICON:in tapauksessa desorptiota kiihdyttää eksponentiaalisesti piirilevyn reilu lämpeneminen verrannollisuuden (3) mukaisesti. Siltikin kosteuden desorptio haluttuun prosenttiosuuteen kestää pitkään: levyjen kuivatuksessa 125 °C kuumakäsittelyssäkin on kyse sadoista tunteista [10].

Piirilevyjen kerrosrakenne on yksi diffuusiota hidastava tekijä. Levy koostuu FR-4 komposiittimateriaalista sekä kuparilevyistä. Diffuusio metallien läpi on erittäin hankalaa, joten vesi jää niin ikään jumiin kupareiden väliin. Käytännössä vesi joutuu tällöin kulkemaan moninkertaisen matkan FR-4 komposiitissa päästäkseen desorptoitumaan ilmaan [10]. Fickin ensimmäisen diffuusiolain (2) mukaisesti jo diffusioitumismatkan x kaksinkertaistuminen puolittaa diffuusionopeuden, jolloin matkaan kuluva aika kaksinkertaistuu. Tämän perusteella kosteuden poistumista voidaan nopeuttaa merkittävästi kasvattamalla kuparilevyjä läpäisevien reikien tiheyttä ja suuruutta [10].

FR-4 tyyppisellä piirilevymateriaalilla veden diffuusiokertoimelle on käytetty joissain kuivatussimulaatioissa arvoa $0,25 \mu\text{m}^2\text{s}^{-1}$ lämpötilassa 20 °C. 125 °C lämpötilassa arvo on jo $33 \mu\text{m}^2\text{s}^{-1}$ [10]. Artikkelin [19] kokeissa tyyppin FR-4 piirilevyillä laskettiin diffuusiokertoimelle 50 °C lämpötilassa arvoja väliltä $0,7 - 0,9 \mu\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ympäristön kosteuden ollessa 50 % ja $0,9 - 1,3 \mu\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ilmankosteudella 85 %. Näissä siis tutkittiin veden absorboitumista, eikä se anna niin hyvää kuvaa desorptioon liittyvästä diffuusiosta kuin edellisen artikkelin kertoimet pintakerrosten nopeamasta kostumisesta ja epätasaisesta kosteusgradientista johtuen. Tässä tutkielmassa tehdyissä kokeissa lämpötila tosin oli korkeimmillaankin alle 60 °C. Näiden perusteella piirilevyn diffuusiokertoimen voitiin tässä olettaa olevan suuruusluokaltaan $0,1 \leq D_{\text{PCB}} \leq 10 \mu\text{m}^2\text{s}^{-1}$.

Desorptionopeutta piirilevyn keskeltä sen ulkopintaa kohti voitiin mallintaa diffuusiokaavalla (23). Koska sitoutunutta kosteutta poistui samanaikaisesti levyn mo-

lemmilta puolilta, käytettiin kaavassa diffuusiomatkana $\Delta x_{\text{piirilevy}}$ puolta levyn paksuudesta. Pinta-ala $A_{\text{piirilevy}}$ tarkoittaa levyn molempien puolien yhteenlaskettua pinta-alaa. $c_{\text{H}_2\text{O}, \text{piirilevy}}$ oli kosteuskonsentraatio piirilevyn keskellä, ja $c_{\text{H}_2\text{O}, \text{levypinta}}$ oli sisäilman vesihöyryn osapaineen kanssa tasapainossa oleva konsentraatio piirilevyn pinnalla. Näin saatiin piirilevyyn sitoutuneen veden desorptionopeuden yhtälö, ja se sievennettiin muuttujaksi $X_{\text{piirilevy}}$ kaavalla (24):

$$\begin{aligned} \frac{dAH}{dt}_{\text{piirilevy}} &= \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{V} \cdot \left(\frac{D_{\text{piirilevy}} \cdot A_{\text{piirilevy}}}{\Delta x_{\text{piirilevy}}} \right) \cdot (c_{\text{H}_2\text{O}, \text{piirilevy}} - c_{\text{H}_2\text{O}, \text{levypinta}}) \\ &= X_{\text{piirilevy}} \cdot \left(c_{\text{H}_2\text{O}, \text{piirilevy}} - S_{\text{piirilevy}} p_{\text{H}_2\text{O}, \text{sisä}} \right) \\ &= -X_{\text{piirilevy}} S_{\text{piirilevy}} p_{\text{H}_2\text{O}, \text{sisä}} + X_{\text{piirilevy}} c_{\text{H}_2\text{O}, \text{piirilevy}}. \end{aligned} \quad (30)$$

Todellisuudessa konsentraatiogradientti ei ollut aina tasainen, vaikka edeltävässä yhtälössä niin oletettiin. Kun piirilevy absorboi kosteutta, levyn keskikohta reagoi kosteusmuutoksiin viimeisenä ja hitaimmin verrattuna kerroksiin lähempänä pintaa. Siten tilanteessa $RH < A_w$ suurin kosteuskonsentraatio saattoi pitkään olla lähellä pintaa ja desorptio odotettua nopeammin, ennen kuin konsentraatiogradientti tasoittui enemmän suoraksi. Parhaiten funktion $\frac{dAH}{dt}(p_{\text{H}_2\text{O}, \text{sisä}})$ pitäisi muistuttaa suoraa silloin, kun RH on ollut pitkään piirilevyn A_w -arvoa matalampi, eli yhtäjaksoista desorptiota on kestänyt kauan [10]. Absorptiota ICON:in piirilevyssä ei pitäisi normaalisti juurikaan tapahtua, sillä sisälämpötila oli ympäristön lämpötilaa huomattavasti suurempi, minkä vuoksi RH oli pienempi.

Kun otettiin huomioon vuodot ympäristöstä kaavalla (28) ja desorptio piirilevystä (30), saatiin absoluuttisen kosteuden muutosnopeudeksi

$$\begin{aligned} \frac{dAH}{dt} &= \frac{dAH}{dt}_{\text{vuoto}} + \frac{dAH}{dt}_{\text{piirilevy}} \\ &= -(X_{\text{vuoto}} S_{\text{tiivistite}} + X_{\text{piirilevy}} S_{\text{piirilevy}}) \cdot p_{\text{H}_2\text{O}, \text{sisä}} \\ &\quad + X_{\text{vuoto}} S_{\text{tiivistite}} p_{\text{H}_2\text{O}, \text{ulko}} + X_{\text{piirilevy}} c_{\text{H}_2\text{O}, \text{piirilevy}} \end{aligned} \quad (31)$$

Systeemin rakenteisiin sitoutuneen veden desorptionopeus pysyy hitautensa vuoksi pitkään tasaisena, eikä siten poikkeuta suoraa $\frac{dAH}{dt}(p_{\text{H}_2\text{O}, \text{sisä}})$. Mittauksissa voitiin kuitenkin havaita nopeitakin poikkeamia, ja niihin voi löytyä selitys veden olomuodonmuutoksista systeemin sisällä.

5.1.3 Veden haihtuminen ja kondensoituminen

Haihtuminen tarkoittaa vesimolekyylien poistumista nesteestä yläpuoliseen kaasuun höyrystymällä. Sen nopeus on suoraan verrannollinen absoluuttisen kosteuden gra-

dienttiin ilmassa aina pisaran pinnalta lähtien sekä ilman vaihtuvuuteen, kuten tuuleen, faasien rajapinnassa. ICON:in sisällä ei selkeästikään tuule, joten siellä ilman vaihtuminen oli rajoittunut pelkkään diffuusion [20]. Täten haihtumisnopeuttakin voitiin mallintaa diffuusion kaavalla (2). Haihtumisella on kuitenkin kaksi suurta eroavaisuutta verrattuna aiempiin diffuusiolla mallinnettuihin ilmiöihin.

Suurimpana erona aiempiin ilmiöihin verrattuna, pienen nestemäärän haihtumisessa diffuusiogradientti ei ole aina esitettävissä yhdessä ulottuvuudessa $\frac{dc_{\text{H}_2\text{O}}}{dx}$. ICON:in sisään voi päätyä nestemäistä vettä vain kondensiona tai kannen ollessa auki esimerkiksi vesisateessa, joten veden määrä ICON:issa oli minimaalinen. Siten se esiintyi vain pisaroina. Niistä haihtuva kosteus diffusoitui eri puolille kolmessa ulottuvuudessa, sillä kosteusgradientti on $\nabla c_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{dc_{\text{H}_2\text{O}}}{dx} + \frac{dc_{\text{H}_2\text{O}}}{dy} + \frac{dc_{\text{H}_2\text{O}}}{dz}$.

Toinen suuri poikkeavuus aiempiin diffuusioliöihin verrattuna oli se, että faasirajan pinta-ala ei pysynyt vakiona - veden haihtuminen kutisti pisaroita jatkuvasti. Artikkelissa [21] on määritetty kokeellisesti, että pienen pisaran haihtumisnopeus on suoraan verrannollinen sen säteeseen:

$$\frac{dAH}{dt}_{\text{haihtuva}} \sim \frac{dn}{dt}_{\text{haihtuva}} \sim \frac{A_{\text{pisara}}}{dx_{\text{haihtuva}}} \sim \frac{R_{\text{pisara}}^2}{R_{\text{pisara}}} = R_{\text{pisara}}. \quad (32)$$

Kylläisen ilman kosteuskonsentraatio saatiin sijoittamalla absoluuttisen kosteuden laskukaava (9) konsentraation yhtälöön (12):

$$c_{\text{H}_2\text{O}, \text{kylläinen}}(T) = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^*(T)}{RT}. \quad (33)$$

Merkitseväällä $X_{\text{haihtuva}}(t) \equiv \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{V} D_{\text{haihtuva}} \cdot R_{\text{pisara}}(t)$ haihtumisnopeus voitiin yhtälön (33) ja verrannon (32) avulla esittää muodossa

$$\begin{aligned} \frac{dAH}{dt}_{\text{haihtuva}}(t) &= \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{V} D_{\text{haihtuva}} \cdot R_{\text{pisara}}(t) \cdot [c_{\text{H}_2\text{O}, \text{kylläinen}}(T_{\text{pisara}}) - c_{\text{H}_2\text{O}, \text{sisäilma}}] \\ &= X_{\text{haihtuva}}(t) \cdot \left[\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^*(T_{\text{pisara}})}{RT_{\text{pisara}}} - \frac{p_{\text{H}_2\text{O}, \text{sisä}}}{RT_{\text{sisä}}} \right]. \end{aligned} \quad (34)$$

Kokeellisissa mittauksissa, joissa haihtuminen tehostuu lämmityksellä ja joissa AH muuttuu paljonkin, haihtumisnopeus (34) on parempi ilmaista epämääräisesti ajan funktiosta $R_{\text{pisara}}(t)$ riippuvana terminä.

Haihtumisnopeuden kannalta on myös merkityksellistä, onko haihtuva vesi hydrofiilisella vai hydrofobisella pinnalla. Alumiinikuoren havaittiin olevan hydrofobinen, sillä sen pintaan muodostui suuriakin vesipisaroita melko suurella kontaktikulmalla pintaan nähden - pisarat muistuttivat puolipalloja. Tällöin pisaroiden ala on pieni, ja niistä haihtuu vettä hitaampaa kuin haihtuisi hydrofiiliselta pinnalta, johon vesi levittäytyisi ohuemmaksi kerrokseksi.

Veden kondensoituminen on myös ilmiö, jonka vauhtia rajoittaa vesihöyryn diffuusio ilmassa. Erona edelliseen, kondensoituminen tapahtuu viileillä alueilla, kun taas haihtuminen on runsainta lämpimillä pinnoilla. Molemmat voivat tapahtua samanaikaisesti eri puolilla ICON:ia, mikäli systeemissä on suuri RH ja viileitä pintoja. Kondensoituminen ei myöskään ole niin lokaalia kuin pisaroiden haihtuminen. kondensoitumista tapahtuu samanaikaisesti koko viileän pinnan alueella eikä vain pisteittäin. Siten kondensoitumisnopeus ei riipu pisaroiden säteistä, vaan kastepistettä viileämmän pinnan alasta $A_{\text{viileä}}(t)$. Sen laajuus kuitenkin vaihtelee paljonkin ajan kuluessa, eikä sille kannata laatia kaavaa.

Kondensaation nopeutta voidaan jälleen mallintaa diffuusion kautta Fickin lailla (2), johon sisältyy pinta-alariippuvuus. Tässä konsentraatioina käytetään kylmää pintaa vasten olevan kylläisen vesihöyryn konsentraatiota $c_{\text{H}_2\text{O}, \text{kylläinen}}$ (33) ja ilmasta etäisyydeltä Δx mitattavaa konsentraatiota $c_{\text{H}_2\text{O}, \text{systemi}}$. Siten kondensaatio tuottaa kosteudenmuutoksen yhtälöön (31) lisätermin

$$\begin{aligned} \frac{dAH}{dt} \text{ kondensio}(t) &= \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{V} \cdot \frac{D_{\text{kond}}}{\Delta x_{\text{kond}}} \cdot A_{\text{viileä}}(t) \cdot [c_{\text{H}_2\text{O}, \text{sisäilma}} - c_{\text{H}_2\text{O}, \text{kylläinen}}(T_{\text{pinta}})] \\ &= X_{\text{kond}}(t) \cdot \left[\frac{p_{\text{H}_2\text{O}, \text{sisä}}}{RT_{\text{sisä}}} - \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^*(T_{\text{pinta}})}{RT_{\text{pinta}}} \right]. \end{aligned} \quad (35)$$

$p_{\text{H}_2\text{O}, \text{sisä}}$ -termi on tässä negatiivinen, toisin kuin haihtumisessa ja ympäristöstä saapuvassa diffuusiassa, sillä kondensoituminen poistaa kosteutta ilmasta. Haihtumisen, kondensoitumisen, desorption ja varsinaisten vuotojen yhteisvaikutusta selvitetään seuraavassa kappaleessa.

5.1.4 Yhteisvaikutus absoluuttiseen kosteuteen

Edellä puitujen ilmiöiden yhteisvaikutus absoluuttiseen kosteuteen AH saavutettiin kaavan (27) perusteella summaamalla kyseiset tekijät. Yhdistämällä vuotojen ja desorption $\frac{dAH}{dt}$ -vaikutukseen (31) haihtumisen ja kondensaation aiheuttamat termit

(34) ja (35), absoluuttisen kosteuden aikaderivaataksi saatiin yksinkertaisesti

$$\begin{aligned}
\frac{dAH}{dt} &= \frac{dAH}{dt}_{\text{vuoto}} + \frac{dAH}{dt}_{\text{piirilevy}} + \frac{dAH}{dt}_{\text{haihtuva}}(t) + \frac{dAH}{dt}_{\text{kondensio}}(t) \\
\frac{dAH}{dt} &= -(X_{\text{vuoto}}S_{\text{tiiviste}} + X_{\text{piirilevy}}S_{\text{piirilevy}}) \cdot p_{\text{H}_2\text{O, sisä}} \\
&+ \frac{1}{RT_{\text{sisä}}} \cdot [X_{\text{kond}}(t) - X_{\text{haihtuva}}(t)] \cdot p_{\text{H}_2\text{O, sisä}} \\
&+ X_{\text{vuoto}}S_{\text{tiiviste}}p_{\text{H}_2\text{O, ulko}} \\
&+ X_{\text{piirilevy}}c_{\text{H}_2\text{O, piirilevy}} \\
&+ X_{\text{haihtuva}}(t) \cdot \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^*(T_{\text{pisara}})}{RT_{\text{pisara}}} \\
&- X_{\text{kond}}(t) \cdot \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^*(T_{\text{pinta}})}{RT_{\text{pinta}}}. \tag{36}
\end{aligned}$$

Funktion $\frac{dAH}{dt}(p_{\text{H}_2\text{O, sisä}})$ pitäisi siis muodostaa suora (29), jos haihtumista ja kondensoitumista ei ilmene. Mikä vaikutus kaavan (36) eri termeillä sitten on mittaja-kauman muotoon? Suoran kulmakertoimen kertoo ensimmäinen termi. Toinen termi muuttuu ajan kuluessa kondensaation ja haihtumisen mukaan, ja voi kaareuttaa suoraa. Kolmas termi riippuu ympäristön kosteudesta, ja neljäs termi pysyy pitkälti vakiona. Loput termit ovat nolliä, jos vettä ei haihdu eikä kondensoidu systeemisä. Muuten ne vaihtelevat epämääräisesti ajan saatossa tuoden kohinaa funktioon $\frac{dAH}{dt}(p_{\text{H}_2\text{O, sisä}})$. Mutta miten nämä kaikki reagoivat käytännössä?

Perehdytään nyt syntyvän suoran asentoon. Suoran leikkauspiste paineakselin kanssa kertoo sisäpaineen tasapainotilanteessa, eli silloin kosteus ICON:in sisäilmas-
sa ei kokonaisuudessaan muutu. Leikkauspiste pysyy vakiona silloin, kun vesihöyryn osapaine ympäristössä, ICON:in lämpötila ja piirilevyn kosteus pysyvät muuttumattomina, eikä ICON:issa ole nestemäistä vettä.

Yhtälön (36) perusteella kosteuden ilmaantuminen systeemiin kuvautuu laskevana suorana. Desorptoituva vesi jyrkentää laskua vielä lisää. Desorption voimakkuus on suurimmillaan lämmityksen alkuvaiheessa, jonka jälkeen se hiipuu. Tämä johtuu siitä, että aluksi vesikonsentraatio on tasaisemmin jakautunut esimerkiksi piirilevyn pinnan ja syvempien osien välillä. Levyn lämpeneminen antaa vesimolekyyleille lisää kineettistä energiaa, jonka voimin ensimmäisenä valmiiksi pinnan lähellä olevat vesimolekyylit desorptoituvat ulos levystä. Kun pian kosteutta on enemmän enää syvemmällä, sillä on pidempi matka diffusoitua materiaalissa ja kokonaisdesorptio hidastuu merkittävästi.

Korkein $\frac{dAH}{dt}$ saavutetaan silloin, kun laite on juuri ehtinyt lämmetä. Sitten vauhti hidastuu johtuen sekä edellä mainitusta pintadesorption hidastumisesta että



Kuva 6: Tutkimuksen kohteena ollut ICON9000.

sisäilman absoluuttisen kosteuden ja vesihöyryn paineen kasvusta. $p_{\text{H}_2\text{O, sisä}}$:n kasvu pienentää kosteusgradienttia piirin ja sisäilman välillä hidastaen edelleen desorptiota. Samalla gradientti systeemin ja ympäristön välillä kasvaa, mikä voimistaa kosteusvuotoja ympäristöön.

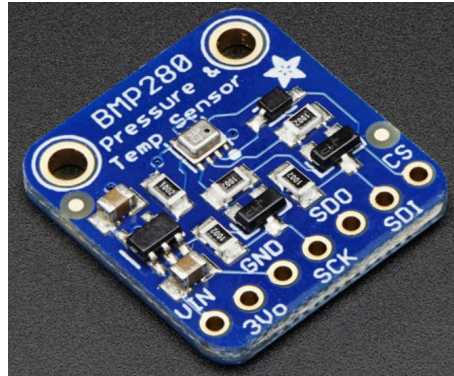
Olomuodonmuutoksista veden haihtuminen jyrkentää suoraa alaspäin entises-tään kasvattaen samalla kostumisen alkunopeutta, eli suoran vakioterminä. Kondensoituva vesi päinvastaisesti pyrkii nostamaan suoran oikeanpuoleista päätä ja laske-maan matalan $p_{\text{H}_2\text{O, sisä}}$:n päätä. Suuri RH on suora viite kondensaation todennä-köisyyden kasvusta. Nouseva lämpötila taas edesauttaa haihtumista, olipa RH mitä tahansa.

Tässä vaiheessa olimme selvittäneet yleisimpien tilanteiden vaikutukset funktio-na $\frac{dAH}{dt}(p_{\text{H}_2\text{O, sisä}})$ esitettävälle mittausdatalogille. Tilanne, jossa ilmiöt tapahtuvat yhtä aikaa, on hyvin hankalatulkintainen. Siksi onkin parempi luoda mittausjärjestelyitä, joissa vain osa ilmiöistä tapahtuu samanaikaisesti; yhtälöä (36) kannattaa käyttää vain tilanteiden simuloimiseen. Seuraavaksi siirryimme sovittamaan teoriaa käytän-nön mittauksiin. Ensin kuitenkin mitataan sensoreiden kalibrointitarvetta.

5.2 Koelaitteisto

Tässä tutkimuksessa käytettiin kuvassa 6 esitettyä ulkokäyttöön suunniteltua ICON9000-nimistä kaapelitelevisioverkon optista kuitusolmutuotetta. Sen kotelon tiiveys pyrittiin selvittämään sisäpuolelle asennetun kosteus- ja lämpötila-anturin mittausten perusteella.

Laitteen voidaan ajatella koostuvan, hieman yksinkertaistaen, kahdesta pääkom-ponentista: koko laitteen levyisestä piirilevystä sekä sitä ympäröivästä alumiiniko-



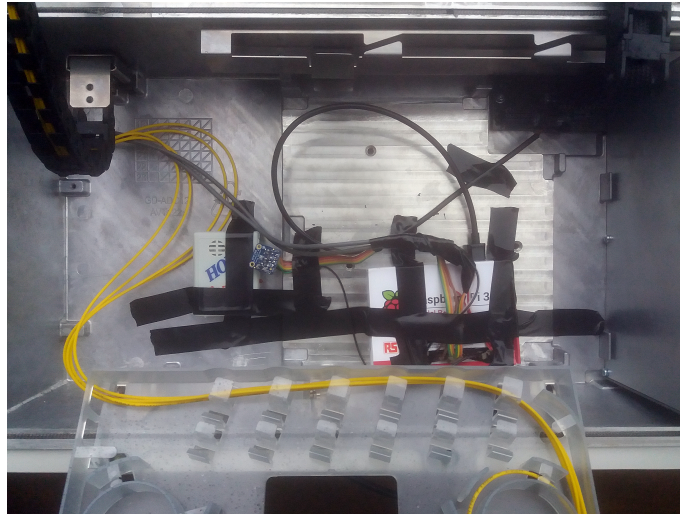
Kuva 7: Adafruit-BMP280 [22].

telosta. Laitteen pituus oli 58 cm, leveys 29 cm ja korkeus 27 cm. Kokonaisuudessa oli 22 kg, teho 81 W ja toimituslämpötila välillä $-40 - 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ [23]. Lämpötila - kosteusanturi oli kiinni ICON:in piirilevyn keskivaiheilla.

Laitteen kuumin osa oli piiriin kytketty virtalähde, joka lämmitti koko laitteen huomattavasti ulkoilmaa lämpimämmäksi. Se oli rakennettu johtamaan mahdollisimman suuren osan hukkalämmöstä alumiinikuoreen, joka toimi ulko-osan jäähdytysripoineen varsinaisena jäähdyttimenä. Lämmön siirtyminen konvektiona kiinteästä pinnasta fluidiin, kuten ilmaan, tehostuu, kun kontaktipinnan pinta-alaa kasvatetaan, fluidimassan vaihtumista pinnan lähellä nopeutetaan tai lämpötilaeroa pinnan ja fluidin välillä kasvatetaan. Fluideihin lukeutuvat sekä nesteet että kaasut. [6]. Laitteen jäähdytyksen teho riippui tässä tapauksessa siis ympäristön lämpötilan muutoksista ja ilmavirtauksista.

Kotelo muodostui kahdesta valetusta alumiinikannesta, jotka oltiin liitetty toisiinsa saranoilla ja kahdeksalla pultilla. Pultit kiristivät valut yhteen symmetrisesti joka suunnasta: kolme pulttia pitkällä sivulla ja yksi lyhyellä. Valujen välissä kiersi yhtenäinen muutaman millimetrin paksuinen urilleen painettu tiiviste. Johtojen ja valokuitujen tuomiseksi ulkoa kotelon sisäpuolelle oli useita läpivientejä, jotka oli kiristetty mahdollisimman tiiviiksi. Tiiveysluokitukseltaan ICON on IP67. Se tarkoittaa sitä, että tuote on täysin pölytiivis ja kestää vuodotta jopa hetkellisiä upotuksia veteen [24].

Tiiveystutkimuksessa käytettiin vertailun vuoksi myös kahta paine- ja lämpötilaanturia: sekä kotelon sisä- että ulkopuoliselle ilmalle. Ne olivat Bosch-merkkisiä BMP280-sensoreita liitettynä Adafruit:n valmistamille piirilevyille, kuten kuvassa 7 näkyy. Ne kytkettiin Raspberry Pi 3 -mikrokontrolleriin SPI-sarjaliikenneprotokollaa käyttäen. Tämä mahdollisti niiden yhtäaikaisen käytön mittauksissa ilman pelkoa



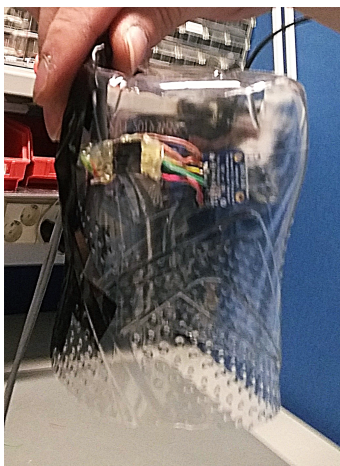
Kuva 8: Raspberry Pi (oikealla), sisäpuolen BMP280-sensori (keskellä) ja HOBO (vasemmalla) kiinnitettynä ICON:iin.

signaalien päällekkäisyyden aiheuttamasta sekaantumisesta. Antureista luettiin mittauksesta riippuen viiden tai kymmenen minuutin välein mittapisteet Raspberryyn, joka tallensi ne omaan muistiinsa.

ICON:in sisäpuolelle jäävä paine- ja lämpötila-anturi kiinnitettiin sähköteipillä johdoistaan kanteen siten, että itse anturi jäi ilmaan, noin senttimetrin päähän kannesta. Näin varmistettiin, että se mittasi nimenomaan ilman eikä kannen lämpötilaa. Asetelma näkyy kuvassa 8. Ulkopuolen anturi puolestaan johdettiin pidemmällä, hyvin tiiviillä, RS232-DB9-johdolla läpiviennin kautta roikkumaan ICON:in alapuolelle. Vesiherkkyyden vuoksi se suojattiin muovipullosta leikatulla pohjaosalla, joka oli käännetty sensorille kuvuksi. Tämä näkyy kuvassa 9. Myös tämä sensori teipattiin siten, että se riippui vapaasti ilmassa, eikä piiri nojannut mihinkään.

Muutamassa mittauksessa hyödynnettiin myös erillistä HOBO-nimistä mittaria, joka mittasi lämpötilaa ja suhteellista kosteutta. Se oli kooltaan pieni, 61 mm x 48 mm x 20 mm, ja käytti virtalähteenään paristoa. Olikin helppoa kiinnittää se eri kohtiin ICON:in kotelon sisällä kosteuden ja lämpötilan vaihtelun mittaamiseksi eri sijanneista. HOBO sisälsi valmiiksi dataloggerin, joka tässä tutkimuksessa säädettiin kirjaamaan mittapisteitä 10 min, 5 min tai 1 min välein. Se toimi siis loistavana vertaislähteenä ilmankosteudelle ICON:in oman mittarin rinnalla.

Kosteuserojen lisäksi HOBO:lla voitiin mitata lämpötiloja samanaikaisesti kolmesta eri anturista: sisään rakennetusta kiinteästä anturista ja kahdesta erikseen yhdistettävästä anturista. Erilliset anturit voitiin kytkeä suoraan kosketukseen alu-

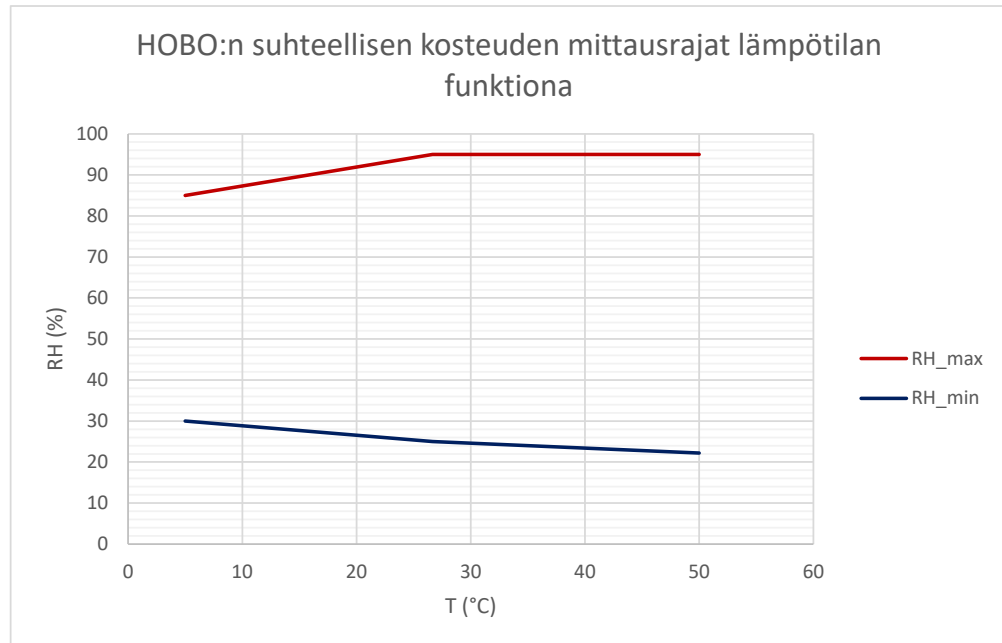


Kuva 9: Ulkosensori sateensuojassaan.

miinikannen kanssa, jolloin lämmön johtumisen kautta ne mittasivat itse alumiinin eikä ilman lämpötilaa. Minimaalisen kokonsa ja lämpökapasiteettinsa ansiosta niiden vaste lämpötilan muutoksiin oli erittäin nopea. Lämpöantureiden maksimivirhe mittausalueellaan $-20\text{ °C} \leq T \leq 70\text{ °C}$ oli $\Delta T \leq 1,5\text{ °C}$, eikä vakiona pysyessään haitannut. HOBO:n kosteusanturin toiminnalle oli tiukemmat rajoitukset.

Aivan kuten RH riippuu lämpötilasta, myös HOBO:n kosteusmittarin mittausalueen ylä- ja alaraja RH :lle riippuivat siitä. Laajin mittaalue oli korkeammissa lämpötiloissa, joissa voitiin parhaimmillaan havaita kosteusarvot $22\% \leq RH \leq 95\%$. Tarkemmin rajat näkyvät kuvassa 10. Siitä huomataan myös lämpötila-alue, jolla suhteellinen kosteus voitiin luotettavasti mitata, eli kun $5\text{ °C} \leq T \leq 50\text{ °C}$. Kosteusmittaus oli lämpötilakompensoitu, eli HOBO korjaa suoraan anturilta saatua RH -arvoa vielä huomioimalla lämpötilan. Tällöin sille luvattiin käyttöohjeessa [25] absoluuttisen virheen marginaaliksi $\Delta RH \leq 5\%$ koko mittausalueella. Tämä on hyvä vertailuarvojen tarkkuus, muttei vedä vertoja varsinaiseen tuotteeseen jäävälle ICON:in kosteusanturille.

ICON mittasi omalla kapasitiivisella Si7006-A20 $RH - T$ -anturillaan kosteutta välillä $0\% - 90\%$ ja lämpötilaa välillä $-40\text{ °C} - 125\text{ °C}$ datalehden [26] mukaan. Suositelluiksi rajoiksi kuitenkin määritettiin $20\% \leq RH \leq 80\%$ ja $-10\text{ °C} \leq T \leq 60\text{ °C}$; suositusten ulkopuolelta kosteusanturi palautuu hitaammin ja virherajat ovat suuremmat. Absoluuttinen virhe oli tässäkin $\Delta RH \leq 5\%$, mutta se kattoi HOBO:a suuremman välin: $0\% - 90\%$. Hystereesiksi oli ilmoitettu korkeintaan $\pm 1\%$. Lämpötilan virhe oli $\Delta T \leq 1\text{ °C}$ välillä $-10\text{ °C} \leq T \leq 85\text{ °C}$. Näiden perusteella ICON:in sensorit pystyivät antamaan hyvin luotettavia tuloksia - tarkempia kuin HOBO.



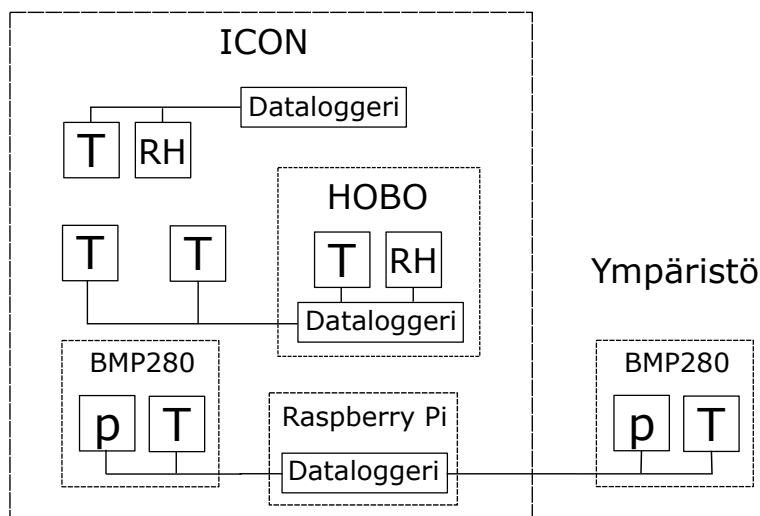
Kuva 10: HOBO:n kosteussensorin mittausalueen rajat.

Mittarit yhdessä kuvasivat laitteen tilan varsin luotettavasti annetuissa rajoissa.

Kuvassa 11 on esitetty lohkokaaavio mittausjärjestelystä, jossa olisi kaikki käytetyt sensorit yhtä aikaa. Kaikilla kolmella - ICON:illa, HOBO:lla ja Raspberry Pi:llä - on siis oma dataloggerinsa ja lämpötila-anturinsa. Lämpötilat kotelon sisällä alkoivat muuttua aina samanaikaisesti huolimatta siitä, mistä kohdasta lämpötilaa mitattiin, mikä mahdollisti jokaisen mittarin datan yhdistämisen samalle aikajanelle. Vierekkäin olevien mittareiden näyttämien arvojen saturoiduttua voitiin määrittää myös niiden keskinäinen virhe toisiinsa verrattuna vallitsevissa olosuhteissa. Lämpömittareita käytettiin siis myös mittalaitteiden keskinäiseen kalibroimiseen. Kaikissa mittauksissa ei kuitenkaan käytetty HOBO:a lisäantureineen tai Raspberry Pi:tä.

5.3 Testiympäristö

Tässä tutkimuksessa ICON asennettiin katolle 3. kerroksen ulkoseinään, mikä näkyy kuvassa 12. Päällä näkyvää muovipeitettä käytettiin estämään sateen pääsy laitteen sisään silloin, kun kantta pidettiin auki. Katolle asennettuna se oli hyvin avoimessa ympäristössä: tuuli, auringonpaiste, vesi- ja lumisade pääsivät vuorovaikuttamaan



Kuva 11: Lohkokaavio koelaitteistosta kaikilla sensoreilla.

suoraan laitteen ulkopinnan kanssa kaikkialta paitsi seinänpuoleiselta sivulta.

Tuote on suunniteltu ulkokäyttöön ja asennettavaksi joko seinään tai roikkumaan ilmaan paksusta kaapelista. Näiden kahden tilanteen merkittävimmät erot ovat ne, että roikkuessaan kaapelista ICON altistuu voimakkaammin tuulelle ja auringonpaisteelle - tuuli tehostaa jäähtymistä merkittävästi, kun taas Auringon säteily heikentää sitä. Toisaalta myös ICON säteilee lämpöä pois nopeammin roikkuessaan kaapelien varassa. Oli syytä pohtia, onko eri asennustavoilla vaikutusta vuotoihin tai tutkimuksessa tehtäviin kosteusmittauksiin.

Seinään kiinnitettynä ICON ja sitä ympäröivä ilma kokivat rakennuksen aiheuttaman pienen lämmittävän vaikutuksen. Laite oli pari senttimetriä irti seinästä kah-ta kiinnikerautaa lukuunottamatta, eli lämpöä siirtyi seinästä käytännössä vain sä-teilemällä ja ilman kautta konvektiona. Vertaamalla tilanteeseen jossa tuote roik-kuu ilmassa, seinän lämmittävä vaikutus simuloi lämpimämpää säätä ja pienempää tuulta. Kosteus siirtyy kuitenkin tismalleen samoilla mekanismeilla sekä seinä- että kaapelikiinnityksellä.

Ainoa kosteuteen liittyvä vaikutus rakennuksen läheisyydellä oli se, että kyl-mällä säällä muun ulkoilman suhteellinen kosteus oli suurempi kuin lähellä seinää olevan hieman lämmitetyn ilman RH , joka putosi lämpötilan nousun vaikutukses-ta. AH :n, eli veden konsentraation, täytyi silti pysyä samana seinän lähelläkin, sillä lämpötilaerosta huolimatta ulkoilman katsottiin olevan kemiallisessa tasapainossa. Kosteushan siirtyy pääosin diffuusiona, jonka voimakkuus on verrannollinen kon-



Kuva 12: ICON testiympäristössään katolla ulkoseinässä.

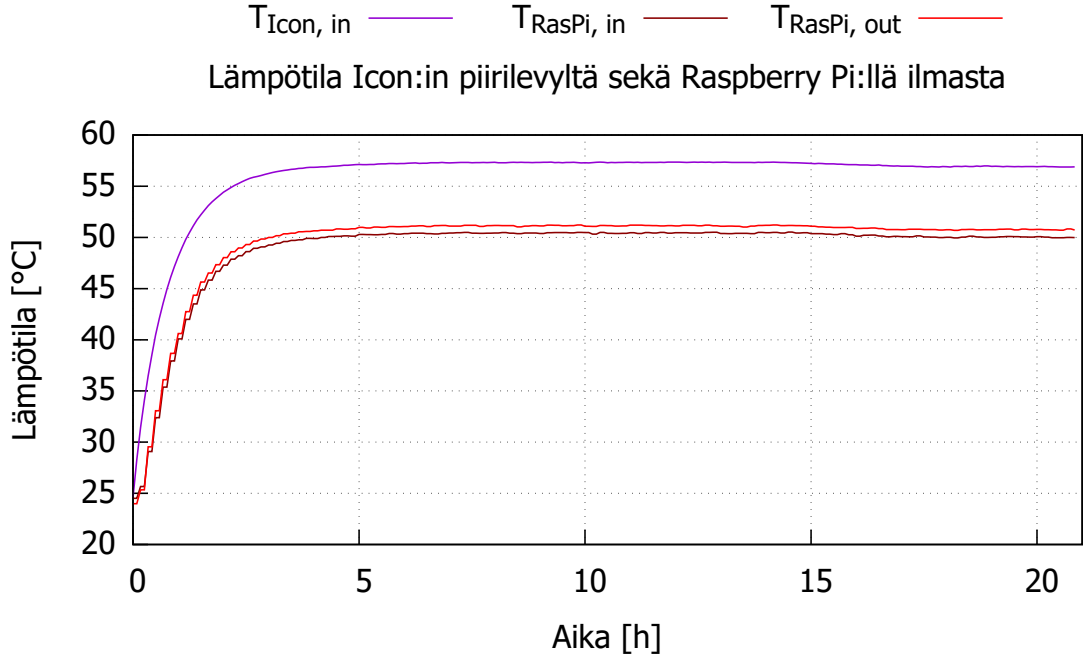
sentraatioeroihin, ja lämmin seinä ei vaikuta konsentraatioihin ICON:in sisä- eikä ulkopuolella.

Vaikka lämpö tehostaakin adsorptiota ICON:in ulkopinnalle ja diffuusionopeutta, sillä on silti sama vaikutus myös kaapelista roikkuvaan tuotteeseen. Johtopäätöksenä eri asennusvaihtoehtoja ei tarvitse ottaa kokeissa huomioon.

5.4 Kokeelliset mittaukset

5.4.1 Kalibrointitarpeen testaaminen

Raspberry Pi:hin kytkettyjä BMP280-antureita verrattiin toisiinsa tasaisessa paineessa. Ne asetettiin vierekkäin ilmaan samalle korkeudelle toimiston pöydällä sei-



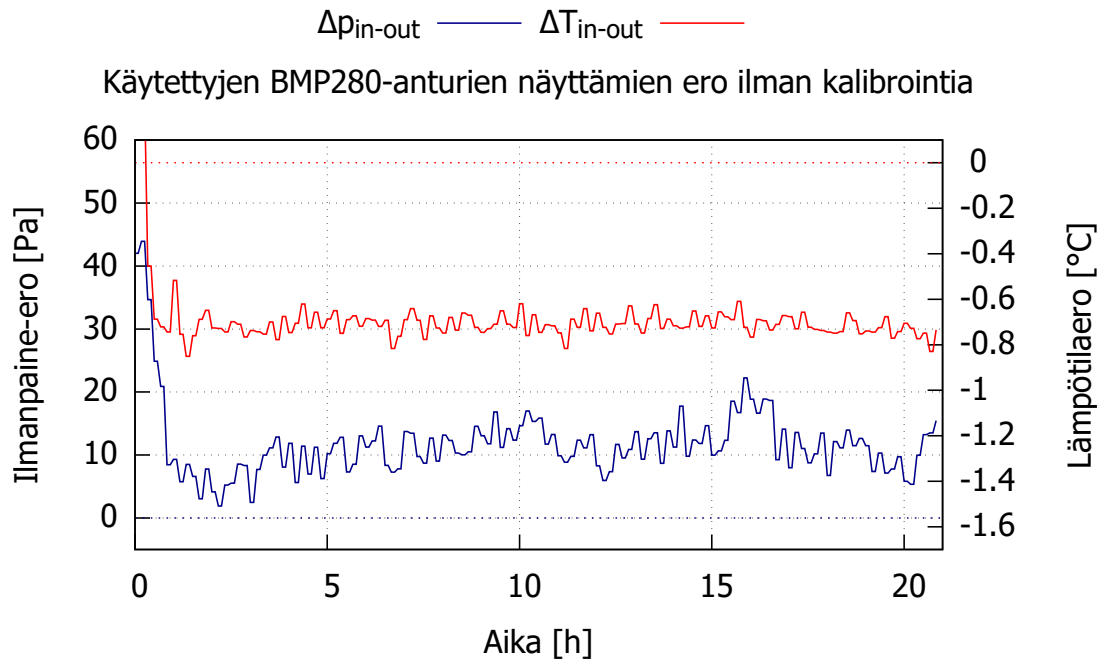
Kuva 13: BMP280-antureiden ja ICON:in lämpötilamittaukset kalibrointitestissä.

sovassa ilmassa olevan ICON:in sisään. ICON kytkettiin päälle, mistä seurasi lämpeneminen seuraavan kolmen tunnin ajan ennen tasaantumista. Ilma lämpeni 28 °C ympäristöä lämpimämmäksi, mikä näkyy kuvassa 13. ICON:in piirilevy lämpömittarin kohdalla lämpeni puolestaan 34 °C, eli noin 6 °C sisäilmaa lämpimämmäksi. ICON:in sisään muodostui siis merkittävä lämpötilagradientti, mikä on syytä huomioida tulevissa mittauksissa merkittävänä virhetekijänä absoluuttisen kosteuden määrittämisessä. Näin suuret lämmön nousut tuskin kuitenkaan ovat tyypillisiä ulkomittauksissa, sillä siellä tuuli saa ilman vaihtumaan, mikä jäädyttää ICON:ia.

Kuvassa 14 näkyy sensorien arvojen poikkeama: sisäanturi mittasi keskimäärin 0,7 °C matalamman lämpötilan ja 11 Pa suuremman paineen. Nämä ovat hyvin pieniä eroja, eivätkä tässä tutkimuksessa aiheuta tarvetta kalibroinnille. Aluksi, 30 °C lämpötilassa paine-ero oli suurempi, muttei silti merkittävä. Paine-eroa tasaa sekin, että ulkoanturi asennettiin noin 20 cm sisäanturia alemmaksi tulevissa mittauksissa; matalammalla on hieman suurempi paine ($\Delta p \leq 3$ Pa), joka johtuu korkeuserosta. Tämä voitiin laskea kaavalla

$$\Delta p = p_0 \cdot \Delta \exp\left(\frac{-Mgy}{RT}\right), \quad (37)$$

jossa p_0 on ilmanpaine merenpinnantasolla, M ilman moolimassa, g putoamiskiihtyvyys ja y korkeus merenpinnantasosta [6].



Kuva 14: BMP280-antureiden lämpötila- ja paine-erot lämpötilavälillä 23 - 52 °C paineen ollessa n. 101 kPa.

BMP280-anturit ovat tutkimuksessa apuna, eivätkä jää lopulliseen tuotteeseen. Kosteuden määrittämiseen käytetäänkin ICON:in oman sensorin mittaamaa lämpötilaa joten tarkempaa kalibrointia ei kosteusmittaustarkkuudenkaan vuoksi tarvita.

5.4.2 Tiivis tapaus

Aluksi ICON:illa tehtiin kahdet mittaukset mahdollisimman hyvin suljettuna ja tiivistettynä kannen pultit 10 Nm momenttiin väännettynä. Ensin mitattiin vakaassa ympäristössä toimiston pöydällä, ja sitten vaihtelevissa olosuhteissa ulkona seinällä. Molemmat kokeet kestivät noin kolme vuorokautta, ja mielenkiintoisimmat havainnot saatiin jo muutamassa tunnissa laitteen lämmitessä. Ennen kokeita laite oli verifioitu tiiviiksi alipaineistamalla ja mittaamalla U-putkimanometrillä, mutta silti kokeissa havaittiin pieniä vuotoja.

Ennen siirtymistä ICON:in omien sensoreiden mittaustuloksiin tutkittiin ympäristötekijöiden vaikutusta systeemin tilaan Raspberry Pi:n mittauksista. Lämpötilat ja paineet BMP280-antureilta on koottu kuvaan 15. Näistä kokeista saataviin tuloksiin oli tarkoitus verrata myöhempiä kokeita, joissa mittausjärjestelyä muutettiin eri tavoin.

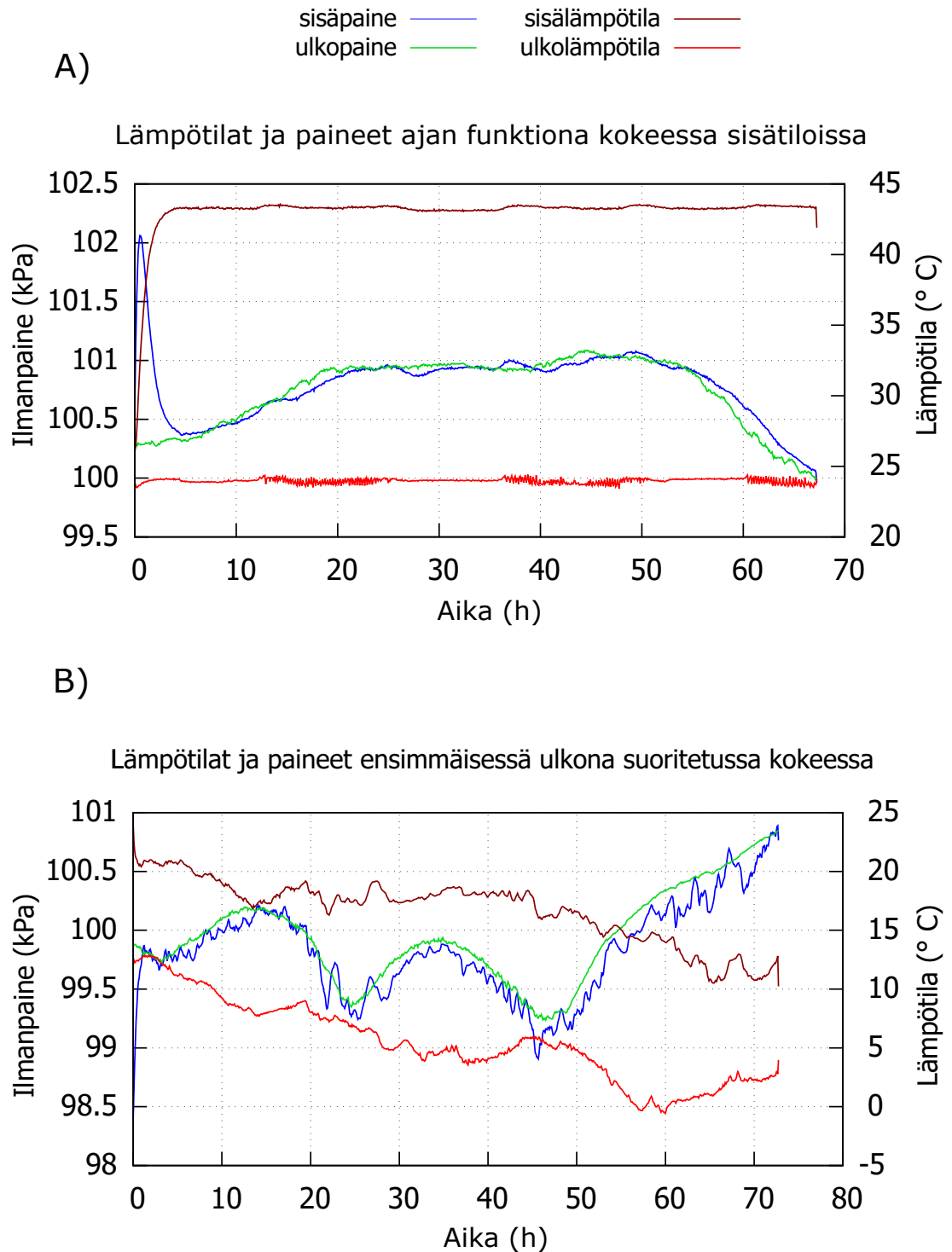
Sisätiloissa toimiston pöydällä ympäristön, eli ICON:in ulkopuolisen ilman, lämpötila pysyi hyvin tarkaan vakiona koko mittauksen ajan. Sen seurauksena myös laitteen sisällä vallitsi tasainen, noin 19 °C ympäristöä kuumempi, lämpötila. Tämä kuitenkin saavutettiin vasta lämpötilan tasaantumisen jälkeen, johon kului noin kolme tuntia.

Painevaihtelut olivat myöskin pieniä; paine ympäristössä pysyi koko ajan noin 1 kPa vaihteluvälillä. Sisäpaine kasvoi aluksi lämpenemisen myötä 1,8 kPa ulkopainetta suuremmaksi. Ilman vuotoja paine olisi kuitenkin kasvanut kaavan (14) mukaisesti samassa ajassa 3 kPa ja lämpötilan tasaannuttua yli 6 kPa ympäristöä suuremmaksi. Sisäpaine oli huipussaan, kun lämpötila oli nopeimmassa nousussa. Se kuitenkin putosi nopeasti, sillä korkeammassa lämpötilassa vuodotkin kiihtyivät. ICON ei siis kyennyt ylläpitämään suurempaa ylipainetta kokeen lämpötiloissa.

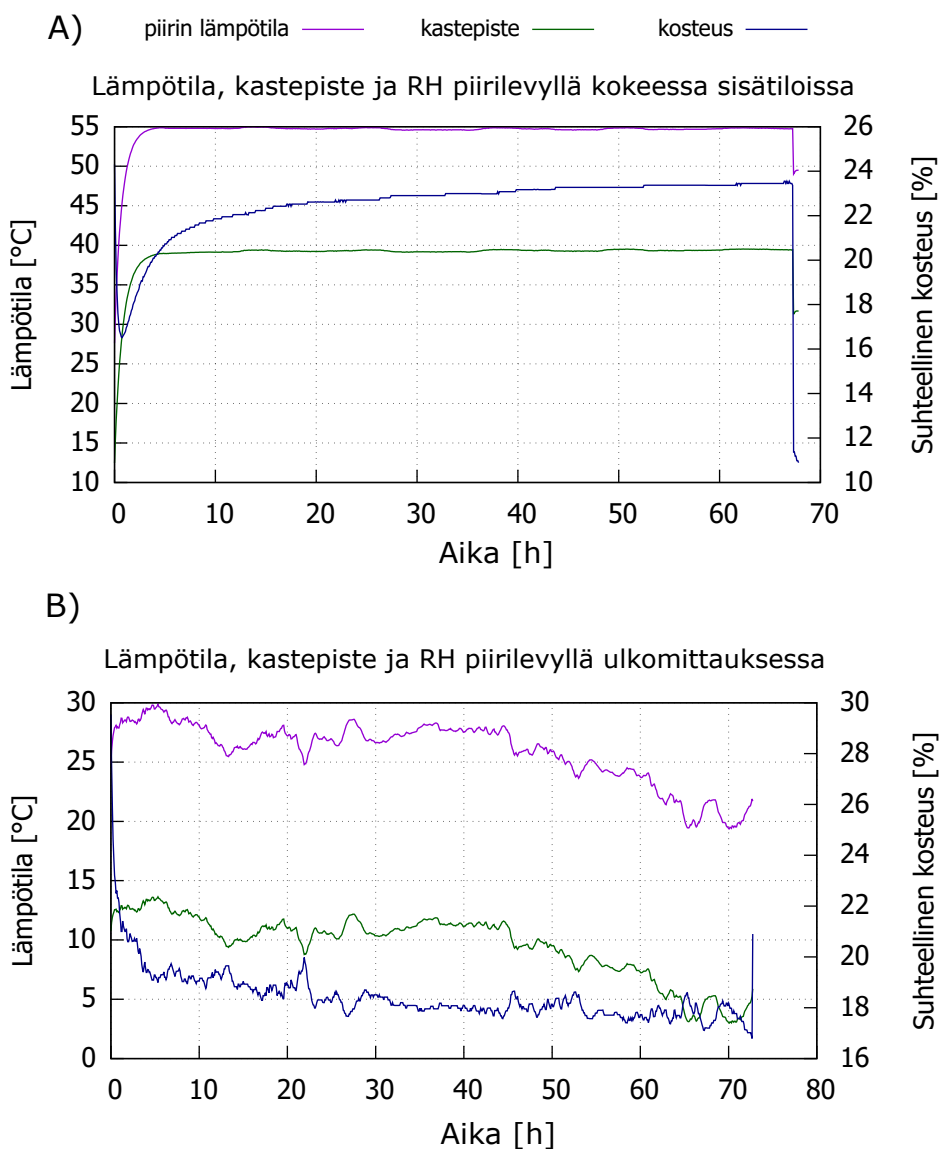
Ulkomittauksesta huomattiin heti, että ympäristöolosuhteet voivat vaihdella paljon parissa tunnissakin. Lämpötilan vaihtelu oli tässä kokeessa 13 °C rajoissa, mutta paine ei vaihdellut enempää kuin 1,5 kPa. Ympäristön painemuutokset molemmissa mittauksissa olivat siis suuruudeltaan samaa luokkaa. Ulkomittauksessa se tosin vaikutti vaihtelevan enemmän ja noudattavan omanlaista vuorokausirytmäänsä. Sisätiloissa ilmanvaihto ja lämmitys tasoittanevat painevaihtelua, tai sitten kyseisen mittauksen aikana paine vain sattui pysymään ulkonakin vakaampana. Joka tapauksessa ICON:in sisäpaine ja -lämpötila mukailivat selkeästi ympäristöä - lämpötila seurasi melkein välittömästi ja paine suuremmalla viiveellä.

Tämän ulkomittauksen alussa ja lopussa on myös poikkeuksellista käyttäytymistä myöhempisiin kokeisiin verrattuna. Alussa sisälämpötila näkyy laskevan nopeasti ja sisäpaine on alkujaan reilusti ulkopainetta alempi. Nämä selittyvät sillä, että ennen mittauksen alkua ICON oli ollut jo pidempään suljettuna ja käynyt lämpimänä. Mittauksen alkaessa se oli vielä jäähtymässä edellisestä ajosta, ja tämä jäähtyminen oli laskenut myös sisäpaineen. Mittauksen lopuksi ICON:in kansi avattiin, mikä aiheutti paineiden välittömän tasoittumisen ja lämpötilan nopean putoamisen. Tämä näkyy viimeisten mittapisteiden notkahduksena kuvassa 15.

Kannen avaus on havaittavissa myös sisäkokeen mittauksista. Vaikka lämpötilat eivät ehdikkään tasoittua samalle tasolle ulkomittarin kanssa, paineet ehtivät. Kosteuden vapaa diffuusio ilmassa on nopeaa, joten myöhemmin esitettävän absoluuttisen kosteudenkin voitiin olettaa tasoittuvan ilmassa melko hyvin viimeiseen mittapisteeseen mennessä. Vaikutukset näkyivät myös seuraavaksi tarkasteltavissa ICON:in tekemissä mittauksissa.

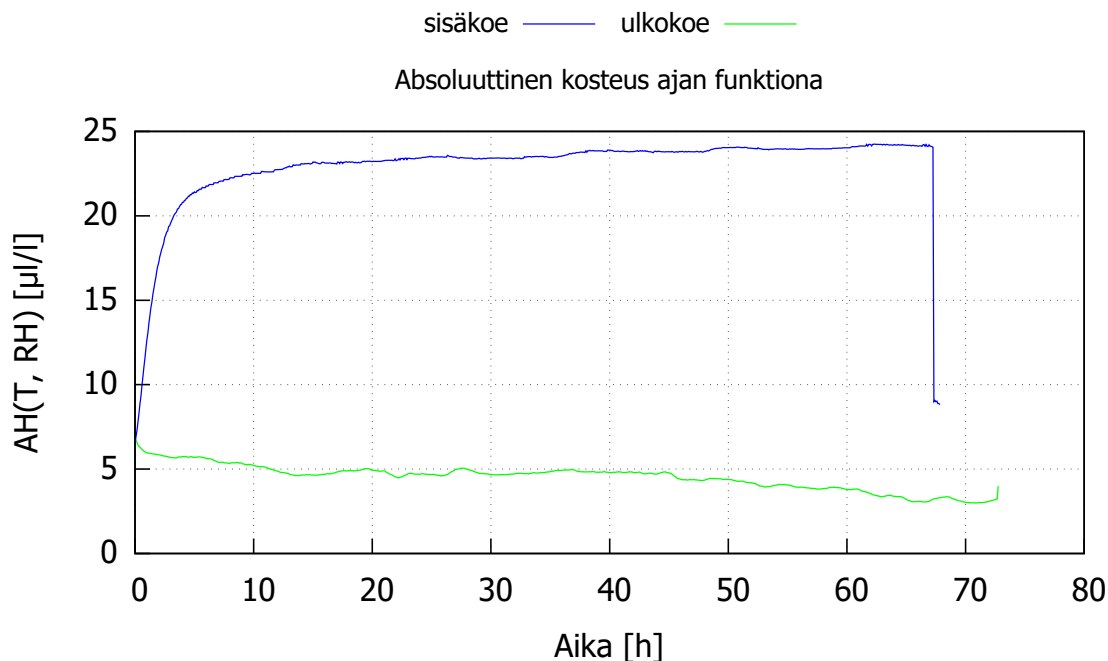


Kuva 15: ICON:in sisä- ja ulkopuoleisen ilman lämpötilat ja paineet koemittauksissa sisätiloissa (A) ja ulkona (B).



Kuva 16: Suhteellinen kosteus, lämpötila ja kastepiste systeemissä koemittauksissa sisätiloissa (A) ja ulkona (B).

ICON:ilta kerätyt mittaukset lämpötilasta ja ilmankosteudesta piirilevyn tuntumasta on koottu kuvan 16 kuvaajiin. Niihin piirrettiin myös ICON:in laskema kastepiste. Se oli reilusti, noin 16 °C, piirilevyn lämpötilaa alempi, mikä kyseisessä lämpötilassa vastasi noin 20 % suhteellista ilmankosteutta. Vertaamalla lämpötilaa Raspberryn Pi:n mittauksiin nähdään, että myös nämä seuraavat vahvasti toisiaan. Kokonaisuudessa ottaen huomioon, että systeemi toimii jatkuvana lämmöntuottajana, systeemi ja ympäristö päätyvät nopeasti termiseen tasapainoon. Lämpögradientteja tosin jää sekä ICON:iin että ympäristöön.



Kuva 17: Absoluuttinen kosteus ajan funktiona vakaiden sisäolosuhteiden ja vaihtelevamman ulkoympäristön vertailemiseksi.

Kosteuden tasaantunut kasvu systeemissä ensimmäisten 45 minuutin laskun jälkeen nähtiin selvästi kuvaajasta 16 A. Lasku johtui lämpötilan kasvusta, ja nousuun kääntymisen seurasi kosteuden lisääntymisestä ilmassa. Vaikkakin suhteellinen kosteus nousi kahden vuorokauden jälkeen vaivaisella 0,04 %/h tuntinopeudella, se osoitti selkeästi systeemin vuodon ja kosteuden desorption yhteisvaikutuksen. Yhtä selkeää kuvaa RH -arvot eivät antaneet kuvaajassa 16 B. Jo pelkkä RH :n lämpötilariippuvuus teki kuvaajan tulkinnan hankalaksi. Siksi molempien kokeiden kosteudet muunnettiin ICON:in RH - ja T -mittauksista kaavalla (9) absoluuttisiksi AH .

Absoluuttinen kosteus ajan funktiona $AH(t)$ sisä- ja ulkokokeesta esitettiin kuvassa 17. Kuten suhteellinenkin kosteus kuvassa 16 A, myös AH kasvoi aluksi nopeasti kokeessa sisätiloissa. Merkittävin ero RH ja AH kuvaajien muodossa oli se, ettei AH laskenut alussa RH :n laskiessa. Juuri tämän takia kosteusvuotomittauksissa käytetään lämpötilasta riippumatonta suuretta AH . Tässä se kertoo, että absoluuttinen kosteusmäärä kasvaa koko mittauksen ajan ennen kannen avaamista lopussa. Pelkästä RH -kuvaajasta 16 A voitaisiin virheellisesti tulkita lämmityksen poistavan vettä ilmasta, mikä ei siis pidä paikkaansa.

AH :n kasvun sisäkokeessa ajateltiin olevan pääosin desorptiota piirilevystä ja tiivisteistä, koska ICON oli juuri suljettu, jolloin ilmakeuhuus oli sama systeemissä

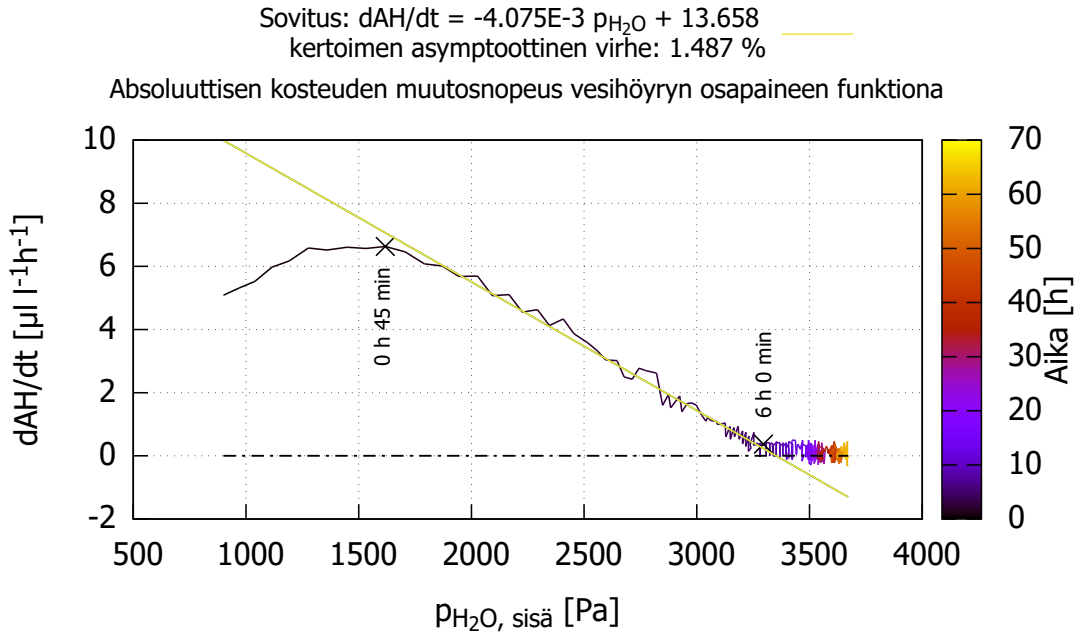
ja ympäristössä. Lisäksi lämpenemisen pääteltiin kiihdyttävän desorptiota erityisesti aluksi RH :n laskiessa lämpenemisen vaikutuksesta, kuten kappaleessa 5.1.2 todettiin. Lisätodisteena kannen avaaminen mittauksen lopuksi pudotti AH :n lähes alkuasolle - tämä oli ympäristön kosteus, joka oli vain hieman kasvanut alkutilanteesta. Kosteus systeemissä oli koko mittauksen ajan ympäristöä korkeampi, joten vettä saattoi diffuusoitua ainoastaan systeemistä matalampaan vesihöyrykonsentraatioon, eli ympäristöön. Nestemäistä vettä ei kummassakaan kokeessa havaittu, joten veden haihtuminen ja kondensoituminen eivät vaikuttaneet mittauksiin.

Ulkomittauksessa AH laski jo alusta lähtien. Tähän vaikutti mm. se, että ICON tuotiin suljettuna kylmempään ympäristöön, jolloin itse systeemi ei juurikaan päässyt lämpenemään. Muutenkin laite oli jo vähän aiemmin käynyt kuumana, joten kosteutta ei luultavasti ollut paljoa piirilevyn pinnalla. Syvemmillä oleva kosteus tuskin oli ehtinyt tasaantua lähemmäs pintaa. Siten kuvaajassa 17 AH :n käyttäytymistä ohjaa pääasiassa vuodot systeemistä ympäristöön ja päinvastoin. Kuten mittauksen lopuksi huomattiin, kannen avaaminen muutti kosteutta vain hieman korkeammaksi kohti ympäristön kosteutta.

Absoluutisen kosteuden kasvunopeus paineen $p_{H_2O, sisä}$ funktiona sisäkokeessa esitettiin 65 tunnilta kuvaajassa 18. Kuvaajaan tehtiin lineaarinen sovitus pienimmän neliösumman menetelmällä Gnuplot 5.2 kuvaajanpiirto-ohjelmalla. Signaali oli tasoitettu laskemalla jokainen kosteusmuutospiste kolmen pisteen keskiarvona, mikä laski myös sovituksen kulmakertoimen prosentuaalista virhettä.

Kuvaajan 18 sovitukseen otettiin mittapistet aikaväliltä $t = 45 \text{ min} - 6 \text{ h}$, koska silloin desorptio ICON:issa ja vuoto ympäristöön vaikuttivat lähestyvän lineaarisesti keskinäistä tasapainoaan. Sovituksessa satiin suoran (31) kulmakertoimeksi $C_1 = -(X_{vuoto}S_{tiiviste} + X_{piirilevy}S_{piirilevy}) = -4,075 \cdot 10^{-3} \mu\text{l l}^{-1}\text{h}^{-1}\text{Pa}^{-1}$ ja vakiotermissä $C_0 = X_{vuoto}S_{tiiviste}p_{H_2O, ulko} + X_{piirilevy}c_{H_2O, piirilevy} = 13,658 \mu\text{l l}^{-1}\text{h}^{-1}$. Kertoimen asymptoottinen keskivirhe oli singaalin tasoituksen jälkeen vain 1,487 %, joten tulosta voitiin pitää melko tarkkana.

Jos tunnettaisiin adsorptiokertoimet $S_{tiiviste}$ ja $S_{piirilevy}$ sekä piirilevyn kosteuskonsentraatio $c_{H_2O, piirilevy}$ ja ympäristön vesihöyryn osapaine $p_{H_2O, ulko}$, voitaisiin kuvan 18 sovituksen parametreista laskea vuotokerroin X_{vuoto, H_2O} ja desorptiokerroin $X_{piirilevy}$, sekä niistä laskettavat diffuusiokertoimet. Pelkästä kulmakertoimestakin voitiin kuitenkin määrittää yläraja sille, kuinka suuri vuotoa kuvaava termi $X_{vuoto}S_{tiiviste}$ voi tilanteessa olla. Vuotokertoimien $X_{piirilevy}$ ja X_{vuoto} on oltava positiivisia, ja kosteuseron kasvu edellytti vuodon olevan desorptiota pienempi. Näiden



Kuva 18: Absoluuttisen kosteuden muutosnopeus ICON:in sisäilman vesihöyryn osapaineen funktiona kokeessa tiiviinä sisätiloissa.

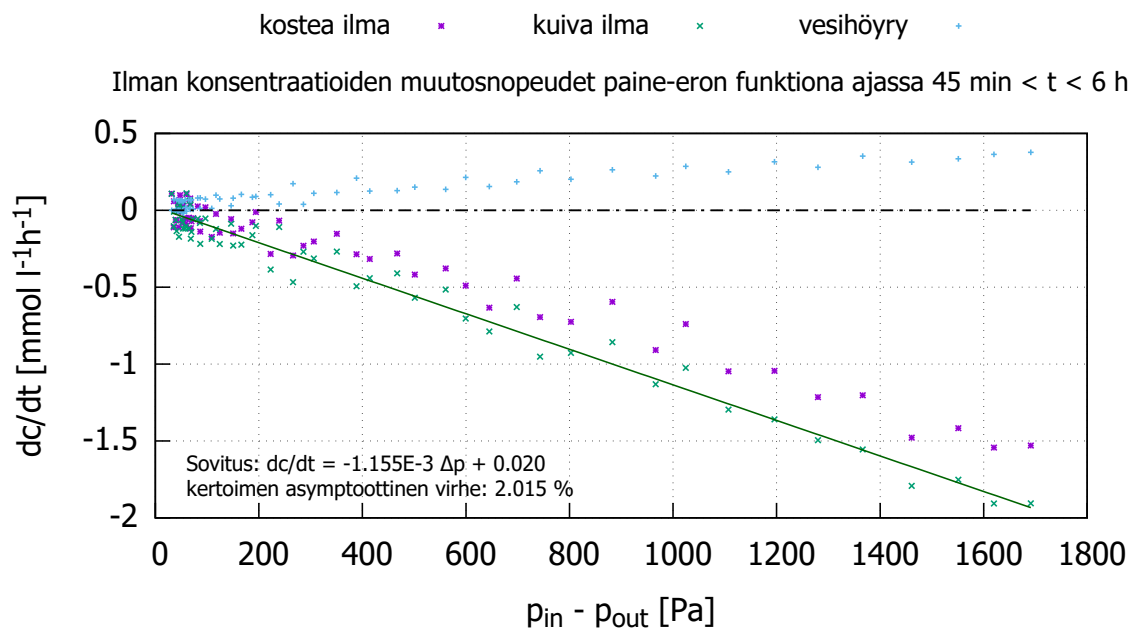
perusteella

$$(X_{\text{vuoto}} S_{\text{tiiviste}})_{H_2O} \leq \frac{1}{2} \cdot 4,075 \cdot 10^{-3} \frac{\mu\text{l}}{\text{l h Pa}}.$$

Kuvaajasta 18 nähtiin myös, että kosteus jatkoi kasvuaan ajanhetken $t = 6 \text{ h}$ jälkeenkin. Se oli kuitenkin paljon aiempaa hitaampaa, minkä perusteella kasvun pääteltiin johtuneen ympäristön kosteuden noususta, joka puolestaan seurasi kuvaajassa 15 havaitusta ympäristön kokonaispaineen nousua kaavojen (5) ja (6) mukaisesti. Sovituksen aikavälin jälkeistä kosteusmuutosta rajoitti siten ympäristöolosuhteet eikä vuodon diffuusionopeus, joten sitä ei huomioitu kosteusvuototarkastelussa.

Aiemmin perusteltiin, että vesihöyryn diffuusiokerroin voidaan olettaa suuremmaksi kuin kuivan ilman D . Vesihöyryn osapaineen muutokset eivät kuitenkaan riitä tasoittamaan kokonaispaineen eroa systeemistä ympäristöön. Vesihöyryn tarkkaa vuotonopeutta ei voitu tässä kokeessa edes määrittää, koska absoluuttinen kosteus riippui kaavan (31) mukaisesti sekä vuodosta ympäristöön että desorptiosta ICON:in sisällä, ja vesihöyryn desorptionopeutta piirilevystä ei tiedetty. Siksi paineen tasautumista rajoittavana tekijänä pidetään kuivan ilman vuotonopeutta, joka oletetaan myös kosteusvuodon nopeuden alarajaksi.

Kuivan ja kostean ilman sekä niiden seoksen konsentraatioiden muutosnopeudet



Kuva 19: Kostean ilman ja sen sisältämän kosteuden ainemäärien muutosnopeudet, sekä niistä laskettu kuivan ilman vuotoonopeus.

ICON:in sisäilmassa sisäkokeessa aikaväliltä $45 \text{ min} \leq t \leq 6 \text{ h}$ laskettiin kaavoilla (9), (18) ja (20), ja piirrettiin paine-eron funktiona kuvaajaan 19. Koska myös kuivan ilman osapaine on Henryn lain (4) mukaisesti suoraan verrannollinen tiivisepinnalle adsorboituvaan kaasukonsentraatioon, voitiin kuivan ilman vuotokerroin määrittää kaasun poistumisnopeudesta sisä- ja ulkopaineen eron funktiona. Jakamalla absoluuttisen kosteuden vuotoyhtälö (28) veden moolimassalla, saatiin yhtälö

$$\frac{dc_{\text{sisäilma}}}{dt} = D \cdot \frac{AS_{\text{tiiviste}}}{V\Delta x} \cdot (p_{\text{ulko}} - p_{\text{sisä}}) = k \cdot (p_{\text{ulko}} - p_{\text{sisä}}). \quad (38)$$

Kuvassa 19 tämä suora sovitettiin kuivan ilman vuotoon Gnuplotilla pienimmän neliosumman menetelmällä. Suora sopi hyvin laskettuihin pisteisiin ja leikkauspiste oli hyvin lähellä origoa, kuten pitikin. Suoran kulmakertoimeen $k = \frac{DAS}{V\Delta x} = \frac{XS}{M_{H_2O}}$ suoraan verrannollinen diffuusiokerroin D ei siis juurikaan reagoinut lämpötilan muutokseen välillä $26 \leq T \leq 43 \text{ }^\circ\text{C}$. Painemittareiden kalibrointiero siirsi leikkauspistettä noin 10 Pa origosta, ja samalla tavalla vaikutti myös systeemissä desorptoituvan veden tuottama minimaalinen lisäpaine. Gnuplotilla laskettiin kuvasta 19 kulmakertoimeksi $k = 1,155 \mu\text{mol l}^{-1}\text{h}^{-1}\text{Pa}^{-1}$ ja asymptoottiseksi keskivirheeksi vain 2,0 %. Vuototermiksi sisäkokeen alkuosalle laskettiin $X_{\text{vuoto}}S_{\text{tiiviste}} = 20,8 \mu\text{l l}^{-1}\text{h}^{-1}\text{Pa}^{-1}$.

Kuivan ilman vuototermi on yli tuhatkertainen kuvaajan 18 funktiosta $\frac{dAH}{dt}(AH)$

laskettuun kosteusvuodon maksimiarvoon verrattuna. Täytyy siis olla, että joko vesihöyry ei diffusoidukaan yhtä helposti tiivisteiden läpi kuin kuiva ilma, tai sitten systeemiin suuntautuva terminen diffuusio oli kokeessa systeemistä pois suuntautuvaa kemiallista diffuusiota suurempi. Myöhempien kokeiden perusteella terminen diffuusio on avainasemassa.

Kuivan ilman vuotonopeus muodosti suoran kuvaajaan 19, joten paine-eron taustautumiseen kuluva aika jollekin nolaa suuremmalle tasolle Δp_{loppu} voitiin laskea alkuperäisestä paine-erosta Δp_{alku} sijoittamalla kaava (20) suoran yhtälöön (38) olettamalla samalla kosteus vakioksi:

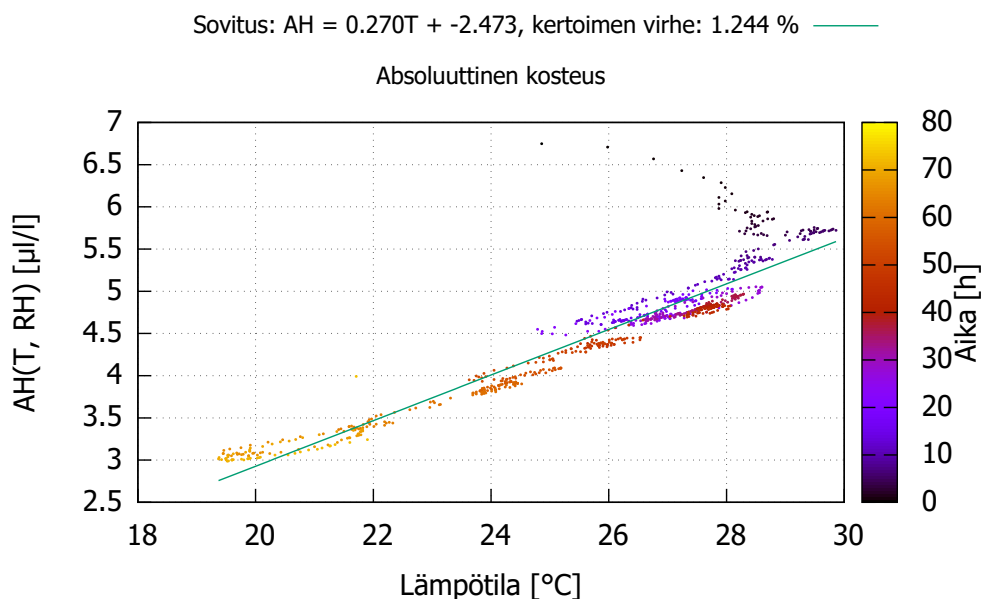
$$\begin{aligned} \frac{1}{RT_{\text{in}}} \cdot \frac{dp_{\text{sisä}}}{dt} &= k \cdot (p_{\text{sisä}} - p_{\text{ulko}}) \\ \int_0^t dt &= \frac{1}{RT_{\text{in}}k} \cdot \int_{p_{\text{sisä, alku}}}^{p_{\text{sisä, loppu}}} \frac{dp_{\text{sisä}}}{p_{\text{sisä}} - p_{\text{ulko}}} \\ t &= \frac{1}{RT_{\text{in}}k} \cdot \ln \left(\frac{\Delta p_{\text{loppu}}}{\Delta p_{\text{alku}}} \right). \end{aligned} \quad (39)$$

Yhtälö toimii lämpötilan ja ulkopaineen pysyessä vakioina, eli yleensä vain pienillä aikaväleillä. Siten yhtälöä kannattaa käyttää mieluummin paineen simulointiin lyhyillä ajanmuutoksilla kuin pidempiaikaiseen ennustamiseen pelkän alkutilanteen perusteella. Nopean simuloinnin perusteella vuotokerroin k vaikutti kuitenkin olevan lämmitysvaiheessa suurempi kuin mittauksen edetessä. Sama todettiin soveltamalla kaavaa (38) mittauksen loppuosaan.

Täsmällisempi vuotokerroin määritettiin ottamalla koko kolmen vuorokauden mittaus huomioon. Lisäksi paine- ja lämpötilamittausten kohinaa vähennettiin taustoittamalla mittapistet kolmen vierekkäisen pisteen keskiarvoiksi. Jokaisesta kuivan ilman vuotonopeuden pisteestä, jossa paine-ero $p_{\text{sisä}} - p_{\text{ulko}}$ oli tiettyä kynnystä Δp_{kynnys} suurempi, määritettiin oma kerroin k kaavoilla (20) ja (38). Pienimpiä paine-eroja ei huomioitu, sillä ne olivat lähinnä kohinaa. Δp_{kynnys} määritettiin empiirisesti Python-ohjelmointikielellä kokeilemalla arvot väliltä $0 \leq \Delta p_{\text{kynnys}} \leq 300$ Pa 5 Pa välein, ja valitsemalla sen, jota suuremmilla paine-eroilla k -kertoimen keskiarvon suhteellinen keskivirhe oli pienin.

Sisäkokeen vuotokertoimen keskiarvoksi saatiin $k = 0.43954 \mu\text{mol l}^{-1}\text{h}^{-1}\text{Pa}^{-1}$ suhteellisella keskivirheellä $\sigma = 11.485 \%$, kun paine-eron kynnyksenä käytettiin $\Delta p_{\text{kynnys}} = 80$ Pa. Kertoimen virhe oli siis 95 % todennäköisyydellä alle $2\sigma = 23 \%$ lasketusta keskiarvosta k . Kosteuden keskimääräisen vuototermin pitäisi olla kuivan ilman vuototermiä suurempi, eli

$$(X_{\text{vuoto}} S_{\text{tiiviste}})_{\text{H}_2\text{O}} \geq M_{\text{H}_2\text{O}} k_{\text{kuiva}} = 7,9 \frac{\mu\text{l}}{\text{l h Pa}}.$$

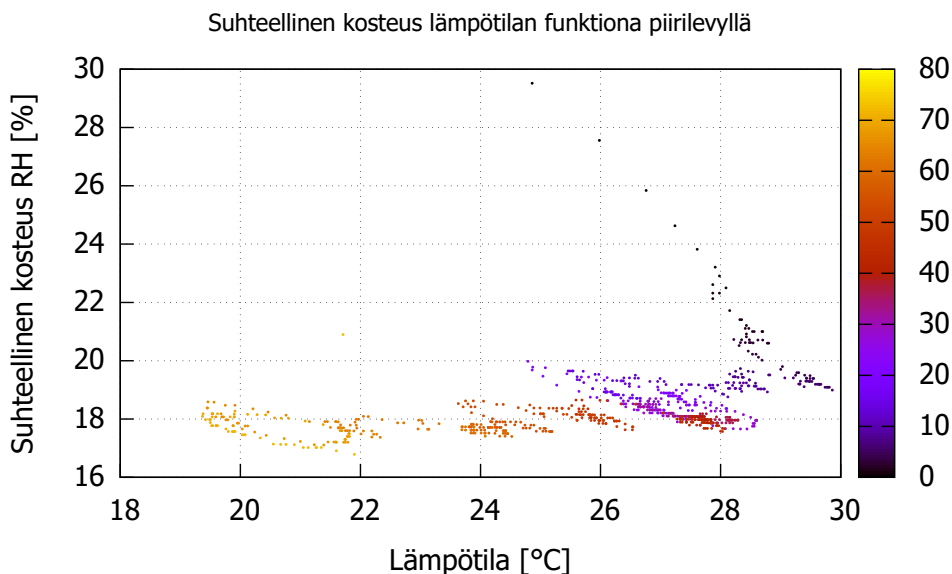


Kuva 20: ICON:in sisäilman absoluuttinen kosteus sisälämpötilan funktiona ulkoko-
keessa tiiviissä tapauksessa.

Vuototermin madaltumiseen sisäkokeen edetessä voi olla monia syitä. Diffuusio-
kerroin tiivisteessä saattoi madaltua lämpötilan tai kosteuden kasvun vaikutuksesta,
tai systeemin ilmaan desorptoitui sittenkin vesihöyryn lisäksi muitakin kaasuja. No-
peassa lämpötilan nousussa lämpösensorin hitaus painesensorin reaktionopeuteen
verrattuna korostui, mikä aiheutti todellista suuremman vuoto nopeuden mittaami-
sen; jos lämpötila ei noussut samassa suhteessa paineen kanssa, tulkittiin se kaasun
konsentraation kasvuksi. Sisälämpöanturi ICON:issa saattoi myös mitata keskimää-
räistä sisäilmaa pienempiä lämpötiloja, sillä sensori oli ulkokuoren vieressä kauem-
pana muovisen kuitukotelon toisella puolella olevasta lämpimästä piirilevystä, ja
systeemissä oli merkittäviä lämpögradientteja.

Ulkokokeessa lämpötilan ja ympristöolosuhteiden harvinaisen nopean vaihte-
luun vuoksi tasapainosisäpaine, johon vesihöyry pyrki asettumaan ICON:issa,
muuttui jatkuvasti. Siksi kyseisestä mittauksesta ei voitu suoraan määrittää kos-
teuden vuoto nopeutta. Lämpötilan ja kosteuden vaihdellessa samanlaiset yhtälöt
vuodon maksimiarvoille kuin sisäkokeessa oltaisiin voitu laskea, jos oltaisiin tiedetty
myös ympäristön ilmankosteus jokaisella ajanhetkellä.

Ulkokokeesta voitiin kuitenkin määrittää kuivan ilman vuoto nopeus samalla ta-
valla kuin sisäkokeessakin. Aluksi tehdystä suoran sovitukselta selvitettiin paine-ero
vuoto nopeuden nollakohdassa. Kun tämä poikkeasti arvosta $\Delta p = 0$ Pa, suoritettiin



Kuva 21: ICON:in sisäilman suhteellinen kosteus sisälämpötilan funktiona tiiviissä tapauksessa ulkokokeessa.

painemittareiden kalibrointi siten, että vuotonopeuden nollakohtaksi saatiin paineeron nollakohta. Kyseisessä mittauksessa oli $\Delta p = p_{\text{sisä}} - p_{\text{ulko}} = -80$ Pa, joten kalibrointi tehtiin nostamalla sisäpaineen mittapisteitä 40 Pa ja laskemalla ulkopaineen mittapisteitä saman verran. Kalibroinnin jälkeen kuivan ilman konsentraatio oli tasapainossa paineeron ollessa nolla. Kalibrointi saattoi kuitenkin olla virheellinen, mikäli vuoto pysähtyikin termisen diffuusion kumotessa kemiallisen diffuusion, josta seurasi staattinen paine-ero.

Vuototermiksi ulkokokeessa laskettiin $(X_{\text{vuoto}} S_{\text{tiiviste}})_{\text{kuiva}} = 21,4 \mu\text{l l}^{-1}\text{h}^{-1}\text{Pa}^{-1}$ keskivirheellä $2\sigma = \frac{2 \cdot \Delta k_{\text{kuiva}}}{k_{\text{kuiva}}} < 7\%$, kun keskiarvossa otettiin huomioon kaikki paineeroiltaan vähintään $\Delta p_{\text{sisä-ulkko}} \geq \Delta p_{\text{kynnys}} = 130$ Pa olevista mittapisteistä lasketut k_{kuiva} -kertoimet. Termi oli yli kaksinkertainen sisäkokeen vuototermin verrattuna. Ympäristön pienempi lämpötila ulkokokeessa pitäisi vain hidastaa diffuusiota, joten todennäköisimmin vuodon kasvu liittyy voimakkaampaan termiseen diffuusioon.

Ulkokokeessa havaittiin myös absoluuttisen ja suhteellisen kosteuden mielenkiintoinen käyttäytyminen sisälämpötilan funktiona. $AH(T)$ kuvassa 20 mukaili melko hyvin suoraa, jossa AH -arvo lähes puolittui lämpötilan pudotuksessa $T = 30$ °C \rightarrow 20 °C. Samassa lämpötilasiirtymässä RH kuvassa 21 laski arvosta $RH = 20\%$ avoon $RH = 17\%$, mikä vastaa suhteellista muutosta 3%. RH pysyi siis hyvin vakana, ja se voidaan perustella Henryn lailla (4). Kun vesihöyryn osapaineet kuoren

sisä- ja ulkopuolella tasoittuivat samoiksi, myös pinnoille adsorboituneet konsentraatiot tasoittuivat ja diffuusion aiheuttama vuoto pysähtyi. ICON:issa tämä johti absoluuttisen kosteuden laskuun ympäristöä alemmalle tasolle, koska ICON:in sisäilma oli lämpimämpää ja siten sama AH aiheuttaisi suuremman osapaineen.

Johtopäätöksenä tiiviisti suljetun ICON:in kosteusvuoto sisäkokeen mukaisessa ympäristössä yksiköissä [$\mu\text{l h}^{-1}$] oli alle $4,08 \mu\text{l l}^{-1}\text{h}^{-1}\text{Pa}^{-1}$ kerrottuna sisä- ja ulkoilman vesihöyrynpaineiden erolla ja ICON:in sisäilmatilavuudella litroissa. Kuivan ilman vuoto vaihteli mittauksissa hämmästyttävän paljon, mikä todennäköisesti aiheutui termisestä diffuusiosta. Seuraavassa luvussa tarkastellaan vuotonopeuden muutosta ICON:in kannen pulttien kireyden funktiona.

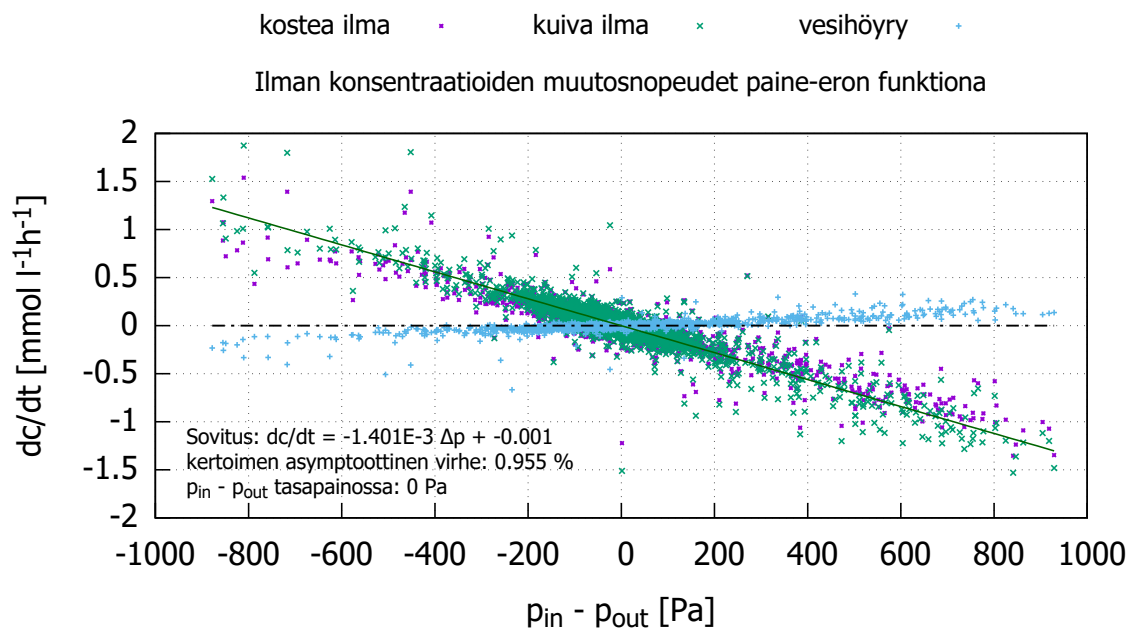
5.4.3 Kannen pulttien kireyden vaikutus

Löysyttämällä kannen pulttien kireyttä pyrittiin selvittämään niiden mahdollinen vaikutus vuotonopeuksien kasvuun. Pultit oli laitteen ohjeissa määritetty kirittäväksi 10 Nm momenttiin, ja tässä koesarjassa käytiin läpi momentit 2 Nm välein. Tiiveyskokeet tehtiin siis momenteilla 8, 6, 4 ja 2 Nm, minkä jälkeen tehtiin vertailumittaus, jossa kansi jätettiin raolleen. ICON pidettiin ulkona seinään asennettuna, jotta nähtiin monipuolisten ja todenmukaisten ympäristöolosuhteiden vaikutukset vuotonopeuksiin.

Suora kosteusvuodon mittaus RH ja T antureilla sisäkokeen tapaan oli kuitenkin hankalampaa ulko-olosuhteissa, kuten edellä todettiin. 8 Nm momentin mittauksessa ulkolämpötilan ja -paineen ollessa tovin vakioina saatiin vuototermiksi $(X_{\text{vuoto}}S_{\text{tiiviste}})_{\text{H}_2\text{O}} < (3,7 \pm 0,9) \cdot 10^{-3} \frac{\mu\text{l}}{\text{l h Pa}}$. Muista mittauksista ei saatu luotettavaa ylärajaa kosteusvuodolle.

Mittaussarjasta tehtiin mielenkiintoinen havainto: Kun ICON:issa vallitsi ylipaine, kuivan ilman poistuessa vesihöyryn määrä aina lisääntyi. Tämä voitaisiin vielä selittää silläkin, että piirilevystä desorptoituu vettä nopeampaa kuin sitä vuotaa ympäristöön erityisesti, jos ylipaine johtui lämmön kasvusta ICON:issa. Se ei kuitenkaan selitä sitä, että ulkopaineen kasvun tai sisälämpötilan laskun alipaineistamassa ICON:issa kuivan ilman vuotaessa sisään vesihöyryn absoluuttinen määrä väheni. Tämä näkyy hyvin 8 Nm -kireyden kokeesta piiretyssä kuvassa 22. Alipaineessa kemiallinen diffuusio ICON:iin voimistuu. Koska ympäristön painenousu on yleensä lämpötilan nousun seuraus, johtaa se myös ICON:in lämpötilan nousuun ja tällöin desorptionkin pitäisi kasvaa. AH :n laskun voi tilanteessa aiheuttaa ainoastaan terminen diffuusio.

Kuivan ilman vuodot laskettiin samalla tavalla kuin aiemmissa mittauksissa, ja



Kuva 22: Kuivan ilman ja vesihöyryn muutosnopeudet ICON:issa systeemin ja ympäristön paine-eron funktiona kannenpulttien kireydellä 8 Nm.

niiden tulokset koottiin taulukkoon 1. Taulukossa kuvattiin myös mittauksen kesto sekä lämpötila- ja RH -välit, joissa ICON:in sisäilma oli kunkin kokeen ajan.

Keskimääräiset vuototermit olivat lähes samat kireyskokeissa 10 ja 8 Nm. Kireyksillä 6, 4 ja 2 Nm termit puolestaan olivat puolta pienemmät, mikä sotii hypoteesia vastaan. Eri suuruusluokkaiset vuotonopeudet havaittiin sisälämpötiloiltaan ja -kosteuksiltaan samankaltaissa kokeissa.

Suurin ero kokeissa oli lämpötilan muuttuminen ajan funktiona. Ulkolämpötilan lasku kasvattaa samansuuntaista lämpö- ja painegradienttia tiivisteessä, jolloin terminen ja kemiallinen diffuusio molemmat kasvavat johtaen suurempaan kuivan ilman vuotoon ICON:ista ympäristöön. 10 Nm koe oli ainoa, jossa ulkolämpötila oli lähes jatkuvassa laskussa. Kuvasta 15 B nähdään, että lasku oli jopa 10 °C 70 tunnin kokeessa. Muissa kokeissa ulkolämpötila lopussa oli suurempi tai lähes yhtä suuri kuin alussa.

8 Nm -koe oli ainoa, jossa auringonpaiste aiheutti useita voimakkaita lämpöpiikkejä. Piikin nousuvaiheessa ulkolämpötila kasvaa paljon, jopa sisälämpötilaa suuremmaksi, jolloin kuivaa ilmaa vuotaa nopeasti systeemiin. Piikin laskuvaiheessa kokonaisdiffuusio kasvoi vieläkin suuremmaksi, sillä sisälämpötila ja -paine olivat ehdtineet nousta auringonpaisteessa paljon, mikä kasvatti molempia gradientteja. Nämä

Taulukko 1: Kokeet ulkona eri kannen pulttien kireyksillä, ja niille laskettuja vuotoja 2σ -virheineen.

Kireys [Nm]	T [°C]	RH [%]	Kesto [h]	vuoto _{kuiva} [$\frac{\mu\text{l}}{\text{h Pa}}$]
10	20 - 30	15 - 30	70	$21,4 \pm 1,5$
8	15 - 35	25 - 45	170	$24,5 \pm 0,9$
6	20 - 35	25 - 30	70	$11,2 \pm 0,5$
4	15 - 35	25 - 30	90	$11,7 \pm 0,6$
2	15 - 35	15 - 25	170	$11,6 \pm 0,4$
0	10 - 35	15 - 65	70	$49,4 \pm 17,3$

selittävät 8 Nm -kokeen suuren vuototermin.

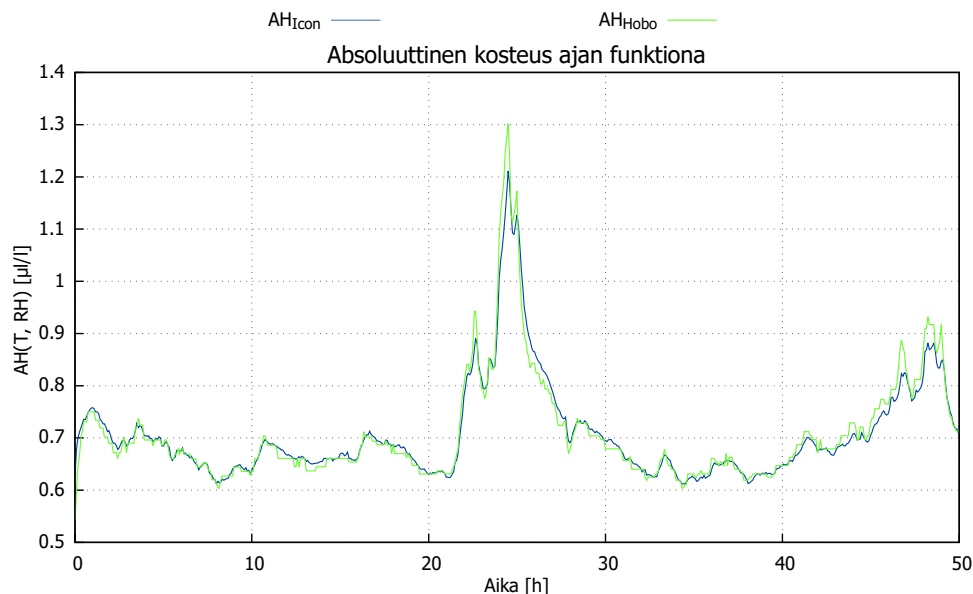
Terminen diffuusio havaittiin selvästi kaikissa mittaussarjan kokeissa. Se antoi selityksen myös sille, miksi kuivan ilman vuotokerroin havaittiin jokaisessa kokeessa reilusti suuremmaksi kuin kostean ilman vuotokerroin. Ilman lämpögradientteja kosteus voisikin vuotaa kuivaa ilmaa nopeammin.

5.4.4 Systemissä haihtuvan veden vaikutus

Haihtuvan veden vaikutusta ICON:in sisäilman kosteuteen tutkittiin kokeessa, jossa ICON:in sisään laitettiin pahvinen vesimuki. Kannen pultit kirittiin normaalisti 10 Nm momenttiin. Tässä kokeessa hyödynnettiin myös HOBO-mittaria, joka teipattiin sisään kanteen mittaamaan sieltä viileämmän ilman lämpötilaa ja kosteutta. Siihen liitettiin myös ulkoiset lämpösensorit mittaamaan suoraan alumiinikannen sisäpinnan lämpötilaa: toinen kannen keskelle ja toinen kylmään alanurkkaan.

Absoluuttinen kosteus mittauksen edetessä sekä ICON:illa että HOBO:lla mitattuna esitettiin kuvassa 23. Molemmat mittarit antoivat samankaltaisia arvoja, ja siten ilman katsottiin olevan lähellä kemiallista tasapainoa. Toisinaan AH piirilevyllä oli kuitenkin suurempi kuin kannen vieressä, ja toisin päin. Tämä voidaan kuitenkin laittaa HOBO:n mittaustarkkuuden piikkiin, sillä sen RH arvot olivat välillä $75\% \leq RH \leq 90\%$, ja lämpötilassa 10 °C mittarille oli määritetty maksimikosteus $RH \leq 87\%$. Tämä raja rikkoutui ajanhetkellä $t \approx 25\text{ h}$, kun auringonpaiste lämmitti ICON:ia. Kosteus madaltui silti nopeasti siedettävälle tasolle vesikupista huolimatta.

ICON:in ja HOBO:n lämpötilamittaukset ja kastepisteet on esitetty kuvassa 24. Ilman lämpötila kannen vieressä oli noin 13 °C ICON:in mittaamaa alempi. Tämän-

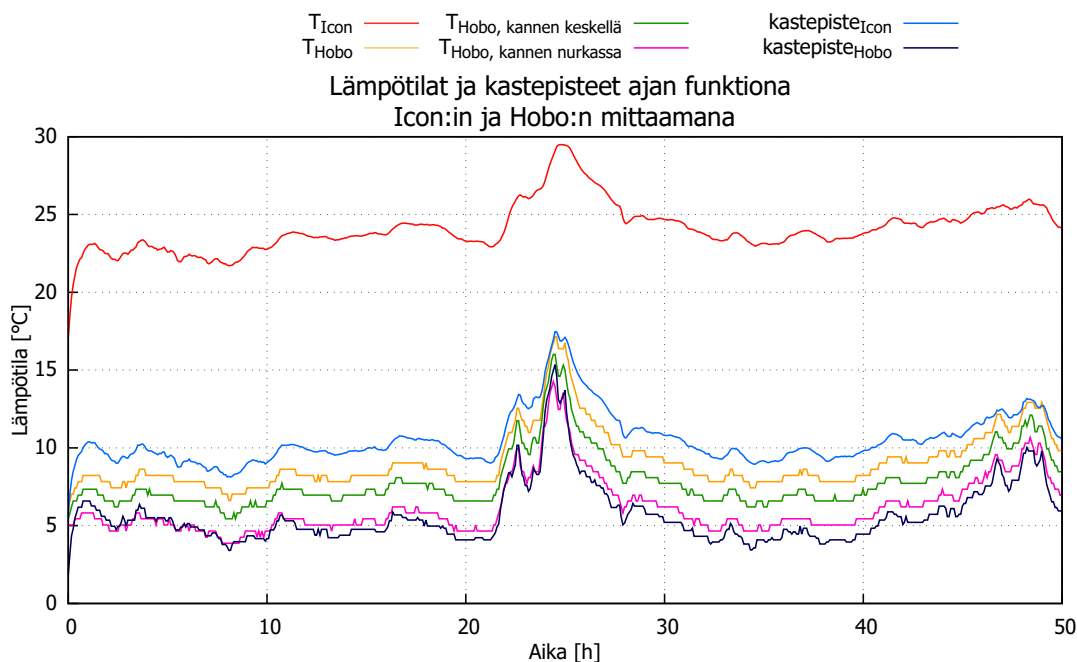


Kuva 23: Absoluuttinen kosteus ICON:issa ajan funktiona mittauksessa, jossa oli avoin vesikuppi tiiviisti suljetun ICON:in sisällä.

kin perusteella sisäilman keskimääräinen lämpötila oli huomattavasti ICON:in mitaamaa matalampi, mutta tarkkaa arvoa on vaikea määrittää. Huolestuttava havainto oli se, että kannen lämpötila kylmässä nurkassa oli toisinaan alle sitä ympäröivän ilman kastepisteen. Näin kävi erityisesti auringonpaisteen aikaan. Kokeen päätteeksi vettä oli kondensoitunut huomattavasti koko kannen alueelle. Myös piirilevyn laidassa olevaan kiinnitysruuviin oli tiivistynyt vesipisara, mutta muuten elektroniikka oli pysynyt vedeltä suojassa. Pelkkä ilmankosteuskin on kuitenkin vaarallinen ollessaan näin korkea.

Tärkeä huomio oli sekin, että ICON:in piirilevyn lämpötilassa ilman suhteellinen kosteus oli koko kokeen ajan matala: $30\% \leq RH_{\text{ICON}} \leq 42\%$. Siten sisä- ja ulkolämpötilan erosta riippuen jo pienikin mitattu kosteus voi olla merkki kondensation mahdollisuudesta kannen sisäpinnalla.

Kosteusvuotoa ei voitu tässäkin mittauksessa määrittää vaihtelevien ympäristöolosuhteiden vuoksi, mutta kuivan ilman vuodoksi laskettiin $\text{vuoto}_{\text{kuiva}} = 10,8 \pm 0,8 \frac{\mu\text{l}}{\text{h Pa}}$.

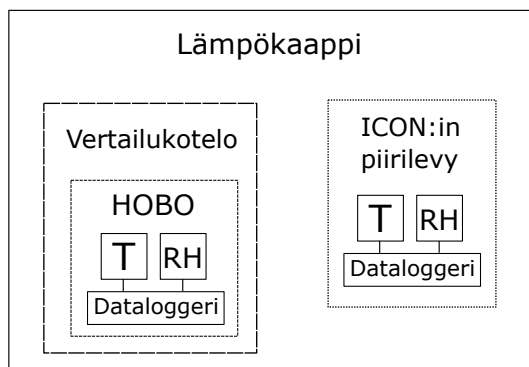


Kuva 24: Kastepisteet ja lämpötilat ICON:illa ja HOBOn:lla mitattuna sisäilmasta, sekä alumiinikannen lämpötila keskellä ja alakulmassa.

5.4.5 Vertailumittaukset lämpökaapissa

Koska kosteusvuodon määrittäminen hankaloitti piirilevyllä desorptoitua kosteutta, tehtiin koe lämpökaapissa tyhjällä kotelolla ilman piirilevyjä. Lämpökaappi oli Vötsch Industrietechnik VT 4011. Käytetty kotelo ja sen tiivisteet olivat samaa materiaalia kuin ICON:in omassa kuoressa, mutta tämän kokeen kotelo oli huomattavasti pienempi. ICON:in kotelossa käytettiin yli kaksinkertainen pituus tiivistettä tämän kokeen koteloon verrattuna. Se laitettiin sisätiloissa olosuhdekaappiin, jolla simuloitiin eri lämpötiloja. Kaapissa oli tuuletin, joka sekoitti ilman tasalämpöiseksi. Lisäksi kaappiin luotiin kostea ilma asettamalla 4 vedellä puolilleen täytettyä pahvikuppia pohjalle. Kotelon sisälämpötilaa ja kosteutta mitattiin HOBOn:lla ja ympäristön, eli lämpökaapin, kosteutta ja lämpötilaa mitattiin irrallisella ICON:in piirilevyllä. Mittausjärjestelyn lohkokaavio on kuvassa 25.

Olosuhdekaappi ohjelmoitiin kuvan 26 mukaisesti lämpötilasykleihin. Kuvassa näkyy myös suhteellinen kosteus, mutta ensimmäiset 16 h siitä oli virheellistä dataa. Kotelon sisältämää kosteutta mitattiin HOBOn:lla, ja se ei aluksi kyennyt mittaamaan kosteutta liian alhaista kosteutta. HOBOn virheelliset RH -arvot reagoivat tällä alueella pelkkään lämpöanturin arvoon, mikä loi vaikutelman suhteellisen kos-



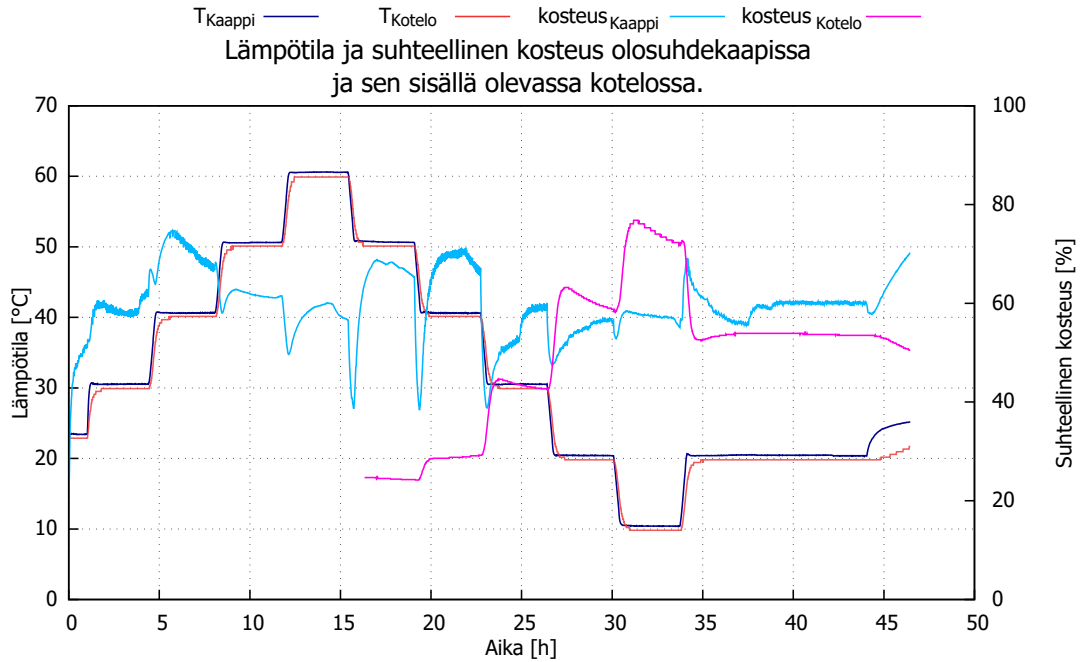
Kuva 25: Lohkokaavio vertailumittauksen koelaitteistosta lämpökaapissa.

teuden noususta lämpötilan mukana. Ajanhetkestä $t = 19$ h lähtien RH oli kasvanut vuodon ja viilenemisen johdosta havaittavalle tasolle.

Lämpötilassa $T = 40$ °C vuoto oli hyvin vähäistä. Kun $T = 30$ °C, kotelosta alkoi vuotaa kosteutta pois. Koska lämpötila oli sama sekä kotelossa että olosuohdekaapissa, täytyi tasapainossa myös RH olla sama. Siitä huolimatta ICON mittasi suuremman kosteuden. Tässäkin kokeessa syntyi lämpögradientteja syklin alussa, ennen kuin lämpötilat tasaantuivat noin 50 min kuluessa. Joko se vaikutti RH -eroon, tai muuten RH_{kotelo} täytyisi olla korkeampi kuin RH_{kaappi} . Mahdollinen kalibrintiero ei vaikuttaisi vuotonopeuteen, mutta terminen diffuusio vaikuttaisi.

Vesihöyrylle mitattiin vuotonopeus $(X_{\text{vuoto, vertailu}} S_{\text{tiiviste}})_{\text{H}_2\text{O}} = (8 \pm 3) \cdot 10^{-3} \frac{\mu\text{l}}{\text{l h Pa}}$ lämpötilan laskiessa $T = 40$ °C \rightarrow 30 °C. $X_{\text{vuoto, vertailu}}$ on suoraan verrannollinen vuotoalueen pinta-alaan, joten olettamalla lähes koko vuodon tapahtuvan tiivisteen läpi, voitiin ICON:in kotelon vuoto approksimoida kaksinkertaiseksi tiivistetyn sauman pituuden mukaisesti. Siten ICON:in vuoto olisi $(X_{\text{vuoto, ICON}} S_{\text{tiiviste}})_{\text{H}_2\text{O}} \approx (17 \pm 6) \cdot 10^{-3} \frac{\mu\text{l}}{\text{l h Pa}}$.

Lämpötilan laskiessa $T = 20$ °C \rightarrow 10 °C, havaittiin selkeämmin vuodon tapahtuvan eri nopeuksilla eri vaiheissa. Kaapin ja kotelon lämpötilat alkoivat laskemaan kiihtyvästi, jolloin paine-ero kasvoi nolasta arvoon $\Delta p = p_{\text{kotelo}} - p_{\text{kaappi}} = 250$ Pa. Tällä välillä mitattiin vuotonopeus $(X_{\text{vuoto, vertailu}} S_{\text{tiiviste}})_{\text{H}_2\text{O}} = (36 \pm 7) \cdot 10^{-3} \frac{\mu\text{l}}{\text{l h Pa}}$. Kun olosuohdekaappi oli viilentynyt ohjelmoituun arvoon, kotelon vuotonopeus taantui laskuun paine-ero tasaantuessa nopeasti arvoon $\Delta p = 170$ Pa, jolloin myös kotelo saavutti tavoitelämpötilan. Tällä välillä vuototermi oli aiempaakin suurempi: $(X_{\text{vuoto, vertailu}} S_{\text{tiiviste}})_{\text{H}_2\text{O}} = (141 \pm 17) \cdot 10^{-3} \frac{\mu\text{l}}{\text{l h Pa}}$. Nopeutumisen selittyi sillä, että lopussa lämpögradientti loiveni ja kosteuden poistumista kylmempään ympäristöön hidastava terminen diffuusio lakkasi. Lisäksi paine-ero pääsi hieman tasoittumaan,



Kuva 26: Lämpötila ja suhteellinen kosteus kokeessa olosuhdekaapissa, ja kotelossa sen sisällä.

mikä myös kiihdytti vuotoa. Itse asiassa tämä koe kuvasikin hyvin termisen diffuusion suuruutta kemialliseen diffuusioon verrattuna. Halutessa niiden keskinäinen suhde voitaisiin laskea lämpögradientin funktiona kuvan 26 kuvaajista. Tämän työn rajoissa siihen ei kuitenkaan lähdetty.

Seuraavan syklin alkaessa ajanhetkellä $t = 33 \text{ h } 30 \text{ min}$ lämpötila kääntyi takaisin nousuun. Vuoto oli jälleen nopeaa, noin $80 \cdot 10^{-3} \frac{\mu\text{l}}{\text{h Pa}}$ paine-eron tasoittuessa arvosta $\Delta p = 120 \text{ Pa}$ nolnaan. Sitten paine-ero kääntyi negatiiviseksi ja vuotovauhdiksi hidastui noin $10 \cdot 10^{-3} \frac{\mu\text{l}}{\text{h Pa}}$. Tämä taas kuvaa sitä, kuinka kosteus ajautuu ylipaineesta helpommin kohti pienempää painetta kuin toisin päin. Tässä terminen diffuusio nopeutti vuotoa, ympäristön ollessa koteloa lämpimämpi. Kokonaisuudessaan tässä kokeessa tehtiin monta tärkeää havaintoa koskien kosteusvuotojen luonnetta.

6 Tulokset

Kosteusmuutoksiin vaikuttaa moni tekijä, ja niiden yhteisvaikutusta oli haastavaa tulkita. Laitekohtaiset arvot eri vaikutusten suuruuksille on kannattavaa tutkia ensin yksitellen eri koejärjestelyillä, ennen kuin tulkitsee vaikutuksien summaa.

Ensimmäisissä kokeissa todettiin, että ICON:in asennusympäristössä ulkona vuotojen määrittäminen on huomattavasti haastavampaa, kuin vakaissa olosuhteissa sisätiloissa. Suhteellisen kosteuden havaittiin pyrkivän tasapainotilaan, joka riippuu ympäristön vesihöyryn osapaineesta, eli siten suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta. Absoluuttisen kosteuden muutos muistutti suoraa lämpötilavälillä $20\text{ °C} \leq T \leq 30\text{ °C}$.

Kuivan ilman vuoto vaihteli eri mittausten välillä ilman selkeää korrelaatiota kannen pulttien kireyteen. Se vaikutti riippuvan lähinnä ympäristöolosuhteista, ja BMP280-sensorin sijainti saattoi antaa virheellisiä arvoja kuvaamaan ICON:in sisäilman keskimääräistä lämpötilaa. Lasketut vuodot ovat taulukossa 1. Kosteusvuotoa ei voitu luotettavasti määrittää ulkomittauksissa, koska ympäristön kosteutta ei tiedetty. Termisen diffuusion havaittiin vaikuttavan vuotoon vahvasti, eikä sitä oltu otettu kemiallista diffuusiota kuvaavissa teoriaosuuden yhtälöissä huomioon.

Nestemäisen veden todettiin olevan suuri riskitekijä ICON:in kuoren sisällä, koska se nosti viileiden alueiden ilmankosteuden laajalti lähelle maksimia. Kondensiovettä syntyi näin myös piirilevyille kylmään kiinnitysruuviin. ICON:in kosteusanturi on kuitenkin paljon kylmiä kohtia lämpimämmällä alueella, joten se näyttää rutkasti pienempää suhteellista kosteutta.

Termisen diffuusion vaikutus havaittiin oletettua suuremmaksi, ja sen suuruutta kuvaa vuodot olosuhdekaapissa tehdyssä kokeessa. Samassa kokeessa todistettiin myös ylipaineen ja alipaineen vaikutusten ero kosteusvuodolle. Lasketut vuotonopeudet ovat verrattavissa myös ICON:in kuoreen ottamalla tiivisteiden pituudet huomioon.

7 Yhteenveto

Tämän työn tavoitteena oli selvittää, voidaanko ICON-nimisen kuitusolmutuotteen kosteusvuoto määrittää tuotteen sisälle sijoitetun kosteus- ja lämpötilasensorin avulla. Tätä selvitettiin sekä teoriassa, että käytännön kokeissa vaihtelevissa sääolosuhteissa. Lisäksi tutkittiin kannen pulttien kireyden vaikutusta vuotoihin. Kosteuden haittoja elektroniikalle perusteltiin kirjallisuusviittauksilla, ja kosteudentorjuntakeinoja pohdittiin fysiikan näkökulmasta.

Työn edetessä todettiin, että myös ympäristön kosteuden mittaamisesta olisi ollut hyötyä. Lisäksi Raspberry PI olisi voitu ohjelmoida tekemään mittauksia tiheämpään, ja supistamalla sitten datamäärää laskemalla suureille keskiarvot esimerkiksi viiden minuutin välein.

Kokeissa huomattiin, että kosteusvuodon suuruudelle ei voitu määrittää alarajaa suoraan kuivan ilman vuodon perusteella, sillä kuivalla ilmalla vaikutti olevan suurempi diffuusiokerroin tämän työn olosuhteissa. Työn aikana todettiin myös, että ICON sisältää haihtuvan kosteuden lähteen. Algoritmia kotelon tiiveyden määrittämiseksi pelkän sisäkosteuden ja -lämpötilan perusteella ei siten voitu saavuttaa.

Tiiveyden reaaliaikaiseen tarkkailuun tarvittaisiin kosteusmittarit lämpösensorineen sekä ICON:in sisä- että ulkopuolelle. Tämän lisäksi tulisi selvittää nopeus, jolla pääosin piirilevyiltä desorptoituu kosteutta eri lämpötiloissa. Tämä voitaisiin tehdä esimerkiksi mittaamalla ensin tyhjän ICON:issa käytetyn kotelon vuoto, ja vertaamalla kosteuden kasvua sitten samoissa olosuhteissa piirilevyn ollessa saman kotelon sisällä.

Vuodon määrittäminen ei silti ole ICON:in kosteusanturin ainoa tehtävä. Kosteutta voi päätyä kotelon sisälle muutenkin, kuten huoltotöiden ohella kosteissa olosuhteissa. Elektroniikka ei välitä, mistä kosteus on peräisin, vaan kriittistä on kosteuden läsnäolo. Elektroniikan kannalta suhteellisen kosteuden tulisi pysyä tarpeeksi matalana vahinkojen välttämiseksi, joten suurista RH -arvoista tulisi huolestua.

Tuntemalla vuotonopeudet voitaisiin ennustaa kosteuden mahdollinen kasvu sääolosuhteiden vaikutuksesta hyvin etukäteen. Lyhyemmän aikavälin ennuste voidaan kuitenkin tehdä myös ilman tietoa vuodoista. Jos absoluuttinen kosteus nousee tuotteessa niin suureksi, että se voisi realistisella lämpötilan laskulla johtaa suureen suhteelliseen kosteuteen, on syytä reagoida. Käytännössä laitteeseen voitaisiin ohjelmoida suurin sallittu RH -rajaarvo, joka laitteessa saisi olla koko käyttölämpötila-alueellaan. Tästä määritettäisiin absoluuttisen kosteuden raja lämpötilan funktiona kaavalla (9). Rajaa suuremmista AH -arvoista laite voisi hälyttää etäyhteyksillä huoltohenkilökunnalle ennakoivasi ilman, että RH -taso olisi vielä kyseisessä lämpötilassa liian suuri.

Mikäli viileiden alueiden lämpötilat tiedettäisiin, voitaisiin niillekin laskea RH -arvo absoluuttisesta kosteudesta. Kondensation ennustamiseksi ICON:iin tarvittaisiin siten vain yksi kosteusanturi, mutta lämpösensorit jokaiseen laitteen sisällä tarkkailtavaan sijaintiin.

Tässä työssä käsiteltiin kosteuden vuotomekanismeja ja niiden mittaamista lämpötilan ja suhteellisen kosteuden perusteella ICON:issa. Samoja periaatteita ja teorioita voidaan tästä huolimatta hyödyntää kaikissa muissakin tuotteissa, joissa vaikuttaa samat fysikaaliset ilmiöt. Näitä mittaamenetelmiä kehittämällä voitaisiin saavuttaa perusteellisempi ymmärrys kosteuden käyttäytymisestä näennäisesti suljetuissa systeemeissä.

Viitteet

- [1] V. Verdingovas, (2015).
- [2] K. Saksela ja J. Nyberg, ACOUSTIC CAMERA AND A METHOD FOR REVEALING ACOUSTIC EMISSIONS FROM VARIOUS LOCATIONS AND DEVICES, 2016.
- [3] R. L. Freeman, *Fundamentals of Telecommunications*, 2 ed. (John Wiley & Sons New Jersey, 2005).
- [4] J. Saarenlaita, Opinnäytetyö, 2013.
- [5] Rotronic Instrument Corp staff, The Rotronic Humidity Handbook **12**, 130 (2005).
- [6] H. D. Young ja R. A. Freedman, in *Pearson Education, Inc., publishing as Addison-Wesley*, 13 ed., edited by N. Whilton ja C. Madhavan (Jim Smith San Francisco, 2012).
- [7] B. Duncan, J. Urquhart ja S. Roberts, Engineering **73** (2005).
- [8] J. Huang, Journal of Applied Meteorology and Climatology **57**, 1265 (2018).
- [9] L. Peltonen, (2011).
- [10] C. Hunt, O. Thomas ja M. Wickham, IPC APEX EXPO Technical Conference 2011 **1**, 100 (2011).
- [11] P. Bakker *et al.*, *Dermatological preparations for the tropics*, 2 ed. (Beta Science Shop The Netherlands, 2012).
- [12] A. J. van Heugten, J. Landman, A. V. Petukhov ja H. Vromans, International Journal of Pharmaceutics **540**, 178 (2018).
- [13] D. Ahmad *et al.*, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects **40**, 2686 (2018).
- [14] S. Furuyama, S. Sakuma, Y. Nagai ja J. Moriyama, Water-proof air-permeable filter and use of the same, 2018.
- [15] L. Martin, Y.-H. Chu ja R. Ramesh, Materials Science and Engineering: R: Reports **68**, 89 (2010).
- [16] C. Lin, T. A. Howe ja D. D. Chung, Journal of Electronic Materials **36**, 659 (2007).
- [17] V. Cammalleri, A. I. A. Senior, P. Manager ja S. Gumpertz, "SSPC 2003: The Industrial Protective Coatings Conference and Exhibit, Ernest N. Morial Convention Center, New Orleans, LA, 26 – 29 October 2003," p 210 (2003).

- [18] A. Seppälä ja M. J. Lampinen, *AINEENSIIRTO-OPPI* (Yliopistokustannus, 2017).
- [19] B. Sood ja M. Pecht, IPC Printed Circuit Expo, APEX & Designer Summit (2011).
- [20] K. Katsaros, Encyclopedia of Ocean Sciences 870 (2001).
- [21] O. Carrier *et al.*, Journal of Fluid Mechanics **798**, 774 (2016).
- [22] Adafruit Industries, Adafruit BMP280 Barometric Pressure And Temperature Sensor Breakout, 2019.
- [23] Teleste, ICON9000 datasheet, 2019.
- [24] H. P. Bloch, World Pumps **2009**, 26 (2009).
- [25] HOBO H8 Family User's Manual, 2016.
- [26] Si7006-A20 I2C HUMIDITY AND TEMPERATURE SENSOR, 2016.

Liitteet

Liite 1: Käytetyt suureet

Taulukko 2: Työssä käytetyt suureet

Suure	Selitys	Yksikkö
A	Pinta-ala	[m ²]
AH	Absoluuttinen kosteus	[g/l]
c	Konsentraatio	[mol/l]
D	Diffuusiokerroin	[m ² /s]
E_D	Diffuusion aktivoitumisenergia	[J/mol]
g	Putoamiskiihtyvyys	[m/s ²]
ΔH_S	Entalpiamuutos adsorptiossa	[J]
J	Diffusoituvan veden vuo pinnan läpi	[mol/m ²]
k_T	Terminen diffuusiosuhde	[-]
M_{H_2O}	Veden moolimassa (= 18,016) [5]	[g/mol]
m_{vesi}	Veden massa tietyssä tilavuudessa	[kg]
n	Moolimassa	[g/mol]
n_{H_2O}	Veden moolimassa	[g/mol]
p	Kaasun paine	[Pa]
p_{kuiva}	Kuivan ilman osapaine	[Pa]
p_{H_2O}	Vesihöyryn osapaine ilmassa	[Pa]
$p_{H_2O}^*$	Vesihöyryn kyllästysosapaine	[Pa]
R	Moolinen kaasuvakio (= 8,314) [6]	[J/(mol K)]
RH	Suhteellinen kosteus	[%]
S	Liukoisuusparametri	[J ⁻¹]
T	Lämpötila	[K]
T_d	Kastepiste	[K]
V	Kaasun tilavuus	[m ³]
x	Etäisyys läpäistävässä materiaalissa	[m]
$x_{n,kuiva}$	Kuivan aineen mooliosuus	[-]
x_{n,H_2O}	Vesihöyryn mooliosuus	[-]
X	Diffuusionopeutta kuvaava muuttuja	[kg/(mol s)]
y	Korkeus merenpinnan tasosta	[m]