

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Konetekniikan koulutus

Antti Turunen

MUOVIKOMPOSIITIN KUIVAUS JA KUIVAUKSEN VAIKUTUS LOPPU-  
TUOTTEESEEN

Opinnäytetyö  
Kesäkuu 2018



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Kesäkuu 2018**  
**Konetekniikan koulutus**

Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
013 260 600

Tekijä  
Antti Turunen

Nimeke  
Muovikomposiitin kuivaus ja kuivauksen vaikutus lopputuotteeseen

Toimeksiantaja  
Plashill Oy

**Tiivistelmä**

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää sopivat kuivausparametrit Kareline® PPMS5050 puumuovikomposiitille sekä tutkia käytettyjen parametrien vaikutusta lopputuotteen ominaisuuksiin. Työ toteutettiin Plashill Oy:n toimeksiantona.

Työssä perehdyttiin luonnonkuitukomposiitteihin, niiden ominaisuuksiin, materiaalin ruiskuvaluun sekä materiaalin kuivaukseen. Kuivauksen vaikutuksia materiaalin ominaisuuksiin testattiin iskulujuuskokeessa ja materiaalin kosteuspitoisuutta kuivauksen jälkeen titraamalla.

Työn tuloksena saatiin testituloksia materiaalin kuivumisesta ja kestävydestä. Saatujen testitulosten jälkeen todettiin tarve lisätutkimuksille ja pohdinnan lopussa on esitelty kehitysehdotuksia parempien testitulosten saamiseksi.

Kieli  
Suomi

Sivuja 47

Liitteet 3

Asiasanat  
luonnonkuitukomposiitti, ruiskuvalu, kuivailmakuivuri, kastepistemittaus, kosteuspitoisuus, titraus, iskulujuus



**THESIS**  
**June 2018**  
**Degree Programme in Mechanical Engineering**

Tikkarinne 9  
FI 80200 JOENSUU  
FINLAND  
+358 13 260 600

Author  
Antti Turunen

Title  
Reducing Moisture Content of Natural Fiber Composite and Its Impact on the End Product

Commissioned by  
Plasthill Oy

Abstract

The goal of this thesis was to discover suitable drying parameters for Kareline® PPMS5050 natural fiber composite and study the impact of the given parameters on the end product's qualities. This thesis was assigned by Plasthill Oy.

This thesis focuses on natural fiber composites, their qualities, injection molding of the material and reducing the moisture content of the material. The effects of reduced moisture within the material were measured with impact resistance testing machine and the moisture content of the material was tested by titration.

Tests resulted in receiving data on the material's drying and durability. Gathered data lead to a conclusion that there is a need for more research on the topic. There are propositions on how to get better testing results at the end of conclusions.

Language  
Finnish

Pages 47

Appendices 3

Keywords

natural fiber composite, injection molding, dehumidifying dryer, dew point measurement, the moisture content, titration, impact resistance

## Sisältö

Tiivistelmä	
Abstract	
1 Johdanto .....	6
1.1 Yrityksen esittely .....	6
1.2 Opinnäytetyö ja sen tavoitteet .....	7
2 Perusteet .....	8
2.1 Luonnonkuitukomposiitit .....	8
2.2 Puumuovikomposiitti .....	10
2.3 Kuivaus .....	11
2.4 Kuivailmakuivuri .....	12
3 Laitteiston käyttöönotto .....	14
3.1 Aloituspalaveri .....	14
3.2 Kuivurin suorituskyvyn varmistaminen .....	15
3.2.1 Molekyylisihdin testauksen tulokset .....	16
3.2.2 Vastusten toiminnan toteaminen .....	17
3.2.3 Päätös kuivurin hyväksynnästä tai hylkäämisestä soveltuvaksi kuivauslaitteeksi .....	18
3.3 Näytepullot ja niiden kuivaus .....	19
3.4 Titraattori .....	20
3.5 Materiaalin kuivaus .....	21
3.6 Ruiskuvalu .....	22
3.7 Muu tarvittava laitteisto .....	23
3.7.1 Iskulujuustestauksen testilaite .....	23
3.7.2 Vaaka .....	24
4 Tulokset .....	25
4.1 Materiaalin kuivauksen vaikutus ruiskuvaluparametreihin .....	25
4.1.1 Ruiskutuajan muutokset .....	26
4.1.2 Vaihtopaineen muutokset .....	27
4.2 Iskulujuuskoe .....	28
4.2.1 Iskulujuuskokeen tulokset 80°C kuivauksella .....	28
4.2.2 Iskulujuuskokeen tulokset 90°C kuivauksella .....	29
4.2.3 Iskulujuuskokeen tulokset 100°C kuivauksella .....	30
4.2.4 Iskulujuuskokeen tulokset 110°C kuivauksella .....	31
4.3 Materiaalin kosteusmittaukset .....	33
4.3.1 Materiaalin kosteuspitoisuudet 80°C kuivauksella .....	33
4.3.2 Materiaalin kosteuspitoisuudet 90°C kuivauksella .....	34
4.3.3 Materiaalin kosteuspitoisuudet 100°C kuivauksella .....	35

4.3.4 Materiaalin kosteuspitoisuudet 110°C kuivauksella.....	36
5 Pohdinta.....	37
5.1 Ruiskuvalun parametrit .....	38
5.2 Iskulujuustestin tulosten pohdinta .....	38
5.3 Kosteuspitoisuuksien pohdinta.....	39
5.4 Jatkotutkimusten tarve ja muutokset koejärjestelyissä nähtynä suoritettuun testaukseen.....	40
5.5 Oma oppiminen.....	41
Lähteet .....	42
Liitteet	

# 1 Johdanto

## 1.1 Yrityksen esittely

Tämän opinnäytetyön tilasi Plasthill Oy:n omistama Kareline® natural composites. Plasthill Oy sijaitsee Pyytivaaralla osoitteessa Lukantie 6, 80770 Kontiolahti. Kyseessä on keskisuuri ruiskuvalutuotteita valmistava muoviyritys. Yritys valmistaa tuotteita sarjatuotannossa sekä toimii asiakaslähtöisessä tuotesuunnittelussa. Plasthill Oy on vuonna 1996 perustettu perheyrittäjä, jonka ideologiaan kuuluu ekomateriaalien käyttäminen sekä ekologisten tuotteiden valmistaminen.



Kuva 1. Plastihill Oy:n logo Lähde: 2018. Media. Plasthill Oy. <https://plasthill.fi/sites/default/files/media-plasthill-oy.jpg> Viitattu 5.3.2018

Kareline® natural composites-liiketoiminta siirtyi Plasthill Oy:lle vuoden 2011 alussa. Kareline® natural composites on nykyisin Plasthill Oy:n omistama tuotemerkki. Sen pääasiallinen tehtävä liiketoiminnassa on tuottaa luonnokuitukomposiittia yrityksen sisäiseen käyttöön sekä myytäväksi, kehittää materiaalia ja sen ominaisuuksia, tutkia uusia materiaaliyhdistelmiä sekä suorittaa erinäisiä koeajoja ja testejä sekä ulkopuolisille asiakkaille että yrityksen sisäiseen käyttöön.



Kuva 2. Kareline® natural compositesin logo. Lähde: 2018. Media. Plasthill Oy.  
[https://plasthill.fi/sites/default/files/4\\_media\\_KARELINE.jpg](https://plasthill.fi/sites/default/files/4_media_KARELINE.jpg) Viitattu 5.3.2018

Yrityksen tärkeimpiin arvoihin kuuluu avoimuus uusien toimintatapojen ja materiaalien käyttöönoton suhteen. Tämä näkyy useissa tehtaan toimintamalleissa. Yritys suosii tuotannossaan kierrätettäviä sekä uusiokäytettäviä materiaaleja ja kehittää sekä valmistaa uudenlaisia biomateriaaleja, toimien näin monella tapaa ympäristöarvojen edistäjänä ja edelläkävijänä. Lisäksi yrityksen kaikki tuotteet, niin ruiskuvaletut että Kareline®- luonnonkuitukomposiitit valmistetaan EKOenergiolla.

## 1.2 Opinnäytetyö ja sen tavoitteet

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää sopivat kuivausparametrit polypropeenipohjaiselle Kareline® PPMS5050 puumuovikomposiitille sekä tutkia käytettyjen parametrien vaikutusta lopputuotteen ominaisuuksiin. Ongelmana oli, ettei kuivauksen suhteen ollut tehty todellista tutkimusta, jolla voitaisiin konkreettisesti, mitatun datan pohjalta, todentaa materiaalille parasta kuivausaikaa ja lämpötilaa. Tähän mennessä kuivausparametrit perustuivat vuosien kokemuksen kautta opittuun tuntumaan ja koettuun materiaalin käyttäytymiseen.

Tavoitteena oli selvittää optimaalinen kuivausaika sekä kuivaus lämpötila tälle materiaalille. Muutettujen lämpö- ja aika-arvojen vaikutus materiaalin kosteuteen mitattiin kosteusmittauksella. Materiaalin kosteuden määrää voitiin arvioida

silmämääräisesti koesauvoja ajettaessa muottiin muodostuneen kosteuden määrästä. Muuttuneen kosteuden vaikutus materiaalin ominaisuuksiin taas mitattiin materiaalista tehtyjen iskusauvojen iskulujuusmittauksella. Lisäksi koesauvojen pinnanlaadullisia eroavuuksia muuttuneiden kuivausparametrien pohjalta pystyttiin vertailemaan koesauvoissa esiintyvänä näkyvinä muutoksina.

## 2 Perusteet

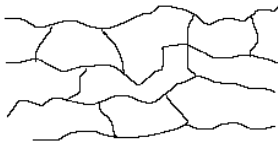
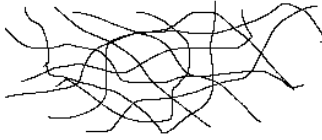
”Komposiitti on yleisnimi kaikille kahden tai useamman materiaalin yhdistelmille, joissa materiaalit toimivat yhdessä, mutta eivät ole lienneet tai sulautuneet toisiinsa” Airasmaa, Kokko, Komppa, & Saarela (1991, 17). Erilaisten komposiittien käyttö muoviteollisuudessa, normaalien muovien korvaavana materiaalina, on aiheena mielenkiintoinen. Puhtaasti muovista tehtävien tuotteiden rinnalle on nykyisin alettu miettimään yhä uusia mahdollisia vaihtoehtoja. Erilaiset muovikomposiitit, joissa osa muovista on korvattu uusiutuvalla materiaalilla, ovat nostaneet asemaansa ja niiden käyttö on lisääntynyt. Syitä luonnonkuitukomposiittien kasvaneeseen käyttöön ovat sekä normaaleista muoveista eroavien ominaisuuksien hyödyntäminen, että ihmisten kasvava ympäristötietoisuus, joka vaikuttaa yhä useampien kuluttajien ostopäätöksiin. Luonnonkuitukomposiittien käytöllä pystytään nostamaan tuotetta valmistavan yrityksen imagoa.

### 2.1 Luonnonkuitukomposiitit

Luonnonkuitukomposiiteissa luonnonkuituna voidaan käyttää esimerkiksi puuta, olkea, hamppua, pellavaa tai puuvillaa. Tässä opinnäytetyössä keskitytään yhteen muovikomposiittien alaryhmään, puumuovikomposiitteihin. Yleisimmin komposiiteissa käytettyjä muovilaatuja ovat kestumuoveista polypropeeni (PP), polyeteeni (PE), polystyreeni (PS) ja polyvinyylikloridi (PVC). Kertamuoveista käytetyimpiä ovat epoksi-, fenoli-, ja polyesterikertamuovit. Kerta- ja kestumuovit



eroavat toisistaan siten, että kestopuovit voidaan lämmön avulla sulattaa takaisin kiinteästä muodosta ja käyttää uudelleen materiaaliin, kun taas kertamuoveja ei voida muovata kuin kerran. Kertamuoveissa polymeerit yhdistyvät toisiinsa kovalenttisin sidoksin rakentaen kolmiulotteisen rakenteen, jolloin rakennetta ei voida palauttaa takaisin muovattavaan tilaan.

Materiaali	Kuva rakenteesta
Termoseptinen eli kertamuovi	
Termoplastinen eli kestopuovi	

Kuva 3. Kesto- ja kertamuovien rakenteellinen eroavaisuus polymeerien välillä.

Luonnonkuitujen lisääminen muoviin tekee materiaalista sekä tiheämpää että lujempaa kuin yksistään muovista valmistetusta materiaalista. Luonnonkuidut ovat huomattavasti ympäristöystävällisempi vaihtoehto kuin synteettisten kuitujen kuten lasikuidun tai hiilikuidun käyttäminen, sillä uusiutuvana luonnonvarana ne ovat hiilijalanjäljeltään pienempiä kuin perinteiset lujitteet. Luonnonkuitujen käyttö vähentää valmistettavassa materiaalissa tarvittavan muovin määrää, lisäten materiaalin kierrätettävyyttä. Korvaamalla osa muovista tuotteessa saavutetaan sekä pienemmät kustannukset että pienennetään syntyvän jätteen määrää verrattuna täysin muovista valmistettavaan tuotteeseen. Luonnonkuitukomposiitit voidaan hyödyntää elinkaaren lopussa myös polttamalla ne energiaksi.

## 2.2 Puumuovikomposiitti

Puumuovikomposiitti on yksi muovikomposiittien sekä luonnonkuitukomposiittien alalajeista, jossa muovi toimii materiaalin runkoaineena eli matriisina, ja lujitemateriaalina käytetään luonnonkuiduista puuta. Erityisesti Suomessa kyseisen komposiitin valmistaminen ja käyttö olisi järkevää, sillä puu on uusiutuvana luonnonvarana yksi suurimmista ja tärkeimmistä raaka-aineista Suomessa. Yleisimmin käytetyn puun määrä komposiitissa on noin 30-60% ja lujitteena voidaan käyttää useita erilaisia puumateriaaleja. Puumateriaaliksi kelpaa niin puujauho, sahanpuru kuin metsähake, jätetpuu tai sellu. Puukuitu hyödynnetään yleensä lyhyenä kuituna tai jauhona yksittäisten pitkien kuitujen sijaan. (Koto & Tiisala 2004.) Puumuovikomposiitin valmistamiseen käytettävä muovimateriaalikin voi, valmistettavan komposiitin käyttökohteen tarvittavien ominaisuuksien salliessa, olla kierrätysmuovia. Muoveilla on ominaisuus koveta jäähtyessä ja pehmetä lämmössä, joka mahdollistaa puun sekoittamisen muoviin. Muovin ollessa sulassa tilassa voidaan siihen helposti sekoittaa muita materiaaleja, jotka muovin jäähtyessä muodostuvat yhtenäisen rakenteen, jota kutsutaan komposiitiksi.

Yhdistämällä puuta ja muovia yhdeksi seokseksi ja valmistamalla siitä tuotteita saadaan molempien materiaalien parhaat ominaisuudet yhdistettyä yhteen materiaaliin. Puun lisääminen parantaa sekä materiaalin lujuutta mutta myös materiaalin kierrätettävyyttä tuotteen elinkaaren lopussa. Yleisesti puumuovikomposiitti voidaan hävittää polttamalla ja hyödyntää energiana tai jauhaa uudelleen käytettävissä olevaksi materiaaliksi. Tämä ei onnistu esimerkiksi lasilujitteisille komposiiteille, jotka elinkaarensa päättyessä muodostuvat ongelmallisiksi, sillä niiden hävittämiseksi ei ole yksinkertaista ja helppoa keinoa. Muovimatriisi taas tekee puusta huomattavasti paremmin säänkestävän. Puumuovikomposiitti sieittää paljon paremmin olosuhteiden ja ympäristön muutoksia kuin yksistään puusta valmistetut tuotteet.

Yhdistettynä komposiitiksi puu ja muovi luovat materiaalin, jolla on painoonsa nähden korkea lujuus ja jäykkyys. Luonnonkuitujen käyttö komposiitissa vähentää materiaalin valmistuskustannuksia, sillä luonnonkuidut ovat edullisia ja laajasti saatavilla. Verrattaessa perinteisiin lujitteisiin ovat luonnonkuitulujitteiden hinnat vain murto-osan suuruisia. Materiaalin ominaisuuksien kannalta verrattuna

taas esimerkiksi puhtaasti muovista valmistettavissa muovituotteissa täytyisi käyttää erikoismuoveja, jotka ovat erittäin kalliita eikä niillä kaikilla osa-alueilla siltikään saavutettaisi komposiittien ominaisuuksia.



Kuva 4. Kareline® PPMS5050-puumuovikomposiittia granulaattimuodossa. Lähde: 2018. Media. Plasthill Oy. [https://plasthill.fi/sites/default/files/Kareline-PPMS-COW-small\\_0.jpg](https://plasthill.fi/sites/default/files/Kareline-PPMS-COW-small_0.jpg) Viitattu 5.3.2018

### 2.3 Kuivaus

Materiaalin kuivaus on ruiskuvalutuotteita valmistettaessa tärkeä osa tuotantoprosessia. Erityisen tärkeää kuivaus on luonnokuitukomposiittimateriaaleja käytettäessä, sillä näiden materiaalien kosteuspitoisuus on lähes poikkeuksetta moninkertainen puhtaaseen muovimateriaaliin verrattaessa.

Ruiskuvalussa materiaalin kosteudella on suuri merkitys lopputuotteen ominaisuuksiin ja ulkonäköön. Yleisimmät ongelmat kosteaa materiaalia käytettäessä ovat tuotteeseen syntyvät värivirheet, joita yleensä kutsutaan raidoiksi. Ruiskuvaltaessa materiaalissa oleva kosteus alkaa kiehuaan prosessin korkeista lämpötiloista johtuen. Tämä kiehuminen aiheuttaa tuotteissa raidoitumista.

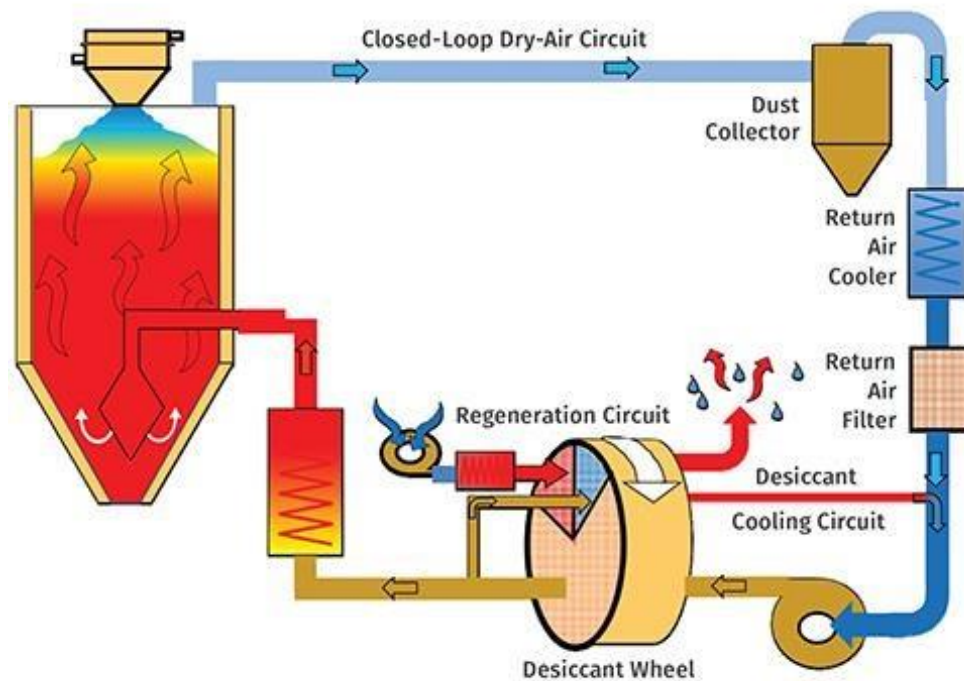
Suuren kosteuspitoisuuden takia puumuovikomposiiteissa kiehumisesta johtuvat ongelmatkin ovat suurempia. Ammattilaiskielessä tässä tapauksessa puhutaan ”räiskimisestä”. Sulaa materiaalia ruiskuttaessa voidaan selkeästi kuulla rutinaa ja räiskintää johtuen materiaalissa kiehovasta vedestä. Tämä saattaa aiheuttaa pahimmassa tapauksessa sulan materiaalin purkautumisen jo ennen muottiin pääsyä, heti suuttimen jälkeen. Kosteaa materiaalia aiheuttaa myös ajan saatossa korroosiota sylinteriin, materiaalikuljetus ruuviin ja paluuvirtasulkuun sekä aiheuttaa muotin likaantumista. Tiedot kostean materiaalin vaikutuksista laitteistoon ovat peräisin Groche Technik GmbH:sta joka on suuri saksalainen ruiskuvalu-koneosien valmistaja.

Yleisimpiä kuivurityyppejä joita teollisuudessa käytetään, ovat kuumailmakuivurit, kuivailmakuivurit sekä paineilma-kuivurit. Tämän opinnäytetyön kannalta tärkein näistä kuivurityypeistä on kuivailmakuivuri, sillä sellaista käytettiin tarvittavan ja testattavan materiaalin kuivauksessa.

## **2.4 Kuivailmakuivuri**

Kuivailmakuivurin toimintaperiaate on verrattain yksinkertainen. Kuivuri lämmittelee vastuksella ilmaa ja kuljettaa sen materiaalikuivaimen pohjalle. Tämän jälkeen ilma kulkee kuivattavan materiaalin lävitse irrottaen mukaansa materiaalissa olevaa kosteutta. Tämä perustuu lämpimän ilman ominaisuuteen nousta ylöspäin. Lisäksi ilman virtausnopeutta kasvatetaan kuivurin pohjalle sijoitetulla puhaltimella. Kosteaa kuuma ilma ohjataan yleensä erilaisten suodattimien, kuten pölysuodattimen, kautta molekyylihihiptaruunalle, joka absorboi kosteuden itseensä päästäen näin kuivuneen ilman lävitseen. Tämän jälkeen kuivatettu ilma kiertää takaisin vastuksille ja kierros toistuu. Tällöin puhutaan suljetusta kierrosta. Suurin osa teollisuudessa käytettävistä kuivureista on suljetun kierron kuivailmakuivureita.

FIG 6 Desiccant Wheel Dryer Air Flow Circuits



Kuvio 1. Suljetun kierron kuivailmakuivurin toimintaperiaate. Lähde: Stoughton, P. 2014. How to Dry PET for Container Applications. Plastics Technology. <https://d2n4wb9orp1vta.cloudfront.net/cms/1214ptTipsPET6.jpg;width=560> 21.4 .2018

Kuivailmakuivureissa on vähintään kaksi kuivauspatruunaa eli kosteutta absorboivaa materiaalia sisältävää yksikköä. Tällöin toista kuivauspatruunaa käytetään ilman kuivattamiseen ja toista patruunaa regeneroidaan eli kuivataan kosteudesta erillisellä vastuksella. Regeneroitavan kuivauspatruunan kosteus vapautetaan järjestelmän ulkopuolelle. Tällä kierrolla saadaan aikaan jatkuva kierto, jonka tarkoituksena on varmistaa kuivauspatruunan kyky imeä ilmassa oleva kosteus itseensä.

### 3 Laitteiston käyttöönotto

Ennen laitteiston käyttöönottoa täytyi selvittää yrityksen intressit siitä, mitä materiaalista tutkittaisiin. Kuivauksessa käytettävä laitteisto sekä tutkittava materiaalierä täytyi poistaa ja erottaa muusta tuotannosta. Tutkimuslaitteiston, kuten titraattorin, siihen tarvittavien aineiden ja lisälaitteiden sekä iskulujuuskoelaitteen käyttömahdollisuus täytyi varmistaa.

#### 3.1 Aloituspalaveri

Aloituspalaverissa selvitettiin, mitkä olisivat yritykselle tärkeitä selvitettäviä arvoja ja parametrejä sekä millaista dataa yritys halusi saada testauksesta. Alustavaksi kuivauslaitteistoksi päätettiin GERGO-Apparatebau GmbH & Co, KG Type GTT-201-kuivuri. Kuivausikkunaksi valittiin neljä lämpötilaa neljällä eri aikajaksolla ja neljällä aloitusnäytteellä. Valitut lämpötilat olivat 80°C, 90°C, 100°C ja 110°C ja ne valittiin materiaalin ominaisuuksien sekä yleisesti kuivauksessa käytettävien lämpötilojen mukaan. Kuivausajaksi valittiin kaksi, neljä, kuusi ja kahdeksan tuntia.

Koska pisimmäksi kuivausajaksi valittiin kahdeksan tuntia ja kuivaus täytyi näin suorittaa neljänä erillisenä päivänä, päätettiin jokaisena päivänä ottaa myös kuivaamaton materiaalinäyte, joita voitaisiin verrata keskenään. Jokainen kuivattava materiaalierä oli samasta materiaali erästä tasalaatuisuuden saavuttamiseksi.

Näytteistä haluttiin selvittää tärkeimpänä kriteerinä niiden sisältämä kosteus kuivauksen jälkeen. Toiseksi haluttiin selvittää, vaikuttaako kuivaus materiaalista valmistettavien kappaleiden iskulujuuteen. Viimeisimpänä haluttiin tietää kuiva-  
tun materiaalin vaikutuksista ruiskuvaluun.

### 3.2 Kuivurin suorituskyvyn varmistaminen

Ennen tuloksissa käytettävän testattavan materiaalin kuivausta oli perehdyttävä kuivauspatruunoiden kuntoon eli kykyyn kuivata tarvittava materiaali. Kuivauspatruunan eli molekyylihidin testaamiseen käytettiin kastepistemittaria. Kastepistemittarilla voidaan todentaa sekä suhteellinen kosteus ilmasta että selvittää kastepiste.

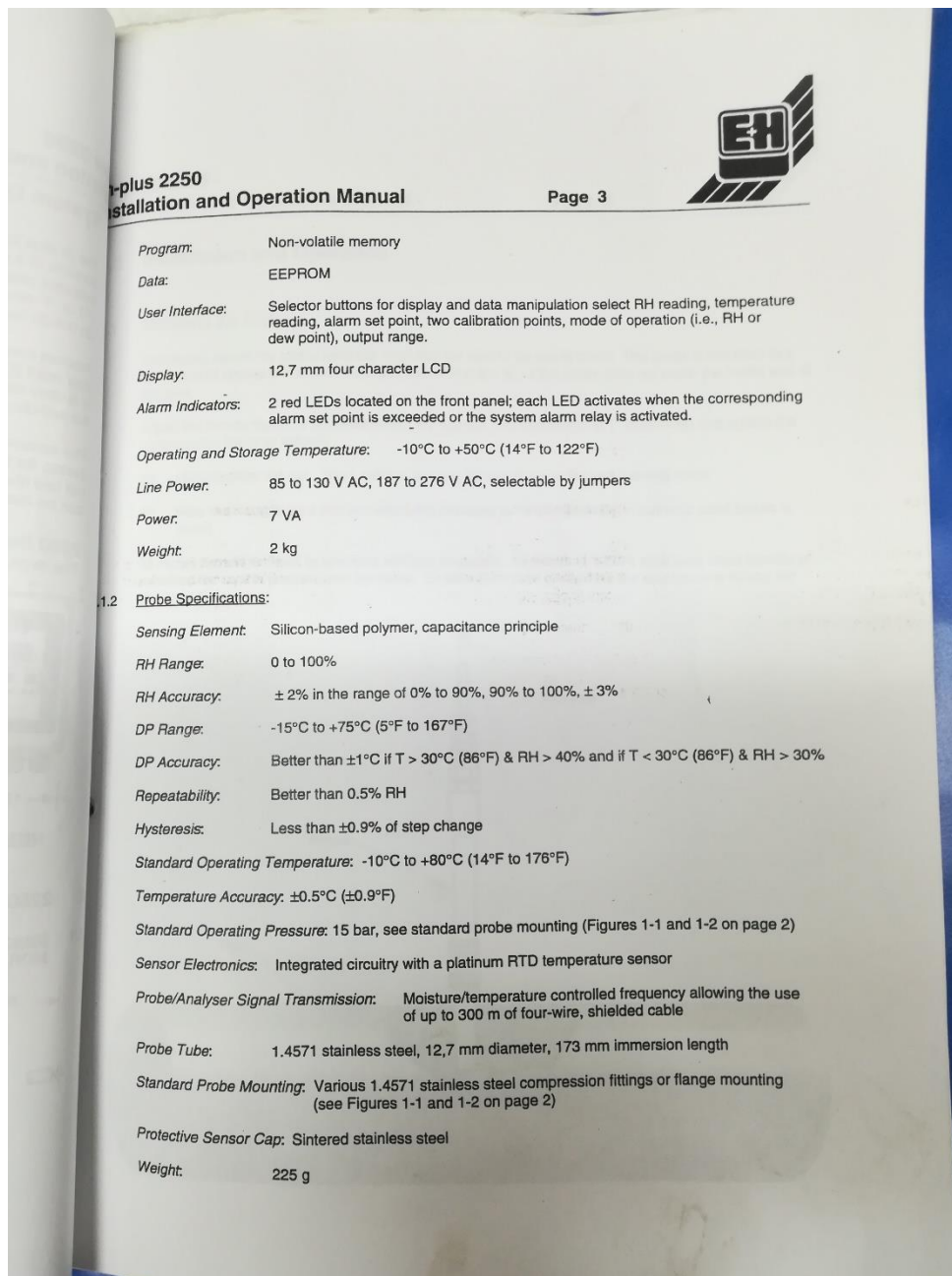
Laitteistona oli Endress + Hauserin rh- plus 2250, joka lainattiin Thermo Fischer Scientificiltä Joensuun yksiköstä. Mittarin mittapäässä on silikonipohjainen polymeerikalvo, jonka kapasitanssin muutokseen mittaus perustuu huomioiden vallitsevan lämpötilan. Laitteisto mittaa ja määrittää mittapään kosteuden ja ilmoittaa suhteellisen kosteuden ilmasta huomioiden mittauskohteen lämpötilan.



Kuva 5. Endress + Hauser rh-plus 2250-kastepistemittari.

### 3.2.1 Molekyylisihdin testauksen tulokset

Kuvassa 6 on sivu ohjekirjasta, jossa ovat kastepistemittarin tekniset tiedot. Mittaus suoritettiin hallissa, jossa vallitsi koehetkellä 20,4°C lämpötila. Mittari on kykenevä mittaamaan suhteellisen kosteuden (relative humidity range eli RH Range) nollan ja sadan prosentin välissä ja sen tarkkuus oli kokeessa kosteuden ollessa alta 90% ± 2%. Neljän tunnin kuivausikkunan aikana suhteelliseksi kosteudeksi saavutettiin 0%, kun se oli testin alussa 8,2%.



Kuva 6. Kastepistemittarin tekniset tiedot käyttöohjekirjasta.



Kastepiste (dew point range eli DP Range) voidaan selvittää paremmin kuin  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  tarkkuudella lämpötilan ollessa yli  $30^{\circ}\text{C}$  ja suhteellisen kosteuden ollessa yli 40% sekä lämpötilan ollessa alle  $30^{\circ}\text{C}$  ja suhteellisen kosteuden ollessa alle 30%. Laitte on optimoitu mittaamaan kastepiste  $-15^{\circ}\text{C}$  ja  $+75^{\circ}\text{C}$  välissä.

Koetilanteessa kastepistemittarilla saavutettiin paluuilmaasta nollan prosentin suhteellinen kosteus lämpötilan noustessa aina  $68,3^{\circ}\text{C}$ :seen, joten mittaustuloksen ei voida olettaa olevan lähellä  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  tarkkuutta. Mittari näytti testissä laitteen maksimiarvon kastepisteelle, joka tälle kyseiselle Endress + Hauser rh- plus 2250 kastepistemittarille on  $-37^{\circ}\text{C}$ . Kyseisen arvon voidaan olettaa vielä ylittyvän, sillä se saavutettiin hyvin aikaisessa vaiheessa koetilannetta.

### **3.2.2 Vastusten toiminnan toteaminen**

Kokeen alussa paluuilman lämpötila oli  $20,2^{\circ}\text{C}$  ja kokeen lopussa neljän tunnin kohdalla  $68,3^{\circ}\text{C}$ . Sisään menevän ilman lämpötila oli säädetty vakioiksi  $100^{\circ}\text{C}$ . Tämän lämpötilan todettiin pitävän paikkansa, sillä sekä kahden tunnin että neljän tunnin kohdalla mitattaessa se oli hyvin lähellä asetusarvoa. Kahden tunnin kohdalla  $100,2^{\circ}\text{C}$  ja neljän tunnin kohdalla  $100,5^{\circ}\text{C}$ .

Näistä tuloksista voitiin todeta kuivurin vastusten olevan kunnossa. Vastukset pystyivät lämmittämään tuloilman säädettyyn lämpöön. Materiaalinkuivaussuppilo oli testitilanteessa täynnä kuivattavaa materiaalia. Kosteaa ja kylmää materiaalia jäähdytti paluuilman lämpötilaa osan lämmöstä siirtyessä materiaaliin. Paluuilman lämpötila nousi kuitenkin huomattavasti kokeen edetessä.

### 3.2.3 Päätös kuivurin hyväksynnästä tai hylkäämisestä soveltuvaksi kuivauslaitteeksi

Saatujen tulosten perusteella täytyi tehdä päätös siitä, onko kyseinen kuivuri soveltuva testimateriaalin kuivaukseen ja saadaanko sillä aikaiseksi luotettavia kuivaustuloksia. Vaihtoehtona oli joko hyväksyä kuivuri sellaisenaan, uusia kuivauspatruunat, vaihtaa kuivauspatruunoiden materiaali tai käyttää täysin toista kuivuria.

Kuivurin ohjekirjasta ei löytynyt tehtaalta ilmoituttua arvoa kastepisteelle, joten testauksessa saatua tulosta verrattiin uusien kuivailmakuivureiden teknisistä tiedoista löytyviin kastepistetuloksiin. Uusien kuivureiden kastepistetuloksissa oli hyvinkin huomattavia eroja mutta ne liikkuvat  $-20^{\circ}\text{C}$  ja  $-60^{\circ}\text{C}$  välillä, joten molekyylisihdin voitiin turvallisesti olettaa olevan hyvässä kunnossa testeissä saavutetun  $-37^{\circ}\text{C}$  tuloksella. Kuivurin vastusten osoitettiin testauksessa olevan kykeneviä lämmittämään tarvittava ilma tehokkaasti. Näiden tulosten perusteella kuivurin voitiin sanoa kelpaavan hyvin tähän opinnäytetyöhön ja materiaalin luotettavaan kuivaukseen.



Kuva 7. Opinnäytetyössä materiaalin kuivaukseen käytetty saksalainen GERGO-Appatatebau GmbH & Co, KG Type GTT-201-kuivuri.

### 3.3 Näytepullot ja niiden kuivaus

Ensimmäiseksi täytyi hankkia näytepulloja, joihin kuivatut materiaali näytteet voitaisiin säilöä siksi aikaa, kunnes niiden kosteus päästäisiin mittaamaan. Tärkein näytepullojen ominaisuus oli kyky säilyttää näytteet koskemattomina sekä eristää ne ympäröivästä ilmasta. Näytteet täytyi eristää ilmasta, sillä puumuovikomposiitin epäedullisiin ominaisuuksiin sisältyy materiaalin kyky sitoa ilmassa olevaa kosteutta itseensä. Toinen tärkeä ominaisuus oli, ettei näytepullo saanut olla huokoinen jolloin osa näytteen kosteudesta olisi voinut siirtyä pullon materiaaliin ennen mittausta. Pulloon ei saanut jäädä myöskään yhtään jäännöskosteutta ennen materiaalin sulkemista sen sisään.

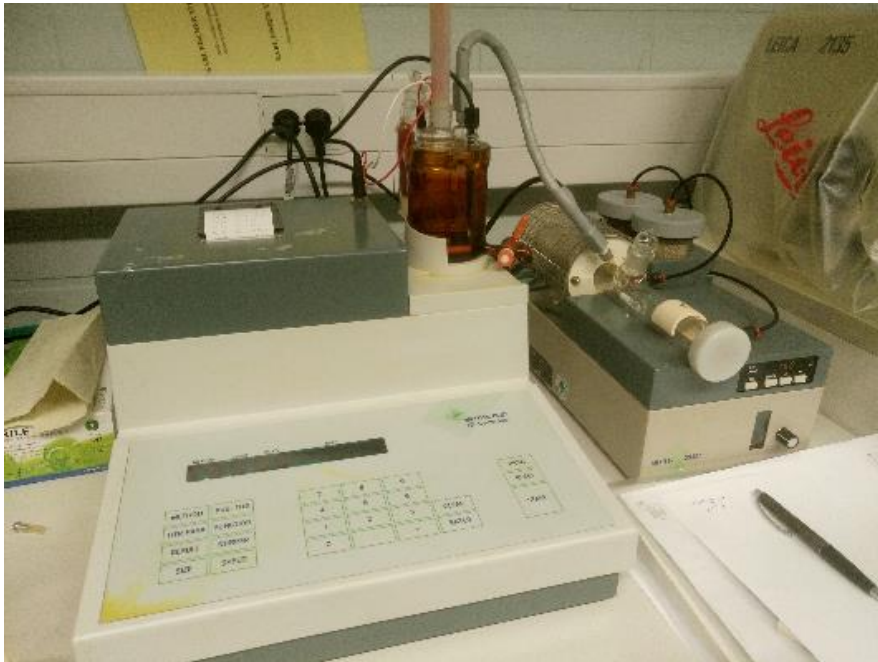
Näytepulloiksi valikoituivat edellä mainittujen tarvittavien ominaisuuksien jälkeen Pyrexin 50 millilitran lasipullot bakeliittikorkilla. Pulloja pidettiin 12 tuntia 100 asteisessa uunissa kosteuden poistamiseksi ennen näytteiden kuivaamista ja pulloihin siirtämistä.



Kuva 8. Näytepullojen kosteuden poisto 12 tunnin kuivaussyklillä Heraeus-merkisessä kuivausuunissa.

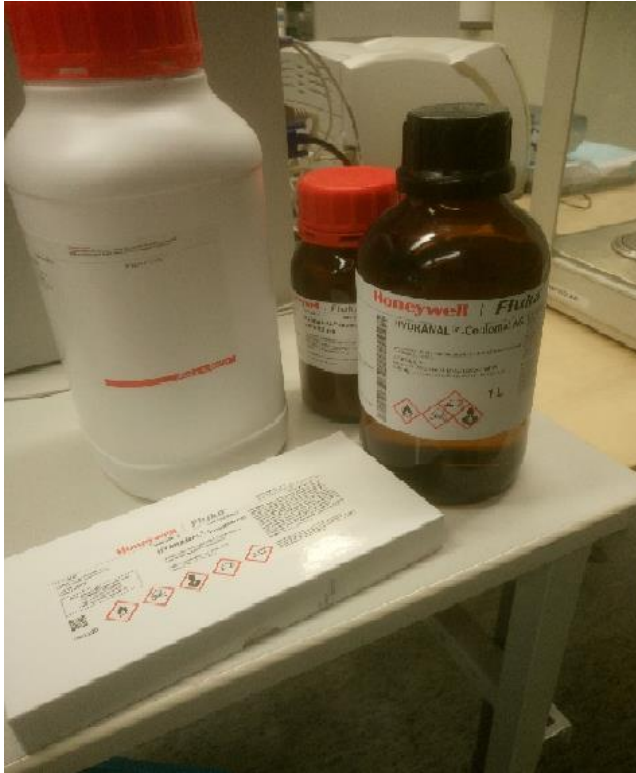
### 3.4 Titraattori

Näytteiden kosteuden mittaamista varten tarvittiin titraattori ja kuivausuuni. Titraattoriksi valikoitui METTLER TOLEDO DL37 FK Coulometer ja kuivausuuniksi METTLER TOLEDO DO337, jotka ovat molemmat japanilaisvalmisteisia laitteita.



Kuva 9. Titraattori ja kuivausuuni.

Molemmat laitteet järjestyivät Karelia-ammattikorkeakoululta. Titraattoriin tarvittiin uudet reagenttiaineet ja kuivauskristallit, sillä edellisistä käytetyistä aineista ja niiden parasta ennen käyttöpäivistä ei ollut raportoitua tietoa. Uusilla reagenttiaineilla varmistettiin niin laitteen oikea toiminta kuin luotettavat ja tasalaatuiset mitaustulokset. Tarvittavat kemikaalit ostettiin Karelia-amk:n toimesta. Kuivausuuni tarvitsi toimiakseen reagoimattoman kaasun ja tähän tarkoitukseen käytettiin typpeä. Kuivausuunin tarvitsema kaasu järjestyi sekkin Karelia-amk:n toimesta.



Kuva 10. Titraattorin uudet reagointiaineet ja kuivauskristallit.

### 3.5 Materiaalin kuivaus

Materiaalin kuivaus järjestettiin ja jaettiin sovitusti neljälle päivällä. Jokaisena päivänä kuivuri täytettiin ensin täyteen koskemattomasta kuivaamattomasta materiaalista. Kaikkien päivien kuivattavat materiaali-erät olivat samasta valmistuserästä ja jokaisena päivänä ensimmäisenä otettiin vertailunäyte kuivaamattomasta materiaalista. Kuivauspäivän päätteeksi kuivuri tyhjennettiin täysin kuivatusta materiaalista ja käytettiin tehtaan muissa ajoissa, jolloin kerran kuivattu materiaali ei missään tapauksessa pääse sekoittumaan kuivaamattoman materiaalin kanssa ja vääristämään tuloksia.

Kuivurin materiaalisuppilo imuroitiin ensimmäisen aamun alussa ja jokaisen kuivauspäivän lopussa. Näin varmistettiin, ettei kuivuriin ole jäänyt lainkaan edellisenä päivänä kuivattua materiaalia, joka saattaisi vaikuttaa saatuihin tuloksiin. Kuivurin kuivaussuppiloon mahtui noin 50 kg materiaalia ja ennen jokaista näytettä suppilosta laskettiin pohjaluukun kautta noin kilon verran materiaalia ulos

ennen näytteen ottamista. Alussa pois laskettu kilo käytettiin tehtaan muissa ajoissa. 50 gramman näytteen lisäksi jokaisessa kuivausikkunassa laskettiin noin 200 grammaa materiaalia. Kuivuria ei avattu tai täytetty päivän aikana, koska se olisi voinut vaikuttaa lopputulokseen väärin tavalla. Kunkin päivän lopuksi kuivurista tyhjennettiin noin 45 kiloa kuivattua materiaalia.

### **3.6 Ruiskuvalu**

Kuivauksen yhteydessä jokaisessa kuivausikkunassa lasketusta 200 grammasta kuivattua materiaalia ajettiin ruiskuvalukoneella koesauvoja iskulujuuskokeeseen. Ruiskuvalussa käytetty muotti oli 2-pesäinen koesauvamuotti, joka on erikseen valmistettu Plasthill Oy:n sekä Kareline® natural compositesin käyttöön yrityksen omia materiaalitestauksia varten. Ennen jokaista koesauva erää, ruiskuvalukoneen ruuvin läpi ajettiin puhdasta polypropeenia, jolla varmistettiin ruuvin puhtaus. Tällöin voitiin olla varmoja, etteivät eri kuivausikkunoista saadut kuivatut materiaali-erät päässeet sekoittumaan keskenään ja vaikuttamaan tuloksiin.

Koesauvoja ajettiin 15 iskua, jolloin koesauvoja saatiin 30 kpl. Näistä 30 kpl iskulujuus kokeisiin valittiin 10 kpl. Nämä kymmenen kappaletta otettiin aina iskuista numero 6,7,8,9 ja 10. Valinnat tehtiin iskusarjan keskelle koska haluttiin varmistaa vielä toistamiseen, etteivät eri kuivausparametreilla kuivatut materiaalit päässeet sekoittumaan. Ruiskuvalun yhteydessä koneesta otettiin ylös ruiskutusaika ja vaihtopaine, jotta voitiin verrata eri kuivausikkunoista tulleiden materiaalien vaikutusta ruiskuvaluun.



Kuva 11. Ruiskuvalussa käytetty Engel es330/70 hl-ruiskuvalukone.

### 3.7 Muu tarvittava laitteisto

Ennen materiaalin testausta ja suoritettavia kokeita täytyi selvittää, missä iskulujuuskokeet voidaan suorittaa ja millä laitteella ne voidaan tehdä. Titraattoria varten tarvittiin mahdollisimman lähelle gramman painoisia näytteitä, joten oli myös selvitettävä, mistä saataisiin käyttöön tai voitaisiin tarvittaessa ostaa tarpeeksi tarkka vaaka.

#### 3.7.1 Iskulujuustestauksen testilaitte

Iskulujuuskokeita varten tarvittiin siihen soveltuva mittalaitteisto. Karelia-amk:lla oli laboratoriossaan tarvittava laite luotettavaa iskulujuuskoestamista varten. Kyseessä on heilahdusvasarakone, jossa materiaalin lujuus testataan lyömällä materiaalista valmistettu koekappale kahteen osaan. Laitteen vapaasti omalla painollaan heilahtava iskuvasara katkaisee koekappaleen ja iskunkestävyys todetaan

koesauvan kykyä absorboida iskuvasaran energiaa. Mitä enemmän koesauva hidastaa iskuvasaran vauhtia, sitä suurempi materiaalin iskulujuus on. Iskulujuuskokeessa käytetty laite ilmoitti iskun jälkeen digitaalinäytölle mittatuloksen. Ilmoitettu tulos on kilojoulea neliömetriä kohden ( $\text{kJ/m}^2$ ). Iskulujuuslaite kalibroitiin ennen materiaalin testaamista valmistajan ilmoittamalla tavalla. Iskulujuuskokeet suoritettiin loveamattomiin koesauvoihin.



Kuva 12. Iskulujuuskokeessa käytetty RAY-RAN merkinen iskulujuustestauslaite.

### 3.7.2 Vaaka

Karelia-amk:n tiloista löytyi tiedustelun jälkeen Sartorius merkinen vaaka. Kyseinen vaaka on kykenevä mittaamaan painoa grammoissa neljän desimaalin tarkkuudella. Tämän voidaan turvallisesti olettaa olevan tarpeeksi tarkka gramman materiaalinäytteiden mittaamiseen kuivausuunille.





Kuva 13. Sartorius merkinen vaaka

## 4 Tulokset

### 4.1 Materiaalin kuivauksen vaikutus ruiskuvaluparametreihin

Kuivatun materiaalin vaikutusta ruiskuvaluun haluttiin tutkia muutoksina ruiskutusaikaan sekä vaihtopaineeseen. Halutut lukuarvot saatiin koesauvoja ruiskuvaltaessa koneen ilmoittamista tiedoista.

Taulukko 1. Ruiskutusaika sekunteina ja vaihtopaine baareina eri kuivausikkunoista otetuilla materiaaleilla ruiskuvaltaessa.

Kuivausaika 80°C (h)	Ruiskutusaika (s)	Vaihtopaine (bar)
2	0,59	52,6
4	0,58	53,0
6	0,58	53,5
8	0,59	59,0
Kuivausaika 90°C (h)	Ruiskutusaika (s)	Vaihtopaine (bar)
2	0,58	55,6
4	0,59	54,5
6	0,59	56,3
8	0,59	56,3
Kuivausaika 100°C (h)	Ruiskutusaika (s)	Vaihtopaine (bar)
2	0,60	54,7
4	0,60	56,5
6	0,60	56,2
8	0,60	55,7
Kuivausaika 110°C (h)	Ruiskutusaika (s)	Vaihtopaine (bar)
2	0,59	63,7
4	0,59	64,0
6	0,59	63,1
8	0,59	63,8

#### 4.1.1 Ruiskutuajan muutokset

Kuten taulukosta 1 selkeästi nähdään, ruiskutusaikaan materiaalin eri kuivausparametreillä oli hyvin pieni vaikutus. Tämä johtuu myös siitä, että tässä koneessa on takaisinkytketty ruiskutusyksikkö, jolloin ruiskutusnopeuden lasku nostaa hydraulikkapainetta ja päinvastoin eli kone siis pyrkii pitämään ruiskutusnopeuden vakiona. Ruiskutusajan muutokset olivat niin mitättömän pieniä, että ne sopivat jo iskujen normaalin ruiskutusaika hajonnan sisään. Voidaan todeta, että näin pienellä koe-erällä ja pienellä otannalla ei materiaalin kuivuudella ollut merkitystä ruiskutusaikaan koesauvoja ruiskuvaltaessa. Voidaan todeta, että tässä ei haiontaa odotettukaan olevan.

#### 4.1.2 Vaihtopaineen muutokset

”Engelin ilmoittama vaihtopaine on hydrauliiikkapaine ja sen muutoskerroin sulapaineeksi 30 mm halkaisijaltaan olevalle ruuville on 18,75.” (puhelin konsultointi Plashill Oy:n tuotantopäällikön Mika Tanskasen kanssa 14.5.2018) Sulapaine tarkoittaa sulaneen, ruiskutettavan materiaalin painetta. Vaihtopaineessa havaittiin merkittäviä eroja eri kuivausparametreilla kuivattujen materiaalierien välillä. Erot ovat suuria jo hydrauliikkapaineina mutta sulapaineeksi muutettuina niiden todellinen ero on selkeästi havaittava.

Ensimmäisissä kahdessa kuivauslämpötilassa yleinen suuntaus näytti olevan, että vaihtopaine kasvaa materiaalin ollessa kuivempaa (liite 2). Yleisellä suuntauksella tarkoitetaan tässä tapauksessa sitä, että vaikka vaihtopaine ei kasva kaikissa tapauksissa lineaarisesti, on sen suuntaus kasvava kahden ensimmäisen kuivauslämpötilan eri kuivausaikojen tuloksia katsottaessa.

100°C:n ja 110°C:n kuivauksissa vaihtopaineen muutokset eivät noudattaneet lineaarisesti kasvua tai pienentymää ja saavuttivat korkeimman vaihtopaine arvonsa 4 tunnin kuivauksen kohdalla ajetusta materiaalista. Vaihtopaine pysyy niin 100°C:n kuin 110°C:n eri kuivausikkunoissa melko samana verrattuna saman lämpötilan muihin saatuihin arvoihin.

Suurimmat poikkeukset havaittiin 110°C:n vaihtopaineissa. Tällöin vaihtopaineiden arvot olivat noin 10 baaria suuremmat verrattaessa muihin matalammilla lämpötiloilla kuivatusta materiaalista ajettujen koesauvojen ruiskuvalussa saatuihin paineisiin. Muutoksen syytä on vaikeaa selittää yhdellä lyhyellä ja kaiken kattavalla vastauksella. ”Yleisesti vaihtopaine kasvaa materiaalin kosteuden pienentyessä ja osa muovimateriaaleista on mahdollista yli kuivata jolloin materiaalista ajettavat tuotteet ovat laadultaan huonoja, tästä esimerkkinä polyamidi. On mahdollista, että puumuovikomposiitissa oleva kuitu on kärsinyt jollain tavoin korkeasta lämpötilasta ja vaikuttaa kosteuden poistumiseen materiaalista.” (puhelin konsultointi Plashill Oy:n tuotantopäällikön Mika Tanskasen kanssa 14.5.2018)

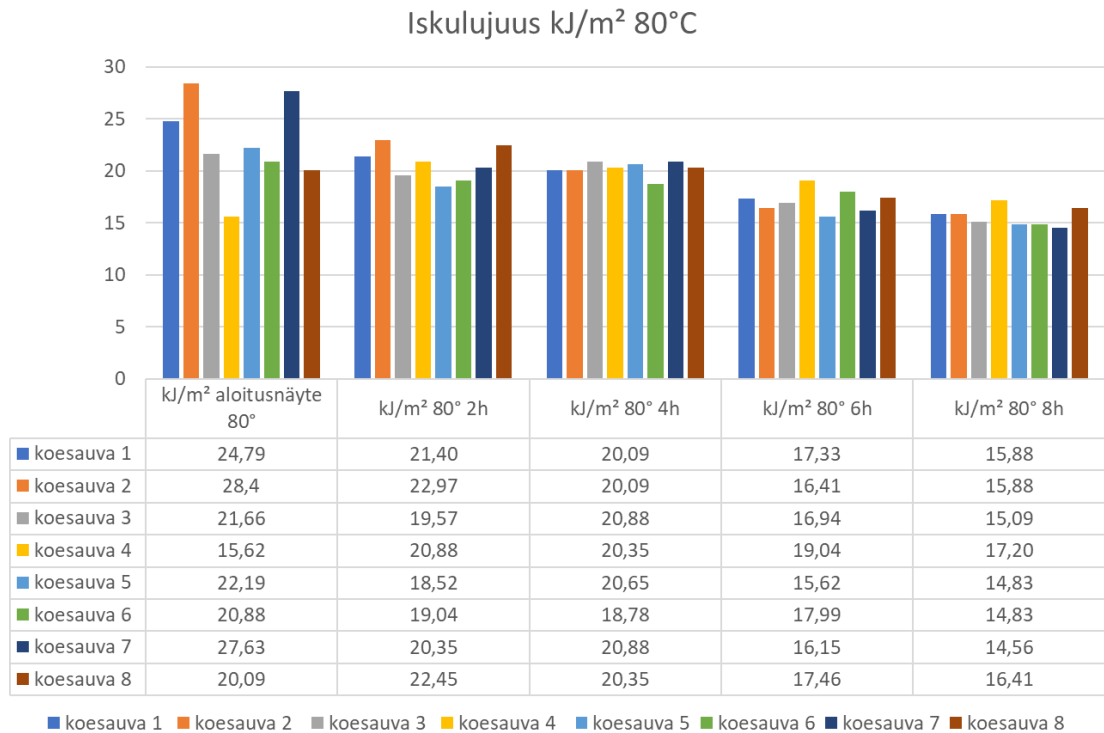
## 4.2 Iskulujuuskoe

Iskulujuuskokeessa kymmenelle koesauvalle suoritettiin loveamaton Charpy-iskulujuuskoe. Saaduista tuloksista poistettiin suurin ja pienin arvo. Näin pyrittiin poistamaan yksittäisten mahdollisten kappaleissa olevien valmistusvirheiden tai -erojen aikaan saama vääristymä tuloksissa ja saamaan luotettava keskiarvo poistamatta suppeasta koesarjasta liikaa dataa. Iskulujuuskokeiden tulokset on esitelty kunkin kuivauspäivän ja täten kuinkin kuivauslämpötilan mukaan eritellysti. Kaikki iskulujuuskokeen tulokset löytyvät liitteestä 1.

### 4.2.1 Iskulujuuskokeen tulokset 80°C kuivauksella

Kuviossa 2 esitetään saadut iskulujuuskokeen tulokset graafisessa muodossa sekä numeraalisina arvoina. Aloituspäytteen iskulujuustestin keskiarvo oli yhden desimaalin tarkkuudella 22,7 kJ/m<sup>2</sup> ja keskihajonta 3,91. Kahden tunnin kuivausikkunan kohdalla keskiarvo oli 20,6 kJ/m<sup>2</sup> keskihajonnan ollessa 1,48. Neljän tunnin kuivauksen kohdalla iskulujuuskokeen keskiarvo oli 20,3 kJ/m<sup>2</sup> ja keskihajonta 0,63. Kuuden tunnin kuivauksen jälkeen iskulujuuden keskiarvoksi saatiin 17,1 kJ/m<sup>2</sup> ja keskihajonnaksi 1,02. Kahdeksan tunnin aikaikkunassa tulokset olivat 15,6 kJ/m<sup>2</sup> ja keskihajontana 0,86. Keskihajonnan laskukaava on nähtävissä liitteessä 3.

80°C kuivauksessa iskulujuus pieneni kuivemmasta materiaalista ajetuissa koesauvoissa verrattuna kosteammasta materiaalista ajettujen koesauvojen iskulujuuskokeen tuloksiin. Samalla kuivemmasta materiaalista ajettujen tuotteiden keskihajonta pieneni aloitusnäytteeseen nähtynä merkittävästi.



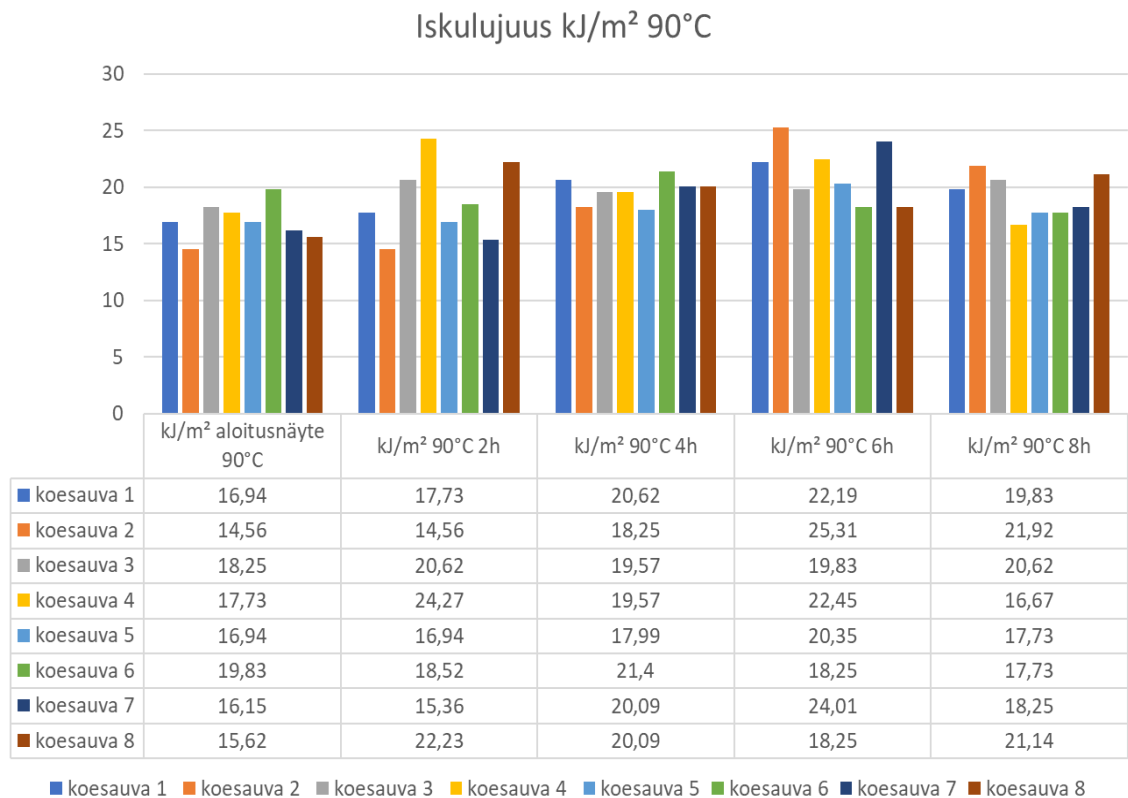
Kuvio 2. Iskulujuustestin tulokset  $80^\circ\text{C}$  kuivauslämpötilassa eri aikaikkunoissa.

#### 4.2.2 Iskulujuuskokeen tulokset $90^\circ\text{C}$ kuivauksella

Kuviossa 3 esitetään graafisessa muodossa sekä numeraalisilla arvoilla  $90^\circ\text{C}$  lämpötilassa toisena kuivauspäivänä kuivatusta materiaalista ajettujen koesauvojen iskulujuustestin tulokset. Aloitusnäytteen iskulujuustestin keskiarvo oli  $17,0 \text{ kJ/m}^2$  ja keskihajonta  $1,53$ . Kahden tunnin kuivauksen kohdalla keskiarvoksi saatiin  $18,8 \text{ kJ/m}^2$  keskihajonnan ollessa  $3,15$ . Neljän tunnin kuivauksella ruiskuvalettujen koesauvojen iskulujuuskokeen keskiarvo oli  $19,7 \text{ kJ/m}^2$  ja keskihajonta  $1,06$ . Seuraavassa kuivausikkunassa eli kuuden tunnin materiaalin kuivauksella ruiskuvalettujen koesauvojen iskulujuuden keskiarvoksi saatiin  $21,33 \text{ kJ/m}^2$  keskihajonnan ollessa  $2,63$ . Kahdeksan tunnin kuivauksella koesauvojen iskulujuustestin keskiarvoksi tuli  $19,2 \text{ kJ/m}^2$  ja keskihajonnaksi  $1,77$ .

Toisen kuivauspäivän materiaaleista tehdyissä koesauvoissa iskulujuus kasvoi materiaalin ollessa kuivempaa, lukuun ottamatta viimeistä kahdeksan tunnin kuivausta, jossa iskulujuuden keskiarvo tippui verrattuna aiempaan kuuden tunnin

kuivaukseen. Vaikka viimeisessä kuivausikkunassa saatu keskiarvo oli heikompi eikä noudattanut lineaarista kasvua nähtynä aiempiin 2,4 ja 6 tunnin tuloksiin, saavutettiin iskulujuudeksi huomattavasti aloitusnäytettä parempi testitulos. Keskihajonnasta on vaikeaa löytää minkäänlaista suuntalinjaa toisen kuivauspäivän tuloksissa.



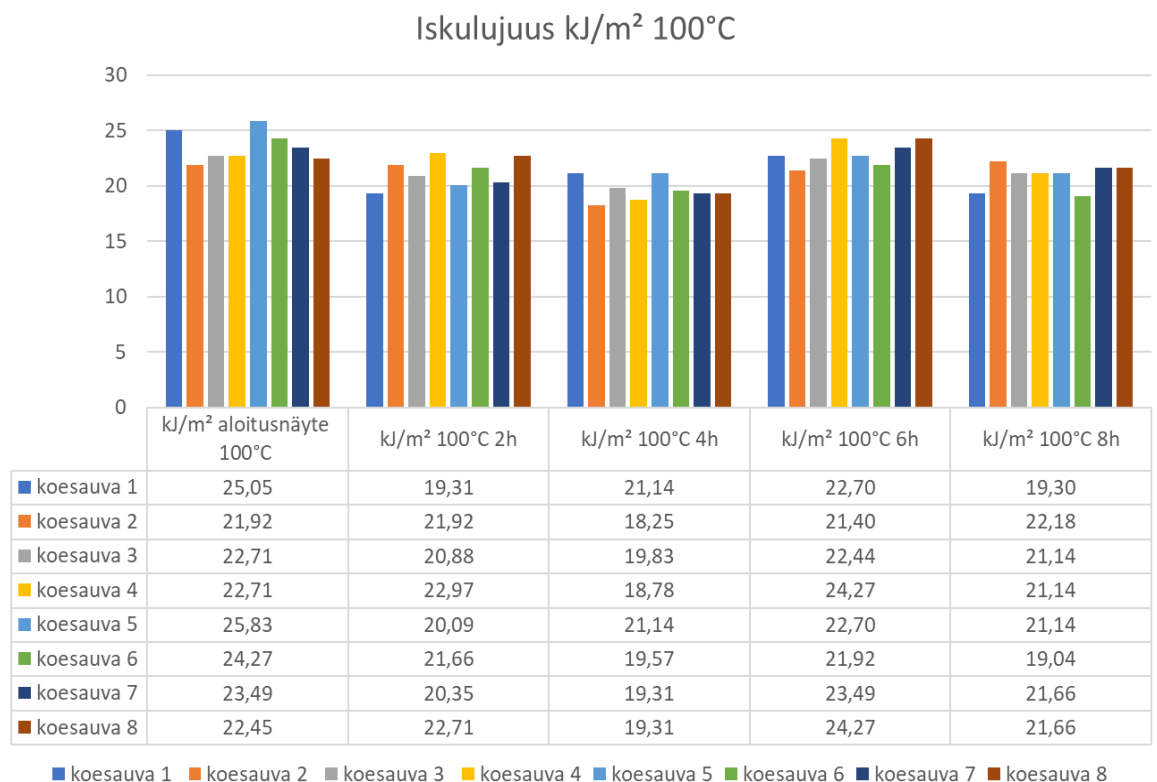
Kuvio 3. Iskulujuustestin tulokset 90°C kuivauslämpötilassa eri aikaikkunoissa

#### 4.2.3 Iskulujuuskokeen tulokset 100°C kuivauksella

Kuviossa 4 nähdään numeraalinen sekä graafinen testien lopputulos kolmannen kuivauspäivän eli 100°C lämpötilassa kuivatun materiaalin iskulujuuskokeesta. Aloitusnäytteen iskulujuuskokeen keskiarvoksi saatiin 23,6 kJ/m<sup>2</sup> ja keskihajonnaksi 1,29. Kaksi tuntia kuivatusta materiaalista ajettujen koesauvojen iskulujuustestin keskiarvo oli 21,2 kJ/m<sup>2</sup> keskihajonnan ollessa 1,21. Neljän tunnin kuivauksella iskulujuustestin keskiarvoksi muodostui 19,7 kJ/m<sup>2</sup> ja keskihajonnaksi 0,96. Kuuden tunnin kuivauksella iskulujuuden keskiarvo oli 22,9 kJ/m<sup>2</sup> ja keskihajonta

0,97. Kahdeksan tuntia kuivatusta materiaalista iskulujuuskokeen keskiarvoksi saatiin 20,9 kJ/m<sup>2</sup> keskihajonnan ollessa 1,06.

Kolmannen kuivauspäivän eli 100°C lämpötilassa kuivatun materiaalin iskulujuustestien tulokset ovat verrattain melko tasaiset, eikä kuivausajalla näyttäisi olevan juurikaan merkitystä iskulujuuteen keskiarvillisesti. Myöskään hajonnassa ei tapahdu suuria muutoksia kuivausajan muuttuessa vaan se pysyy tasaisena kaikkien testattujen sarjojen välillä.



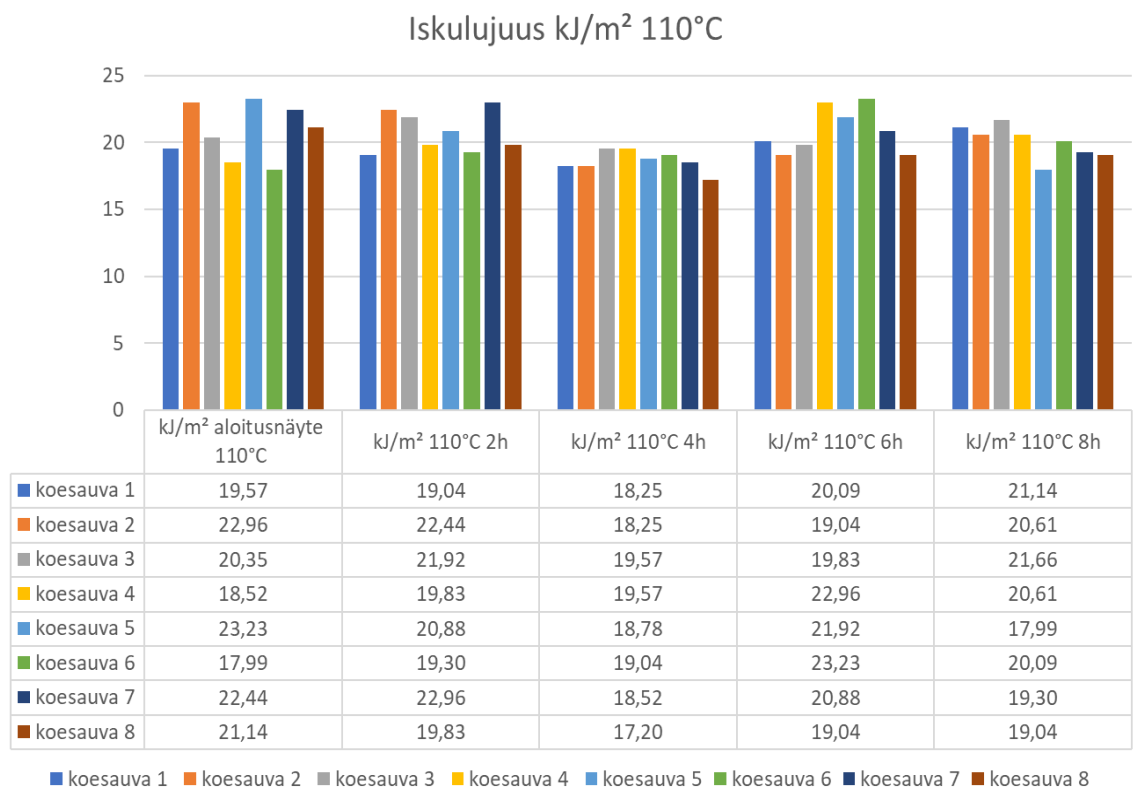
Kuvio 4. Iskulujuustestin tulokset 100°C kuivauslämpötilassa eri aikaikkunoissa.

#### 4.2.4 Iskulujuuskokeen tulokset 110°C kuivauksella

Kuviossa 5 nähdään tulokset 110°C lämpötilassa kuivatusta materiaalista valmistetuista koesauvoista. Aloitusnäytteen iskulujuuskokeen keskiarvoksi saatiin 20,8kJ/m<sup>2</sup> keskihajonnan ollessa 1,88. Kahden tunnin kuivauksen jälkeen materiaalista tehtyjen koesauvojen iskulujuuden keskiarvo oli 20,8 kJ/m<sup>2</sup> ja

keskihajonta 1,41. Neljän tunnin aikaikkunassa iskulujuuskokeen keskiarvoksi saatiin 18,6 kJ/m<sup>2</sup> ja keskihajonnaksi 0,73. Kuuden tunnin kuivauksella iskulujuuskokeen keskiarvoksi tuli 20,9 kJ/m<sup>2</sup> ja keskihajonnaksi 1,56. Kahdeksan tunnin kohdalla keskiarvoksi iskulujuudelle saatiin 20,1 kJ/m<sup>2</sup> ja keskihajonnaksi 1,13.

Viimeisen kuivauspäivän eli 110°C kuivauslämpötilassa kuivatusta materiaalista valmistettujen koesauvojen iskulujuustestin tulokset ovat kaikissa aikaikkunoissa hyvin tasaiset. Havaittiin ettei kuivauksella ollut tässäkään lämpötilassa juuri merkitystä iskulujuuskokeen tuloksiin. Ainoa havaittava muutos testituloksissa saatiin neljän tunnin kuivausikkunan kohdalla, jolloin materiaalista valmistetut koesauvat olivat heikoimpia. Keskihajonnassa ei ole myöskään nähtävissä suuria muutoksia. Aloituspäytteen keskihajonta oli suurinta kuten lähes kaikissa muissakin lämpötilassa kuivatuissa materiaaleissa.



Kuvio 5. Iskulujuustestin tulokset 110°C kuivauslämpötilassa eri aikaikkunoissa.



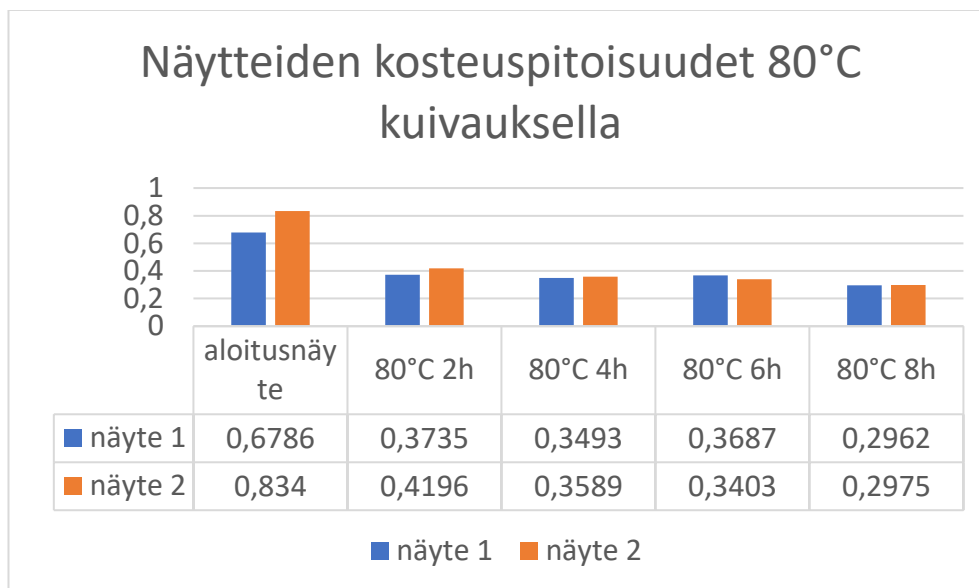
### 4.3 Materiaalin kosteusmittaukset

Oletuksena ennen kosteusmittauksia oli näytteiden kosteuspitoisuuden lineaarinen pientyminen kuivausajan pidentyessä. Jokaisesta kuivatusta materiaalin erästä otettiin kaksi näytettä, joiden kosteuspitoisuus mitattiin titraattorilla. Näytteiden painon piti ylittää gramma mutta samalla olla mahdollisimman lähellä sitä. Näytteet otettiin mahdollisimman lähelle gramman painoa kokonaisilla granulaa-teilla. (liite 2) Kahdella näytteellä pyrittiin todentamaan materiaalin kosteus tarkemmin. Vertaamalla näytteiden eroavaisuuksia kosteudessa pystytään tekemään johtopäätöksiä materiaalin tasalaatuisuudesta sekä saadaan keskiarvo kosteudesta, jota voidaan verrata muiden koe-erien kosteuden keskiarvoon. Kaikkien näytteiden painot sekä kosteuspitoisuuden löytyvät liitteestä 2. Kaikkien saatujen keskiarvojen tulokset on pyöristetty 4 desimaalin tarkkuuteen.

#### 4.3.1 Materiaalin kosteuspitoisuudet 80°C kuivauksella

Kuviossa 6 nähdään titrauksella saadut kosteuspitoisuudet 80°C lämpötilassa kuivatuista materiaalieristä sekä graafisessa että numeraalisessa muodossa. Aloituspäätteen kahden näytteen keskiarvoiseksi kosteuspitoisuudeksi saatiin 0,7563%. Kahden tunnin kuivauksen jälkeen kosteuden keskiarvo oli pienentynyt arvoon 0,3966%. Neljän tunnin kuivauksella näytteiden kosteuspitoisuuden keskiarvoksi saatiin 0,3541%. Kuuden tunnin keskiarvo oli 0,3545%. Kahdeksan tunnin kohdalla näytteistä mitattu kosteuden keskiarvo oli 0,2969%.

Kosteuden poistuminen materiaalista 80°C kuivauksella oli lukuun ottamatta kuuden tunnin näytettä lineaarista ja odotuksien mukaista. Kuuden tunnin näytteen kosteuspitoisuuden ero oli kuitenkin neljän tunnin näytteeseen verrattuna lähes olematon, joten testaustulos on odotetun mukainen.



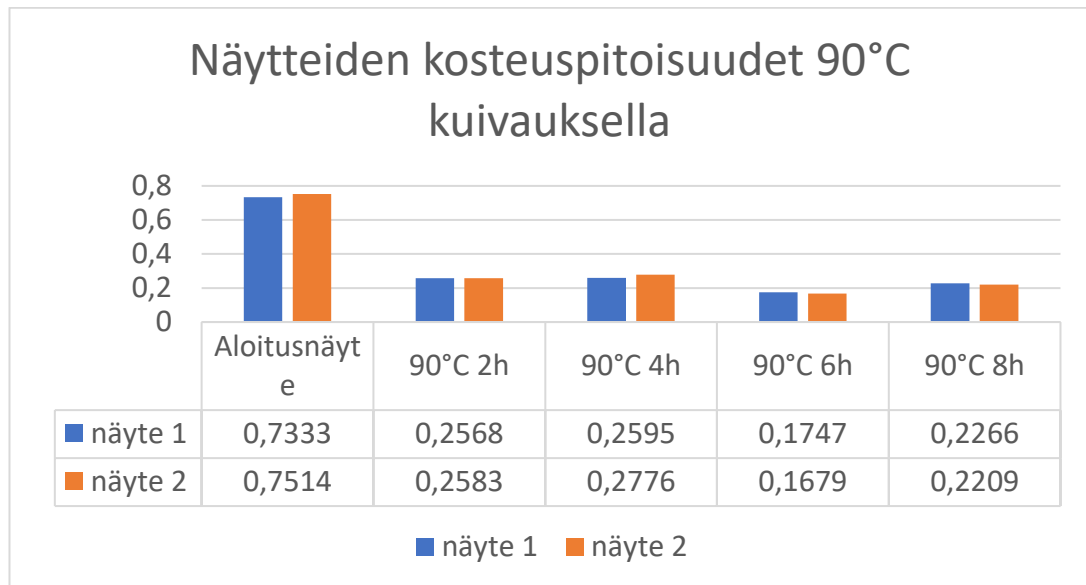
Kuvio 6. 80°C lämpötilassa kuivattujen materiaalien kosteuspitoisuuksia eri aikaikkunoissa.

#### 4.3.2 Materiaalin kosteuspitoisuudet 90°C kuivauksella

Kuviossa 7 esitetään graafisessa ja numeraalisessa muodossa 90°C lämpötilassa kuivattujen materiaalinäytteiden mitattuja kosteuspitoisuuksia. Aloitusnäytteen kahden testattavan näytteen keskiarvoiseksi kosteuspitoisuudeksi saatiin 0,7424%. Kahden tunnin kuivauksen jälkeen kosteuden keskiarvoksi mitattiin 0,2576%. Neljän tunnin kuivauksella keskiarvoksi tuli 0,2686%. Kuuden tunnin kuivauksella materiaalista otettujen näytteiden kosteuspitoisuuden keskiarvo oli 0,1713%. Kahdeksan tuntia kuivatuista näytteistä kosteuspitoisuuden keskiarvoksi saatiin 0,2238%.

Kuivattaessa materiaalia 90°C:n lämpötilalla kosteuden poistuminen ei noudattanut lineaarista vähentymää. Kaikkien kuivattujen näytteiden kosteuspitoisuus oli selkeästi pienempi kuin kuivaamattoman aloitusnäytteen kosteuspitoisuus. Kuivausjakson pituudesta riippumatta kosteuspitoisuudet olivat muiden kuivauspäivien tuloksiin verrattaessa matalia eli kosteus poistui materiaalista hyvin jo

kahden tunnin kuivauksen jälkeen ja pysyi melko samana läpi loppukuivauksen. Matalin kosteuspitoisuus näytteissä saavuttiin 6 tunnin kuivauksella.

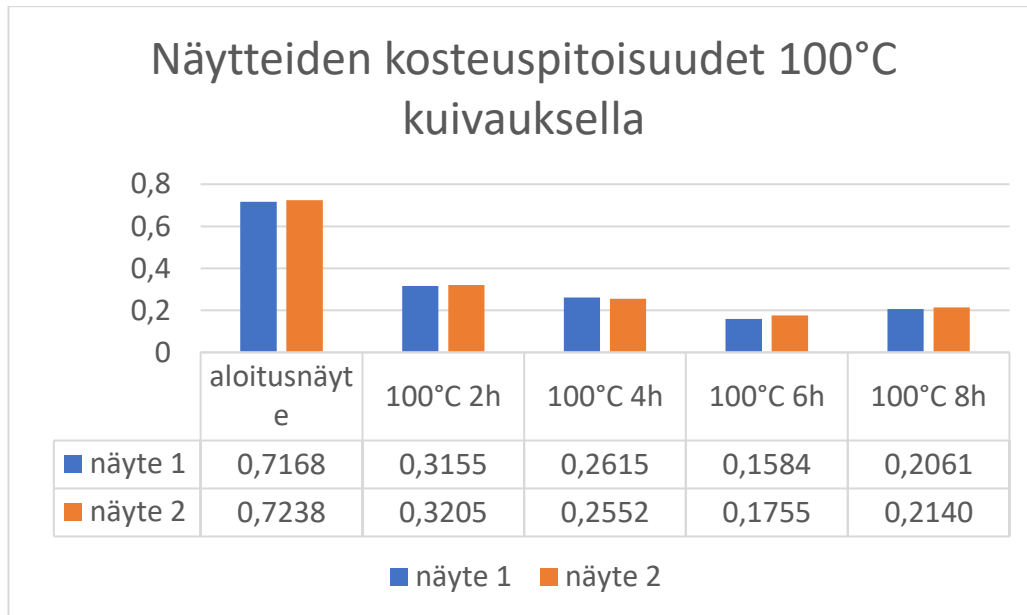


Kuvio 7. 90°C lämpötilassa kuivattujen materiaalien kosteuspitoisuuksia eri aikaikkunoissa.

#### 4.3.3 Materiaalin kosteuspitoisuudet 100°C kuivauksella

Kuviosta 8 löytyvät graafiset ja numeraaliset arvot saaduista kosteusmittauksen tuloksista 100°C lämpötilassa kuivatuista materiaalista. Aloitusnäytteen kosteuspitoisuuden keskiarvo oli 0,7203%. Kaksi tuntia sadassa asteessa kuivatun materiaalinäytteiden keskiarvoiseksi kosteudeksi saatiin 0,3180%. Neljän tunnin kuivauksella kosteuden keskiarvoksi tuli 0,2584%. Kuusi tuntia kuivatun materiaalinäytteiden kosteuspitoisuus oli keskiarvollisesti 0,1670%. Kahdeksan tunnin kuivauksella keskiarvoksi tuli 0,2101%.

Kuten 90°C kuivauksessa kaikista matalin mitattu kosteus materiaalissa saavutettiin 6 tunnin kuivausikkunassa. Kosteuspitoisuus laskee lineaarisesti aloitusnäytteestä aina kuuteen tuntiin asti mutta 8 tuntia kuivauksessa ollut materiaali oli kosteuspitoisuudeltaan hieman korkeampi kuin kuuden tunnin kuivauksella.



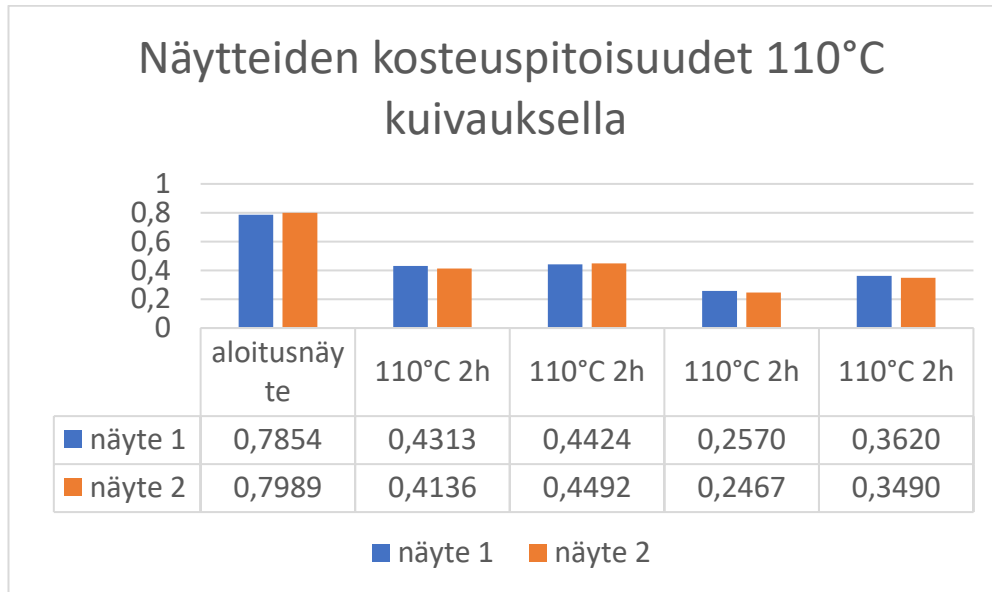
Kuvio 8. 100°C lämpötilassa kuivattujen materiaalien kosteuspitoisuuksia eri aikaikkunoissa.

#### 4.3.4 Materiaalin kosteuspitoisuudet 110°C kuivauksella

Kuviossa 9 esitetään graafisessa ja numeraalisessa muodossa saadut kosteusmittaustulokset 110°C lämpötilassa kuivatuissa materiaalinäytteissä. Aloituspäivän kosteuspitoisuuden keskiarvoksi saatiin neljännen kuivauspäivän näytteistä 0,7922%. Kaksi tuntia kuivatuista materiaalinäytteistä kosteuspitoisuuden keskiarvoksi saatiin 0,4225%. Neljän tunnin kuivauksen jälkeen materiaalin keskiarvoinen kosteus oli 0,4458%. Kuuden tunnin kuivausikkunasta otetusta materiaalista suoritetun kosteuspitoisuusmittauksen keskiarvoksi tuli 0,2519%. Kahdeksan tunnin kuivauksella keskiarvoksi kosteusmittauksessa saatiin 0,3556%.

110°C kuivauksen lopputulokset ovat hämmentäviä. Kaikkien kuivattujen näytteiden kosteuspitoisuudet ovat huomattavasti kuivaamatonta aloitusnäytettä matalammat, mutta minkäänlaista yhdenmukaista suuntausta tai linjaa saaduissa tuloksissa ei pysty tekemään. Testatun materiaalin kosteuspitoisuus kasvaa neljän tunnin kuivausikkunassa nähtynä kahden tunnin mittauksiin verrattuna. Kuuden tunnin kohdalla kosteuspitoisuus on matalimmillaan mitatuista tällä lämpötilalla kuivatuista näytteistä. Kahdeksan tunnin kohdalla materiaalin kosteuspitoisuus

kasvaa taas huomattavasti verrattuna edeltäneeseen kuuden tunnin kuivauksen mittatuloksiin.



Kuvio 9. 110°C lämpötilassa kuivattujen materiaalierien kosteuspitoisuuksia eri aikaikkunoissa.

## 5 Pohdinta

Testituloksia tutkiessa on selvästi havaittavissa useita kohtia, jotka kiinnittävät huomiota epäloogisuudellaan ja herättävät tarvetta lisätutkimukselle ja -kysymyksille. Kysymyksiä herää niin materiaalin käyttäytymisestä ja ominaisuuksista kuin koetuloksista.

## 5.1 Ruiskuvalun parametrit

Viimeisenä kuivauspäivänä 110°C lämpötilassa kuivatun materiaalin käyttäytymisen ruiskuvalettessa oli yllättävää. Vaihtopaineiden noustessa lähes 10 baaria verrattaessa muissa lämpötiloissa kuivattujen materiaalien ruiskuvalun vaihtopaineisiin, täytyy pohtia, onko kyseessä materiaalin ominaisuus, jota ei aiemmin tiedetty. Yksittäisestä virheellisestä mittauksesta tai koneen sisäisestä häiriöstä tilanteessa ei ole kyse. Nämä virhe mahdollisuudet voidaan sulkea pois, sillä kuivausajanjakson pituudesta riippumatta ruiskuvalettu koe-erä 110°C:n kuivauksella tuotti lähes samanlaisen tuloksen vaihtopaineessa. Kosteuden merkitys materiaaliin ja ruiskuvaluun ajateltiin ennakkoon olevan sellainen, että mitä enemmän materiaalissa on kosteutta, sitä vähemmän vaihtopainetta se tuottaa ruiskuvalettaessa. 110°C kuivauksella materiaalin kosteus poistui kuitenkin muihin lämpötiloihin verrattuna heikosti, joten materiaali oli ruiskuvalettaessa melko kostea. Siksi vaihtopaineiden odotettiin olevan matalia. Tarkemman tiedon saamiseksi täytyisi selvittää, voiko korkea kuivauslämpötila vahingoittaa materiaalia, mutta tämän opinnäytetyön sisältöön sitä ei pystytty mahduttamaan.

## 5.2 Iskulujuustestin tulosten pohdinta

Iskulujuustestistä dataa saatiin suhteellisen paljon, sillä iskulujuuskokeita suoritettiin 200 kappaletta. Ensimmäisenä testatuissa 80°C kuivauksella kuivatetun materiaalin koesauvoissa testitulosten suuntaus näytti olevan etukäteen ajatellun kaltainen. Ennakkoon odotettiin, että iskulujuusarvot laskevat materiaalin ollessa kuivempaa mutta keskihajonta pienenee. Testitulokset korkeammista lämpötiloissa kuivattujen materiaalien iskulujuuskokeissa eivät noudattaneet tätä ennako-oletusta. 90°C kuivauksella materiaalista valmistetut koesauvat toimivat päinvastoin. Iskulujuustulokset kasvoivat materiaalin ollessa kuivempaa lukuun ottamatta viimeistä kahdeksan tunnin kuivausta. Keskihajonnasta ei pystytty vetämään minkäänlaista johtopäätöstä, sillä sen suuruus ei odotetusti kasvanut tai pienentynyt lineaarisesti vaan keskihajonta heitteli eri kuivausajan koe-erien välillä. 100°C ja 110°C lämpötilassa kuivatusta materiaalista valmistetut koesauvat

eivät myöskään noudattaneet minkäänlaista odotettua mallia. Molemmissa tapauksissa iskulujuuskokeen tulokset heittelevät sekä suurempiin että pienempiin arvoihin keskihajonnan tehdessä samaa eri aikaikkunoiden välillä.

Testituloksien tarkkuutta mahdollisesti voitaisiin parantaa suuremmilla testatuilla koe-erillä. Opinnäytetyössä iskulujuuskokeet suoritettiin kymmenelle koesauvalle jokaisesta kuivausikkunasta. Vertailukelpoisen ja luotettavan datan saavuttamiseksi testattavien koe-erien kokoa täytyisi kasvattaa huomattavasti suuremmiksi. Puhutaan useiden satojen koesauvojen eristä jokaisesta koeikkunasta. Toinen vielä tärkeämpi pohdinnan aihe on kysymys siitä, soveltuuko kyseinen materiaali edes iskulujuuskokeeseen. Voidaanko materiaalista, testatun koeerän koosta riippumatta, saada lineaarisia, linjassaan olevia testituloksia. Komposiitissa materiaalit sekoittuvat epätasaisesti eikä tuote voi ikinä olla täysin tasalaatuista. Luonnonkuituja käytettäessä tämä efekti korostuu, sillä sekoitettavan luonnonkuidun ominaisuudet eivät ole systemaattisesti tasaisia eikä materiaali ole homogeenistä.

### **5.3 Kosteuspitoisuuksien pohdinta**

Kosteuspitoisuuksia mitatessa tulokset olivat hieman odotetumpia kuin esimerkiksi iskulujuuskokeessa. Odotusarvona oli, että mitä korkeampi lämpötila kuivuriin säädetään sitä nopeammin ja tehokkaammin kosteus poistuu materiaalista. Liian korkeaksi lämpötilaa ei voida kuivattaessa asettaa polypropeenin sulamisen takia. Liian korkeassa lämpötilassa materiaaligranulaatit tarttuivat toisiinsa. Kaikista suurin yllätys tulosten kannalta saatiin 110°C lämpötilassa kuivatussa materiaalierästä. Täysin oletusarvon vastaisesti korkeimmassa lämmössä kuivattu materiaali oli kaikista kosteinta kuivatuista materiaaleistanäytteistä. Kaikissa kuivauslämpötiloissa tapahtui lisäselvitystä kaipaava tapahtuma, jossa materiaalin kosteus nousi verrattuna sitä edeltäneeseen vähemmän kuivattuun materiaaliin.

80°C kuivauksessa 4 tunnin kuivauksella materiaali oli kuivempaa kuin 6 tunnin kuivauksella. Ero oli kuitenkin niin pieni, että sen voidaan käytännössä katsoa pysyneen samana. 90°C kuivauslämpötilalla materiaali oli kuivempaa 2 tunnin kuin 4 tunnin kohdalla ja uudestaan 6 tunnin kohdalla verrattuna 8 tunnin kuivaukseen. 100°C kuivauksessa kuivin materiaali saavutettiin kuuden tunnin kohdalla ja materiaalin kosteuspitoisuus kasvoi taas kahdeksan tunnin kohdalla. 110°C kuivauksella materiaali oli kahden tunnin kohdalla kuivempaa kuin neljän tunnin kohdalla. Kosteuspitoisuus laski neljän tunnin arvosta kuuden tunnin mittauksessa, jolloin materiaali oli kuivinta tässä kuivauslämpötilassa. Kahdeksan tunnin kohdalla materiaalin kosteuspitoisuus kasvoi uudelleen verrattuna kuuden tunnin mittaustulokseen.

Opinnäytetyössä kuivaamisessa käytetty kuivailmakuivuri toimi kahdella kuivauspatruunalla. Olisikin siis tarpeellista kyseenalaistaa molempien patruunoiden kunto. Suoritettu kastepistemittaus tehtiin neljän tunnin kuivauksella. Sitä onko kuivuri tässä ajassa vaihtanut kuivauspatruunaa, ei voida sanoa. Kastepistemittaus osoitti kuivurin olevan kunnossa, mutta varmuutta siihen, vaihtoiko kone suoritettussa neljän tunnin mittauksessa kuivauspatruunaa ei ole. Kuivurin kuivauspatruunaa ei voida manuaalisesti vaihtaa vaan kone tekee sen automaattisesti. Järkevänä syynä kasvaneeseen kosteuteen pitemmällä kuivausajalla voitaisiin pitää sitä, että vain toinen kuivurin molekyyllisihdeistä oli kunnossa ja toinen viallinen. Tässä tapauksessa kastepistemittauksen tulokset olivat oikeita, mutta kone ei ehtinyt 4 tunnin kuivausajassa vaihtamaan viallista patruunaa käyttöön, jolloin ongelma olisi voitu huomata mittausta tehdessä.

#### **5.4 Jatkotutkimusten tarve ja muutokset koejärjestelyissä nähtynä suoritettuun testaukseen**

Yrityksen halutessa varmistuksen saatujen tuloksien paikkansapitävyydestä, täytyisi kastepistemittaus suorittaa uudelleen ja varmistua molempien kuivauspatruunoiden kunnosta. Kuivatun materiaalin vaikutus ruiskuvalun parametreihin vaatisi huomattavasti suuremman tutkimuksen, jossa mitattua dataa olisi enemmän tarjolla. Kuivaussektoreiden lämpötilat ruuvilla eri vyöhykkeillä tuottaisi



varmasti paljon mielenkiintoista ja tutkittavaa dataa materiaalin käyttäytymisestä ja saattaisi selventää osaltaan heränneitä kysymyksiä.

Suurimpana muutoksena uutta tutkimusta varten, verratessa opinnäytetyön tutkimukseen, voidaan kiinnittää huomiota testattavien erien kokoon. Luotettavan tiedon saamiseksi tutkittavia näytteitä täytyisi olla huomattavasti enemmän. Tässä opinnäytetyössä ei suurien testierien tutkimiseen ollut aikataulun puolesta mahdollisuutta.

Koejärjestelyihin voitaisiin myös kiinnittää huomiota. Opinnäytetyötä tehtäessä näytteitä täytyi siirtää testaamista varten Pyytivaaralta, yrityksen tiloista, Joensuuun Karelia-amk:n tiloihin. Tämä tarkoittaa sitä, ettei näytteitä päästy tutki-  
maan heti vaan ne täytyi varastoida kuljetuksen ajaksi. Uutta laajempaa testiä suunnitellessa tämä olisi hyvä ottaa huomioon ja yrityksen olisi hyvä järjestää kaikki tarvittava testauslaitteisto tiloihinsa niin, että näytteitä päästäisiin tutkimaan välittömästi. Tällöin välttyttäisiin kuljetuksen ja varastoinnin vaikutuksilta mitattuihin testituloksiin.

## **5.5 Oma oppiminen**

Pohjatietoni ruiskuvalusta ja ylipäättään muovien työstämisestä sekä komposiiteista oli jo melko hyvä aiempien työpaikkojeni ja työtehtävieni takia. Oma oppimiseni tätä opinnäytetyötä tehtäessä rajoittui lähinnä uusien laitteiden käytön oppimiseen. Uusina opittuina laitteistoina voidaan sanoa kastepistemittari ja kastepistemittaus sekä titraattori, sen käyttö ja huolto.

Testaamisesta opin myös testattavan koe-erän tärkeyden lopputulokseen. Opin muutamia peruskeinoja testituloksista yksittäisten virheitten poistamiseksi. Uskon että opinnäytetyötäni tehdessä oppimani asiat voivat olla hyödyllisiä tulevaisuudessa työelämässä ja siellä suoritettavissa tehtävissä. Ainakin testitulosten kriittisessä tulkinnassa sekä mahdollisissa tulevissa testauksissa.

## Lähteet

### Kirjalliset

Airasmaa, I.; Kokko, J.; Komppa, V. & Saarela, O. 1991. Muovikomposiitit. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Koto, T & Tiisala, S 2004. Muovi+puu Puukuitulujitteiset muovikomposiitit. Jyväskylä; Gummerus Kirjapaino Oy.

### Sähköiset lähteet

2015. Luonnonkuitukomposiitit. Luonnonkuitukomposiittien oppimisympäristö ja koulutuksen kehittämisen hanke. <http://www.luonnonkuitu.fi/tietoja.html> Viitattu 20.2.2018

2018. KESKIHAJONTA.P (KESKIHAJONTA.P-funktio). Microsoft Corporation. <https://support.office.com/fi-fi/article/keskihajonta-p-keskihajonta-p-funktio-6e917c05-31a0-496f-ade7-4f4e7462f285?NS=EXCEL&Version=16&Sys-Lcid=1035&UILcid=1035&AppVer=ZXL160&HelpId=xlmain11.chm60559&ui=fi-FI&rs=fi-FI&ad=FI> 20.5.2018

2018. Komposiitit. Muoviteollisuus Ry. <http://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit/komposiitit/>. Viitattu 3.2.2018.

2018. Mahdollisuuksien materiaali. Plasthill Oy, Kareline® natural composites. <https://plasthill.fi/fi/kareline/mahdollisuuksien-materiaali> Viitattu 5.3.2018.

2014. How to dry PET for container applications. Plastics technology. <https://www.ptonline.com/articles/how-to-dry-pet-for-container-applications> Viitattu 21.4.2018

### Suulliset lähteet

Groche. A. 2018 Tehtaanjohtaja. Groche Technik GmbH. Tiedoksianto 10.4.2018

Kaasinen E. 2018. Toimitusjohtaja. Plasthill Oy. Henkilökohtainen tiedoksianto 14.5.2018

Tanskanen M. 2018. Tuotantopäällikkö. Plasthill Oy. Haastattelu 14.5.2018.

## **Liitteet**

- 1 Iskulujuuskokeen tulokset. (laskennasta poisjätetyt korkein ja matalin tulos merkitty punaisella)
- 2 Titrattujen näytteiden paino ja mitatut kosteuspitoisuudet.
- 3 Keskihajonnan laskukaava.

Kuivauserä	Näytesauva	kJ/m	kJ/m <sup>2</sup>	Kuivauserä	Näytesauva	kJ/m	kJ/m <sup>2</sup>
Aloitusnäyte 80°C	1	0,104	24,79	Aloitusnäyte 90°C	1	0,071	16,94
	2	0,119	28,40		2	0,061	14,56
	3	0,090	21,66		3	0,076	18,25
	4	0,065	15,62		4	0,058	14,03
	5	0,093	22,19		5	0,074	17,73
	6	0,055	13,24		6	0,071	16,94
	7	0,087	20,88		7	0,083	19,83
	8	0,116	27,63		8	0,067	16,15
	9	0,084	20,09		9	0,065	15,62
	10	0,163	38,98		10	0,088	21,14
80°C 2h	1	0,089	21,40	90°C 2h	1	0,074	17,73
	2	0,096	22,97		2	0,061	14,56
	3	0,082	19,57		3	0,086	20,62
	4	0,076	18,25		4	0,101	24,27
	5	0,087	20,88		5	0,106	25,31
	6	0,101	24,27		6	0,071	16,94
	7	0,077	18,52		7	0,053	12,71
	8	0,080	19,04		8	0,077	18,52
	9	0,085	20,35		9	0,064	15,36
	10	0,094	22,45		10	0,097	22,23
80°C 4h	1	0,076	18,25	90°C 4h	1	0,086	20,62
	2	0,084	20,09		2	0,076	18,25
	3	0,084	20,09		3	0,082	19,57
	4	0,087	20,88		4	0,082	19,57
	5	0,088	21,14		5	0,123	29,43
	6	0,085	20,35		6	0,063	15,09
	7	0,086	20,65		7	0,075	17,99
	8	0,078	18,78		8	0,089	21,4
	9	0,087	20,88		9	0,084	20,09
	10	0,085	20,35		10	0,084	20,09
80°C 6h	1	0,074	17,33	90°C 6h	1	0,093	22,19
	2	0,083	19,83		2	0,106	25,31
	3	0,068	16,41		3	0,083	19,83
	4	0,071	16,94		4	0,094	22,45
	5	0,058	14,03		5	0,085	20,35
	6	0,080	19,04		6	0,121	28,92
	7	0,065	15,62		7	0,076	18,25
	8	0,075	17,99		8	0,100	24,01
	9	0,067	16,15		9	0,072	17,20
	10	0,073	17,46		10	0,076	18,25
80°C 8h	1	0,066	15,88	90°C 8h	1	0,095	22,71
	2	0,066	15,88		2	0,083	19,83
	3	0,063	15,09		3	0,092	21,92
	4	0,072	17,20		4	0,068	16,41
	5	0,081	19,31		5	0,086	20,62
	6	0,062	14,83		6	0,070	16,67
	7	0,062	14,83		7	0,074	17,73
	8	0,061	14,56		8	0,074	17,73
	9	0,068	16,41		9	0,076	18,25
	10	0,061	14,56		10	0,088	21,14

Kuivauserä	Näytesauva	kJ/m	kJ/m <sup>2</sup>	Kuivauserä	Näytesauva	kJ/m	kJ/m <sup>2</sup>
Aloitusnäyte 100°C	1	0,105	25,05	aloitusnäyte 110°C	1	0,082	19,57
	2	0,088	21,14		2	0,096	22,96
	3	0,092	21,92		3	0,085	20,35
	4	0,110	26,34		4	0,077	18,52
	5	0,095	22,71		5	0,097	23,23
	6	0,095	22,71		6	0,075	17,99
	7	0,108	25,83		7	0,104	24,78
	8	0,101	24,27		8	0,094	22,44
	9	0,098	23,49		9	0,088	21,14
	10	0,094	22,45		10	0,073	17,46
100°C 2h	1	0,074	17,73	110°C 2h	1	0,079	19,04
	2	0,081	19,31		2	0,094	22,44
	3	0,092	21,92		3	0,092	21,92
	4	0,087	20,88		4	0,083	19,83
	5	0,106	25,31		5	0,104	24,78
	6	0,096	22,97		6	0,087	20,88
	7	0,084	20,09		7	0,081	19,30
	8	0,091	21,66		8	0,096	22,96
	9	0,085	20,35		9	0,070	16,67
	10	0,095	22,71		10	0,083	19,83
100°C 4h	1	0,088	21,14	110°C 4h	1	0,076	18,25
	2	0,076	18,25		2	0,076	18,25
	3	0,083	19,83		3	0,082	19,57
	4	0,078	18,78		4	0,082	19,57
	5	0,088	21,14		5	0,078	18,78
	6	0,082	19,57		6	0,060	14,30
	7	0,067	16,15		7	0,099	23,75
	8	0,081	19,31		8	0,079	19,04
	9	0,089	21,40		9	0,077	18,52
	10	0,081	19,31		10	0,072	17,20
100°C 6h	1	0,070	16,67	110°C 6h	1	0,076	18,25
	2	0,095	22,70		2	0,084	20,09
	3	0,089	21,40		3	0,079	19,04
	4	0,094	22,44		4	0,103	24,52
	5	0,105	25,04		5	0,083	19,83
	6	0,101	24,27		6	0,096	22,96
	7	0,095	22,70		7	0,092	21,92
	8	0,092	21,92		8	0,097	23,23
	9	0,098	23,49		9	0,087	20,88
	10	0,101	24,27		10	0,079	19,04
100°C 8h	1	0,081	19,30	110°C 8h	1	0,088	21,14
	2	0,093	22,18		2	0,086	20,61
	3	0,088	21,14		3	0,090	21,66
	4	0,088	21,14		4	0,086	20,61
	5	0,074	17,73		5	0,075	17,99
	6	0,088	21,14		6	0,084	20,09
	7	0,079	19,04		7	0,073	17,46
	8	0,116	27,63		8	0,081	19,30
	9	0,090	21,66		9	0,079	19,04
	10	0,090	21,66		10	0,105	25,04

Kuivauserä	Näyte 1 paino (g)	Näyte 1 kosteus (%)	Näyte 2 paino (g)	Näyte 2 kosteus (%)
Aloitusnäyte 80°C	1,0037	0,6786	1,0498	0,8340
80°C 2h	1,0764	0,3735	1,0600	0,4196
80°C 4h	1,0771	0,3493	1,0164	0,3589
80°C 6h	1,0490	0,3687	1,0673	0,3403
80°C 8h	1,0355	0,2962	1,0203	0,2975
Aloitusnäyte 90°C	1,0485	0,7333	1,0378	0,7514
90°C 2h	1,0274	0,2568	1,0231	0,2583
90°C 4h	1,0347	0,2595	1,0326	0,2776
90°C 6h	1,0133	0,1747	1,0102	0,1679
90°C 8h	1,0429	0,2266	1,0479	0,2209
Aloitusnäyte 100°C	1,0349	0,7168	1,0115	0,7238
100°C 2h	1,0207	0,3155	1,0033	0,3205
100°C 4h	1,0450	0,2615	1,0266	0,2552
100°C 6h	1,0399	0,1584	1,0133	0,1755
100°C 8h	1,0328	0,2061	1,0169	0,2140
Aloitusnäyte 110°C	1,0151	0,7854	1,0256	0,7989
110°C 2h	1,0206	0,4313	1,0494	0,4136
110°C 4h	1,0415	0,4424	1,0214	0,4492
110°C 6h	1,0453	0,2570	1,0280	0,2467
110°C 8h	1,0208	0,3620	1,0176	0,3490

Keskihajonta on varianssin neliöjuuri ja se lasketaan kaavalla:

$$\sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}}$$

jossa  $x$  on otoksen keskiarvo KESKIARVO(luku1,luku2,...) ja  $n$  on otoksen suuruus.

Lähde: 2018. KESKIHAJONTA.P (KESKIHAJONTA.P-funktio). Microsoft Corporation. <https://support.office.com/fi-fi/article/keskihajonta-p-keskihajonta-p-funktio-6e917c05-31a0-496f-ade7-4f4e7462f285?NS=EXCEL&Version=16&SysLcid=1035&UILcid=1035&AppVer=ZXL160&HelpId=xlmain11.chm60559&ui=fi-FI&rs=fi-FI&ad=FI> 20.5.2018