

Tuomas Latvala

**PUUKUITUERISTEEN  
OMINAISLÄMPÖKAPASITEETTIN  
MÄÄRITYS FOX304-  
LÄMPÖVIRTALEVYLAITTEELLA**

Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Maaliskuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Tuomas Latvala: Puukuitueristeen ominaislämpökapasiteettien määrittäminen FOX304-lämpövirtalevyllä

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Maaliskuu 2020

---

Tässä työssä tutkittiin, kuinka FOX304-lämpövirtalevyllä soveltuu puukuitueristeen ominaislämpökapasiteetin määrittämiseen. Laite on tarkoitettu ensisijaisesti lämmönjohtavuuksien määrittämiseen, mutta sitä voi käyttää myös ominaislämpökapasiteettien määrittämisessä. Tällöin lämpövirtalevyjen lukemien avulla pyritään mittaamaan koekappaleeseen tai koekappaleesta pois siirtyneen energian määrää eri tilanteissa.

Työssä määritettiin puukuitueristeen ominaislämpökapasiteetti kolmen eri mittaustapahtuman avulla. Mittaustuloksiin kannattaa suhtautua kriittisesti, koska kirjallisuudessa on esitetty huomattavasti matalampaa ominaislämpökapasiteettia puukuitueristeelle ja monille muillekin materiaaleille.

Avainsanat: ominaislämpökapasiteetti, lämpövirtalevy, puutuotteet

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	LÄMPÖ .....	2
2.1	Yleistä .....	2
2.2	Lämmön siirtyminen.....	2
2.2.1	Johtuminen .....	2
2.2.2	Konvektio .....	3
2.2.3	Lämpösäteily .....	3
2.3	Lämmönjohtavuus ja ominaislämpö.....	4
2.4	Ominaislämpökapasiteetin mittaussmenetelmät.....	5
2.5.1	Kalorimetri .....	5
2.5.2	Lämpövirtalevyalaite .....	6
3.	LÄMPÖVIRTALEVYLAITE FOX304.....	8
4.	MITTAUSTEN SUORITUS, TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	11
	LÄHTEET .....	15

# 1. JOHDANTO

Tässä työssä on tarkoitus selvittää puukuitueristeen ominaislämpökapasiteetit. Työn tuloksia tullaan hyödyntämään Tampereen yliopiston rakennetun ympäristön tiedekunnan jatkotutkimuksissa, joissa selvitetään huokoisten puupohjaisten rakennusmateriaalien sisäisiä kosteudensiirtokertoimia. Päällimmäisenä tavoitteena työssä on selvittää FOX304-lämpövirtalevylaitteen soveltuvuutta kevyiden puupohjaisten materiaalien ominaislämpökapasiteetin määrittämiseen sekä saada kokemusta mittaukseen liittyvien sähköteknisten kertoimien vaikutuksesta mittaustuloksiin.

## 2. LÄMPÖ

### 2.1 Yleistä

Lämpöenergia on atomien ja vapaiden elektronien liikettä [1]. Lämpöenergialla tarkoitetaan tarkasteltavan systeemin sisältämien molekyylien yhteen summattua kineettistä energiaa. Systeemi voi olla esimerkiksi pala ainetta tai määrätty joukko molekyyliä.

Lämmöstä puhuttaessa tarkoitetaan lämpöenergiaa, joka on siirtymässä systeemistä toiseen. Lämpö pyrkii siirtymään aina lämpötilaltaan kuumemmasta kappaleesta kylmempään kappaleeseen. Lämmön siirtäminen vastakkaiseen suuntaan vaatii aina ulkopuolista työtä.

Lämpötila kuvaa sitä, mikä on systeemin molekyylien kineettisen energian keskiarvo. Lämpötila ei kuitenkaan suoraan kerro systeemin sisältämän lämpöenergian määrää, koska eri aineisiin on sitoutunut eri määrä lämpöenergiaa, vaikka ne olisivatkin samassa lämpötilassa.

Jos kaksi systeemiä ovat kontaktissa toisiinsa, pyrkivät ne asettumaan samaan lämpötilaan. Kun tämä lämpötila on saavutettu, lämmön siirtymistä ei enää tapahdu ja systeemit ovat keskenään termodynaamisessa tasapainossa. Tästä seuraa ns. termodynamiikan 0. pääsääntö: Jos systeemi A on tasapainossa systeemin B kanssa ja B on tasapainossa systeemin C kanssa, myös A on tasapainossa C:n kanssa. Tällöin kaikki systeemit, A, B ja C, ovat samassa lämpötilassa.

### 2.2 Lämmön siirtyminen

#### 2.2.1 Johtuminen

Johtuminen on energian siirtymistä korkeamman energiatason partikkeleista matalamman energiatason partikkeleihin niiden välisten törmäys- ja värähtelyvoimien kautta [2]. Johtuminen pyrkii siis tasaamaan lämpötilaeroja siirtämällä lämpöenergiaa lähdetä kylmempään suuntaan. Johtumisessa ainetta ei siirry, vaan lämpöenergia kulkee paikallaan olevan aineen kautta toisaalle.

Yksiulotteisessa tapauksessa johtumisesta aiheutuva lämpövirran tiheys [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] on

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx} , \quad (2.1)$$

jossa  $q_x$  on lämpövuoto,  $dT/dx$  lämpötilagradientti ja  $\lambda$  [W/(m·K)] lämmönjohtavuus, joka on aineelle ominainen. Kaava on klassisen fysiikan mukainen malli, Fourierin laki, jota hyödynnetään, kun ainetta ja energiaa käsitellään kontinuumina eli suuremmissa mittakaavassa kuin yksittäisinä hiukkasina.

## 2.2.2 Konvektio

Konvektiossa eli kuljettumisessa lämpö siirtyy liikkuvan aineen mukana. Kun lämpöä siirtyy kuljettumalla, siirtyy sitä aina myös johtumalla [2]. Niinpä termillä konvektio tarkoitetaan lämmön siirtymistä näiden kahden lämmönsiirtymismekanismin tavoin yhtäaikaaisesti. Konvektiota aiheuttavat esimerkiksi painovoima ja lämpötilaerot, sillä lämpötila vaikuttaa kaasujen ja nesteiden tiheyksiin. Esimerkiksi kylmin eli tihein neste pyrkii painovoiman ansiosta painumaan astian pohjalle, mikä saa aikaan virtauksia.

Konvektio voidaan luokitella kahteen luokkaan virtauksen luonteen mukaisesti. Pakotettu konvektio on jonkin ulkoisen voiman, kuten tuulettimen, pumpun tai tuulen, aiheuttamaa. Luonnollisessa konvektiossa sitä vastoin virtaus aiheutuu sisäisestä nosteesta. Sisäinen noste aiheutuu yhdessä painovoimasta ja nesteen tai kaasun tiheyseroista, jotka ovat lämpötilaerojen aiheuttamia. [2]

## 2.2.3 Lämpösäteily

Lämpösäteily on energiaa, jota aine emittoi. Säteilystä puhuttaessa tarkoitetaan yleensä kiinteän kappaleen aiheuttamaa säteilyä, vaikka säteily voi olla peräisin myös kaasusta tai nesteestä. Lämpösäteilyn tuottama energia kulkee sähkömagneettisina aaltoina tarvitsematta väliainetta. Itse asiassa lämpösäteily kulkee tehokkaimmin juuri tyhjiössä. Tämä väliaineeton lämmönsiirtyminen onkin perustavanlaatuisen ero konvektioon ja johtumiseen verrattuna. [2]

Suurin mahdollinen pinnasta lähtevä säteilyteho kuvataan Stefanin–Boltzmannin lakina:

$$q'' = \sigma T_s^4 , \quad (2.2)$$

jossa  $T_s$  on pinnan lämpötila (K) ja  $\sigma$  Stefanin–Boltzmannin vakio ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)). Tällaista kappaletta sanotaan joko ideaaliseksi tai mustaksi kappaleeksi. Todellisuudessa kappaleet säteilevät tätä vähemmän seuraavan yhtälön mukaan:

$$q'' = \varepsilon \sigma T_s^4 , \quad (2.3)$$

jossa  $\varepsilon$  on pinnan emissiviteetti ( $0 < \varepsilon < 1$ ).

Kappale, jonka lämpötila on yli absoluuttisen nolapisteen, voi jäähtyä, vaikkei se olisi-kaan kontaktissa minkään aineen kanssa. Tämä johtuu siitä, että kappale emittoi silloin tällöin fotoneja, mikä alentaa kappaleen energiatasoa, siis lämpötilaa. [2, s. 546]

## 2.3 Lämmönjohtavuus ja ominaislämpö

Materiaalin lämmönjohtavuus  $\lambda$  [W/(m·K)] voidaan mitata asettamalla tasomaisen koekappaleen kahdelle pinnalle eri lämpötilat ja mittaamalla tästä lämpötilaerosta aiheutuva lämpövirran tiheys  $q$  [W/m<sup>2</sup>] koekappaleen läpi. Lämmönjohtavuuden arvolla tarkoitetaan tavallisesti johtumalla siirtyvän lämmön osuutta, mutta huokoisilla materiaaleilla mitattu arvo sisältää myös huokosten sisällä tapahtuvan konvektion ja säteilyn vaikutuksen. [3, s. 345]

Ominaislämpökapasiteetti  $c$  kertoo, kuinka paljon lämpöä tarvitaan aineen tai materiaalin lämpötilan nostamiseksi yhdellä asteella massayksikköä kohti [4, s. 471]. Ominaislämpökapasiteetti on siis aineen ominaisuus. Lämpökapasiteetti puolestaan kertoo tietyn kappaleen energiantarpeen, kun lämpötilaa muutetaan asteella. Ominaislämpökapasiteetti on

$$c = \frac{dQ}{m dT} \quad , \quad (2.4)$$

jossa  $dQ$  [J] on sitoutunut tai luovutettu lämpömäärä,  $m$  [kg] on massa ja  $dT$  [K] lämpötilan muutos.

Aineen tiheys  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] on sen massa jaettuna tilavuudella:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad , \quad (2.5)$$

jossa tilavuus on  $V$  [m<sup>3</sup>] [4, s. 427].

Nyt saadaan edellisten kaavojen perusteella

$$c = \frac{dQ}{\rho V dT} \quad . \quad (2.6)$$

Ominaislämpökapasiteetteja voidaan mitata useamman eri koekappaleen avulla. Ainoa ero, joka kaavan 2.6 mukaan ominaislämpökapasiteeteissa on kappaleiden välillä, on tiheys. Materiaalin ominaislämpökapasiteetti ei kuitenkaan varsinaisesti aiheudu tiheydestä, vaan materiaalin sisältämien molekyylien kineettisistä vapausasteista eli siitä, kuinka monella tavalla molekyylit voivat varastoida kineettistä energiaa.

Nopeuden kolmen avaruudellisen komponentin lisäksi esimerkiksi raskaalla kaasumolekyylillä voi olla kulmanopeudeksi varastoitunutta energiaa sekä molekyylin sisäistä värähtelyenergiaa. Eri aineiden ominaislämpökapasiteetit ovatkin ainemäärään suhteutettuna usein melko lähellä toisiaan. [5]

## 2.4 Ominaislämpökapasiteetin mittaamenetelmät

### 2.5.1 Kalorimetri

Perinteisesti ominaislämpökapasiteetti on mitattu kalorimetrin avulla. Kalorimetri on asia, joka on lämpöeristetty ympäristöstään mahdollisimman täydellisesti. Lämpöeristyksestä huolimatta kalorimetrin ja ympäristön välillä tapahtuu pientä lämmön siirtymistä. Kalorimetrin tavallisimmat käyttökohteet ovat nesteiden ja kiinteiden aineiden ominaislämpökapasiteettien sekä sulamis-, höyrystymis- ja tiivistymislämpöjen mittaukset. [6]

Kun kalorimetrissä tapahtuu vain lämmönvaihtoa, on lämpökapasiteetin määritelmän mukaan voimassa

$$dQ = CdT \quad , \quad (2.7)$$

jossa  $dQ$  [J] on lämmönvaihdossa siirtynyt lämpömäärä,  $C$  [J/K] kalorimetrin lämpökapasiteetti ja  $dT$  [K] lämpötilan muutos.

Tavallisen kalorimetrin sisällä on nestettä, lämpömittari ja joskus myös sekoitin. Tarkkojen mittausten aikaansaamiseksi on huomioitava myös kalorimetrin kautta tapahtuva lämmönvaihto. Laskuissa tämä huomioidaan kalorimetrin niin sanotun vesiarvon  $W$  avulla. Vesiarvo on sellainen määrä vettä, jonka lämpökapasiteetti on sama kuin kalorimetrillä. [6]

Vesiarvo mitataan seuraavalla tavalla. ”Kalorimetrissä on aluksi vettä määrä  $m_1$  lämpötilassa  $T_1$ . Kalorimetriin lisätään  $m_2$ :n verran vettä, jonka lämpötila on  $T_2$ . Loppulämpötilaksi saadaan  $T_0$ .” Koska luovutettu lämpömäärä on yhtä suuri kuin vastaanotettu lämpömäärä, ja lämmönvaihto ympäristön kanssa oletetaan mitättömäksi, voidaan  $W$  laskea yhtälöstä

$$c_w m_2 (T_2 - T_0) = c_w (W + m_1) (T_0 - T_1) \quad (2.8)$$

jossa  $c_w$  on veden ominaislämpökapasiteetti. [6]

Kiinteän aineen ominaislämpökapasiteetti  $c_s$  mitataan vastaavalla tavalla kuin vesiarvo. Kalorimetrissä on vettä (massa  $m_w$ ) lämpötilassa  $T_w$ , ja sinne lisätään  $m_s$ :n verran lämpötilassa  $T_s$  olevaa tutkittavaa ainetta. Seuraavaksi lämpötilan annetaan tasoittua  $T_m$ :ään. Lämpöenergian säilymisen perusteella saadaan

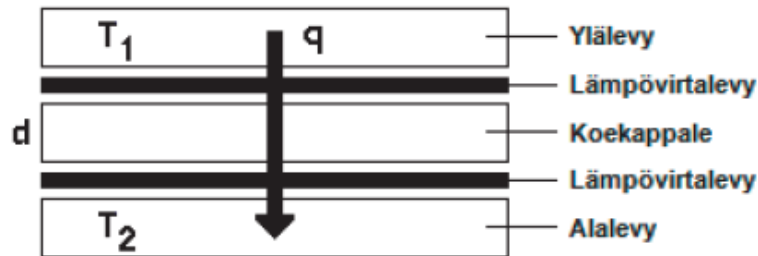


$$c_s m_s (T_s - T_m) = c_w (m_w + W) (T_m - T_w) \quad (2.9)$$

josta  $c_s$  voidaan ratkaista. [6]

## 2.5.2 Lämpövirtalevyalaite

Lämpövirtalevylaitteen avulla voidaan nimensä mukaisesti mitata koekappaleen läpi johdettavaa lämpövirtaa. Lämpövirtalevyalaite koostuu ylä- ja alalevystä, kahdesta lämpövirtalevystä sekä suojakuoresta. Tutkittava koekappale asetetaan ylä- ja alalevyn väliin. Koejärjestely sisältää myös lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät, jotka on asennettu osittain ylä- ja alalevyihin. Näillä järjestelmillä levyjen lämpötiloja voidaan säätää halutuiksi. [3, s. 345]



**Kuva 1.** Lämpövirtalevylaitteen periaate [7, s. 11].

Lämpövirtalevylaitteen ensisijainen käyttötarkoitus on mitata eri materiaalien lämmönjohtavuuksia. Tällöin lämpövirtalevyjen tasolle säädetään lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmillä eri lämpötilat, jolloin levyjen välille muodostuu lämpötilagradientti. Tästä aiheutuu lämpövirta, joka kulkee tutkittavan koekappaleen kautta levyltä toiselle yksiulotteisesti. [3, s. 345]



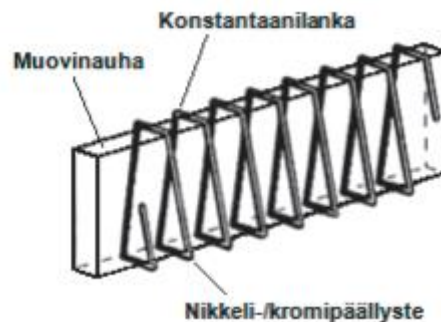
*Kuva 2. Tutkimuksissa käytetty jäähdytin*

Lämpövirtalevyllaitteella voidaan mitata myös levymäisen materiaalin ominaislämpökapasiteetit. Tällöin lämpövirtalevyjen lukemien avulla pyritään mittaamaan koekappaleeseen tai koekappaleesta pois siirtyneen energian määrää eri tilanteissa. Standardimittauksissa ylä- ja alalevy asetetaan +5 celsiusasteeseen, minkä jälkeen niiden lämpötilat nostetaan porrastetusti +15, +25, +35 ja +45 °C:een.

Aina, ennen kuin vallitseva lämpötila nostetaan seuraavaan lämpötilaan, odotetaan, että myös koekappale saavuttaa kyseisen lämpötilan mahdollisimman tarkasti. Kun kyseessä oleva lämpötila on saavutettu, laite siirtyy seuraavaan lämpötilaan. Laite tarkkailee jatkuvasti tuodun lämpöenergian määrää ja laskee yhteen jokaiseen lämpötilan nostoon tarvittun lämpöenergian. Tuloksena saadaan neljä eri ominaislämpökapasiteetin arvoa: +10, +20, +30 ja +40 asteessa. Näiden keskiarvosta saadaan lopullinen tulos.

### 3. LÄMPÖVIRTALEVYLÄITE FOX304

Tässä työssä on käytetty lämpövirtalevylaitetta FOX304, joka on tarkoitettu matalien lämmönjohtavuuksien omaavien materiaalien tutkimiseen. Laitteelle soveltuva mitta-alue on  $0,005-0,35 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  [7, s. 23]. Tällä lämpövirtalevylaitteella voidaan mitata sekä lämmönjohtavuuksia, että ominaislämpökapasiteetteja. Lämpövirtalevy koostuu ohuen muovinauhan ympärille kiedotuista termoelementtiketuista ts. metallilangoista, joiden joka toinen puolikiertös on päällystetty eri metallilla [8].



*Kuva 3. Lämpövirtalevyn rakenne [8]*

Lämpövirtalevyssä on siis joukko sarjaan kytkettyjä termopareja, joissa kahden eri metallin liitospäät ovat sijoitettuina järjestelmällisesti omille puolilleen. Tässä hyödynnetään Seebeckin termoelektristä ilmiötä, joka saa aikaan sen, että eri lämpötiloissa olevat johtimien päät synnyttävät jännitteen toistensa välille [9]. Tämä jännite on suoraan verrannollinen lämpötilaeroon levyn läpi, mutta kun lämpövirtalevyn oma lämmönvastus tunnetaan ja lämpötilat eivät muutu ajan suhteen, saadaan jännitteestä selville myös lämpövirtalevyn läpi johtuva lämpövirta [8].

Eri metallit lämpövirtalevyn eri puolilla vaikuttavat jännitteeseen niiden toisistaan poikkeavien termoelektristen ominaisuuksiensa vuoksi. Jos nämä metallit olisivat samat kuin jännitteen mittaamisessa käytettyjen johtojen, kumoutuisi jännite jännitemittarin johdoissa. Tästä syystä lämpövirtalevyssä käytetään eri metalleja, jotta mittarille jäisi mitattavaa jännitettä jäljelle.

FOX304 -lämpövirtalevylaitteessa on kaksi lämpövirtaa mittaavaa levyä, joten lämmönjohtavuusmittauksissa tuloksena saadaan kaksi eri lämmönjohtavuutta. Tutkittavan materiaalin lämmönjohtavuus on näiden keskiarvo. Mittauslämpötilaksi merkitään ylä- ja alalevyjen keskiarvo, joka kuvaa materiaalissa kokeen aikana vallinnutta keskimääräistä lämpötilaa. [3, s. 345]

Lämpövirran tiheys

$$q = \mu \cdot S_{cal} \quad , \quad (3.1)$$

jossa

$q$  lämpövirran tiheys ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$\mu$  termoelementtiketjun jännite ( $\mu\text{V}$ )

$S_{cal}$  lämpövirtalevylaitteen levyn kalibrointikerroin ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{V})$ ).

Yhtälön 3.1 kalibrointikerroinella on lämpövirtalevylaitteen toiminnan kannalta suuri merkitys. Laitteen kalibroinnissa selvitetään lämpövirran tiheyden ja termoelementteihin muodostuvan jännitteen välinen yhteys [8]. Kalibroinnissa käytetään yleisesti sellaista kalibrointikoekappaletta, jonka ominaisuudet tunnetaan hyvin tarkasti [7, s. 12]. Kalibrointimateriaalin lämmönjohtavuus on mitattu ennestään jollain suoralla menetelmällä, kuten suojatulla kuumalevylaitteella [3, s. 345].



**Kuva 3.** *Lämpövirtalevylaitte FOX304*



**Kuva 4.** Lämpövirtalevyalaite huukku auki

## 4. MITTAUSTEN SUORITUS, TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Mittaukset on suoritettu joulukuun 2017 ja toukokuun 2018 välisenä aikana Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitoksen rakennushallissa erillisessä tutkimus-  
huoneessa käyttäen FOX304-lämpövirtalevylaitetta. Tutkittavana materiaalina oli puu-  
kuitueriste, joka oli tässä tapauksessa puhallusvillaa.



*Kuva 5. Puhallusvillaa säilytyksessä*

Kyseisellä lämpövirtalevylaitteella mitattavien koekappaleiden on oltava levymäisiä mit-  
tausteknisistä syistä johtuen. Puhallusvilla ei ole levymäistä, mutta se saadaan levymäi-  
seen muotoon laittamalla se kehikon sisään. Mittauksissa käytettiin kehikkoa, jossa on  
muovikelmupohja ja kovasta eristeestä tehdyt seinäkkeet. Itse kehikko ei kuitenkaan vai-  
kuta mittaustuloksiin, koska FOX304-lämpövirtalevylaitte mittaa lämpövuota laitteen  
keskeltä kehikkoa pienemmältä alalta. Tutkittava puhallusvilla ei sisältänyt sideainetta.

Ennen kokeita puhallusvillaa säilytettiin vakioituissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa  
huoneessa, jossa lämpötila on +21 – +23 °C ja suhteellinen kosteus 50 %. Koekappaleita  
tulee säilyttää vakioituissa olosuhteissa riittävän pitkä aika, jotta lämpötila ja suhteellinen  
kosteus ehtisivät tasaantua myös kappaleiden sisällä.

Onnistuneita mittauksia tehtiin kolme kappaletta, ja kaikki samalla koekappaleella. En-  
nen kokeita kappale aina punnittiin tulevaa laskentaa varten. Myös kehikon sisämitat oli

mitattu, jotta puhallusvillan tiheys voitaisiin myöhemmin selvittää. Puhallusvillan tiheydet eri mittauspäivinä näkyvät alla.

Nimi	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )
Mittaus 1	21,09
Mittaus 2	21,02
Mittaus 3	21,07

**Taulukko 1.** Puhallusvillan tiheydet.

Mittauksen 1 tuloksiksi saatiin taulukossa 2 näkyvät tulokset. Keskiarvo on eri mittauspisteiden ominaislämpökapasiteettien keskiarvo, joka vastaa arvoa +25 Celsiusasteessa. Eräs mittaustulos on merkattu punaisella, koska se poikkeaa huomattavasti muista. Tätä poikkeavaa tulosta ei ole kuitenkaan jätetty pois laskuista.

Asetetut lämpötilat (°C)	Keskilämpötila (°C) toteutunut	Ominaislämpökapasiteetti (J/(m <sup>3</sup> ·K))	Keskiarvo (J/(m <sup>3</sup> ·K))
5 – 15	10.01	71396	
15 – 25	20.02	72946	74139
25 – 35	30.02	73071	
35 – 45	40.02	79144	

**Taulukko 2.** Mittauksen 1 tulokset.

Mittauksista 2 ja 3 saatiin taulukoissa 3 ja 4 näkyvät tulokset. Näissä ei huomattavia poikkeamia esiintynyt.

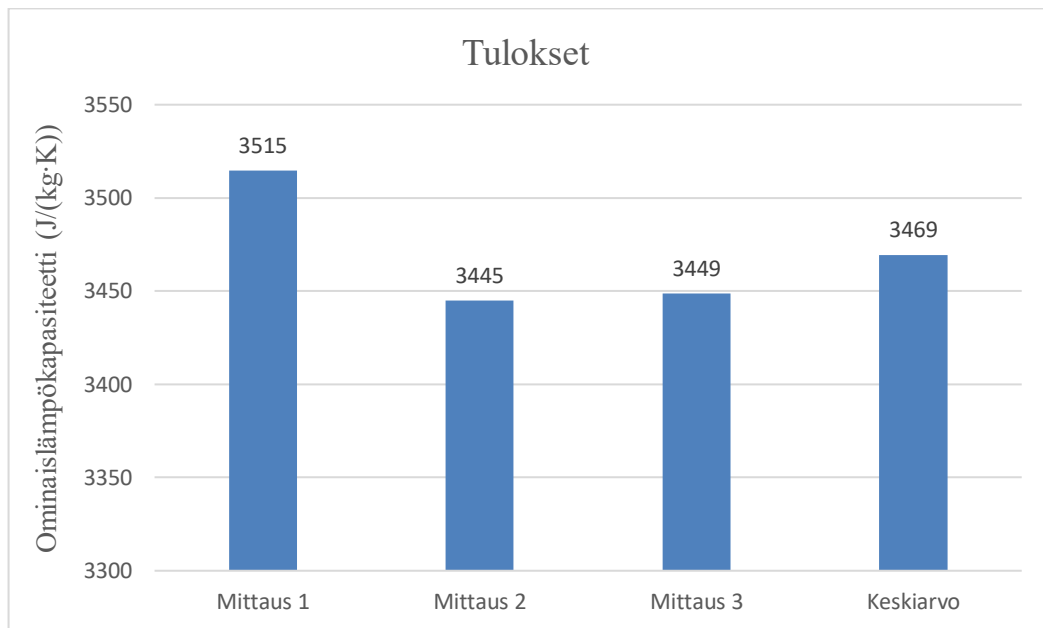
Asetetut lämpötilat (°C)	Keskilämpötila (°C) toteutunut	Ominaislämpökapasiteetti (J/(m <sup>3</sup> ·K))	Keskiarvo (J/(m <sup>3</sup> ·K))
5 – 15	10.01	72129	
15 – 25	20.02	74049	72417
25 – 35	30.02	72300	
35 – 45	40.02	71189	

**Taulukko 3.** Mittauksen 2 tulokset.

Asetetut lämpötilat (°C)	Keskilämpötila (°C) toteutunut	Ominaislämpökapasiteetti (J/(m <sup>3</sup> ·K))	Keskiarvo (J/(m <sup>3</sup> ·K))
5 – 15	10.01	71728	
15 – 25	20.02	74768	72677
25 – 35	30.02	72186	
35 – 45	40.02	72026	

**Taulukko 4.** Mittauksen 3 tulokset.

Kuvassa 3 näkyvät keskiarvotulokset kootusti sekä näiden keskiarvo. Tässä ominaislämpökapasiteetit on esitetty J/(kg·K)-yksikössä eli FOX304-lämpövirtalevylaitteen antamat tulokset on jaettu puhallusvillan tiheyksillä, jotka näkyvät taulukossa 1.



**Kuva 6.** Ominaislämpökapasiteettimittausten tulokset J/(kg·K)-yksikössä.

Näiden mittausten mukaan kyseisen puhallusvillan ominaislämpökapasiteetti on näillä tiheyksillä noin 3470 J/(kg·K). FOX304-lämpövirtalevylaitteen Gain level – taso on näissä mittauksissa ollut 2.

Käytetty lämpövirtalevyalaite vaikuttaa vakaalta mittalaitteelta, koska suuria eroavaisuuksia ei mittaustulosten välillä esiintynyt. Itse mittaustulos vaikuttaa kuitenkin liian suurelta, sillä standardista löytyvä arvo selluloosakuidulle irtotäytteenä on huomattavasti pienempi: 1600 J/(kg·K) [10]. Lisäksi paperille löytyi toisaalta arvo 1336 J/(kg·K) [11].



Tässä työssä olisi voitu mitata puhallusvillan ominaislämpökapasiteettia myös eri tiheyksillä, sekä esimerkiksi puukuitulevyn ominaislämpökapasiteettia, jotta oltaisiin nähty, poikkeavatko tulokset niilläkin yhtä paljon kirjallisuusarvoista.

## LÄHTEET

- [1] Hens, H., Building Physics – Heat, Air and Moisture, Verkkokirja, viitattu 1.4.2016, saatavissa: <http://lib.myilibrary.com/Open.aspx?id=123917>
- [2] Incropera, F., DeWitt, D., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 1985, 802 p.
- [3] RIL 255-1-2014 Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset, Manelius, E., Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2014, 500 s.
- [4] Young, H., Freedman, R., University physics, tenth edition, 2000, 1274 p.
- [5] Nave, R., 2016, Georgia State University, verkkosivusto, saatavissa: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/dulong.html#c1>
- [6] Kalorimetri, Verkkodokumentti Aalto-yliopiston verkkosivuilla, 2003, saatavissa: <http://viesti.physics.aalto.fi/pub/kurssit/Tfy-3.15xx/Teoria/tyo13.pdf>
- [7] Ruuska, T., Laastin ja betonin lämmönjohtavuuden ja ominaislämpökapasiteetin määrittäminen lämpövirtalevylaitteella, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere 2014, 70 s.
- [8] Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A., Käkelä, P., Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere 2005, 321 s.
- [9] Czichos, H., Saito, T., Smith, L., Handbook of Metrology and Testing, 2011, ISBN 978-3-642-16640-2 (Print), 978-3-642-16641-9 (Online)
- [10] Rakennustuoteteollisuus RTT ry, Standardi SFS-EN ISO 10456 + AC Rakennusaineet ja -tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Taulukoidut suunnitteluarvot ja menetelmät ilmoitetun lämpöteknisen arvon ja lämpöteknisen suunnitteluarvon määrittämiseksi, Suomen standardisoimisliitto SFS 2008
- [11] Engineering ToolBox, 2003, Specific Heat of some common Substances, verkkosivusto, viitattu 2.3.2020, saatavissa: [https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d\\_391.html](https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html).