

Lämpövirtalevyt

Lämpövuon mittaaminen ja sovelluskohteet

Mika Multaharju

Opinnäytetyö

Maaliskuu 2017

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Multaharju, Mika	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Maaliskuu 2017
	Sivumäärä 43	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Lämpövirtalevyt Lämpövuon mittaaminen ja sovelluskohteet		
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) Teppo Flyktman, Jussi Korpinen		
Toimeksiantaja(t) Jyväskylän ammattikorkeakoulu		
Tiivistelmä <p>Jyväskylän ammattikorkeakoululla on kaksi lämpövirtalevyä, joiden toimintaa ei ollut tutkittu laaja-alaisesti aikaisemmin tarkemmin. Opinnäytetyön tavoitteena oli tutustua lämpövirtalevyjen rakenteeseen ja sovelluskohteisiin ja arvioida lämpövirtalevyillä mittaamisen luotettavuutta itse suunnitellun testilaitteiston avulla. Testilaitteisto suunniteltiin käytössä olleiden resurssien avulla niin, että mittaustulokset olisivat mahdollisimman luotettavia ja ulkoisten häiriöiden vaikutus olisi mahdollisimman pieni.</p> <p>Lämpövirtalevyjen toimintaan liittyen tutkittiin lämmön siirtymiseen liittyvää teoriaa, mittausjärjestelyjä ja erilaisia sovelluskohteita, minkä jälkeen tutkittiin lämpövirtalevyillä mittaamista yksiulotteisen lämmön siirtymisen tapauksessa testilaitteistolla ja raportoitiiin tuloksista. Tuloksia verrattiin myös tietokoneella tehtyyn lämpösimulaatioon.</p> <p>Tutkimuksessa löydettiin erilaisia lämpövirtalevyymittausten sovelluskohteita, kuten esimerkiksi lämmöneristävyuden määrittäminen, jotka on voitu aikaisemmin toteuttaa muilla mittausten menetelmillä. Testilaitteisto toimi suunnitellulla tavalla ja mittaustulokset osoittautuivat odotetun suuruisiksi. Mittausten perusteella havaittiin tyypillisissä mittaustilanteissa epävarmuustekijöitä, kuten ympäristön lämpötilan muutokset ja lämpösäteily, jotka voivat vaikuttaa mittauksen luotettavuuteen. Simulaatiomallinnuksella voitiin kuitenkin osoittaa, että testilaitteistolla saadut tulokset ovat lähellä simuloituja tuloksia, ja huomioimalla epävarmuustekijät paremmin voidaan mittaustulosten luotettavuutta parantaa.</p> <p>Lämpövirtalevyjen toiminnasta saatiin tutkimustuloksia, joiden avulla pystytään arvioimaan lämpövirtalevyjen käytännöllisyyttä ja luotettavuutta erilaisissa sovelluskohteissa.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Lämpövirtalevy, lämpövuon, lämmön siirtyminen, lämpömallinnus, mittauslaite, anturi		
Muut tiedot		

Author(s) Multaharju, Mika	Type of publication Bachelor's thesis	Date March 2017 Language of publication: Finnish
	Number of pages 43	Permission for web publication: x
Title of publication Heat Flux Sensors Measuring Heat Flux and Applications		
Degree programme Degree Programme in Energy Technology		
Supervisor(s) Flyktman, Teppo Korpinen, Jussi		
Assigned by JAMK University of Applied Sciences		
Abstract <p>JAMK University of Applied Sciences had two heat flux sensors, whose functions had not been studied extensively before. The objectives of the thesis were to explore the structure of the heat flux sensors and their applications, and to evaluate the reliability of measuring with heat flux sensors using a self-planned test setup. Test setup was planned with available resources so that the measurement results would be as reliable as possible and the effect of measurement errors would be minimized.</p> <p>Theory behind heat transfer, different measurement systems and applications related to the functions of heat flux sensor was examined, after which the test setup was used to study the results of heat flux measurement for one dimensional heating system and to report and analyze the results. The results were also compared to a computer-made thermal simulation.</p> <p>Different kinds of applications were found, such as defining the thermal insulation of the object, which has earlier been done with different kind of measurement systems. The test setup worked as planned and the measurement results were as expected. Based on the measurements in typical arrangement different kind of uncertainty factors were discovered, such as changes in the surrounding temperature or thermal radiation, which could have an effect on the reliability of the results. Even so, thermal simulation showed that the measured results were close to the simulated results and by considering uncertainty factors more closely the reliability of the measurements can be improved.</p> <p>The results of the study on the functionality of the heat flux sensors could help evaluate the practicality and the reliability of heat flux sensors in different applications.</p>		
Keywords/tags (subjects) Heat flux sensor, heat flux, heat transfer, heat simulation, measurement device, sensor		
Miscellaneous		

Sisältö

1	Johdanto.....	4
2	Lämpövirtalevyillä mittaamiseen liittyvää teoriaa.....	4
	2.1 Lämmön siirtyminen.....	5
	2.2 Lämpövirtalevyn mittaustekniikkaa	8
3	Lämpövirtalevy	9
	3.1 Lämpövirtalevyn toiminta	9
	3.2 Lämpövirtalevyn rakenne.....	10
	3.3 Lämpövuon laskeminen	12
	3.4 Luentatavat.....	13
	3.5 Mittauksessa huomioitavat tekijät.....	13
	3.6 Lämpövirtalevyjen valmistajia ja niihin liittyviä tuotteita	13
	3.7 Sovelluskohteita	14
4	Lämpövuon mittaus huoneen seinästä.....	18
5	Lämpövuon mittaus testiympäristössä	23
	5.1 Testilaitteisto.....	23
	5.2 Laitteiston lämmityskomponentit	26
	5.3 Lämpövirtalevyjen kytkennät	28
	5.4 Mittaus	32
	5.5 Tulosten analysointi	34
	5.6 SolidWORKS –mallinnus	36
6	Pohdinta	40
	Lähteet.....	42

Kuviot

	Kuvio 1. Mittausjärjestelmän päätoiminnot	8
	Kuvio 2. Lämpövirtalevy mittaamassa seinän läpi kulkevaa lämpövuota.....	9
	Kuvio 3. Epäsuora lämpövuon mittaus lämpötilaeron avulla	10

Kuvio 4. Suora lämpövuon mittaus lämpövirtalevyn avulla	10
Kuvio 5. Lämpövirtalevyn rakenne.....	11
Kuvio 6. Lämpövirtalevyn pinta.....	12
Kuvio 7. GLASSX-yrityksen tekemän lämpövuomittauksen arvot verrattuna simulaatiolla laskettuihin arvoihin.....	16
Kuvio 8. Lämpövuon mittaaminen lämpövirtalevyllä ihmisen iholta	17
Kuvio 9. Massavirran mittaaminen lämpövirtalevyn avulla.....	18
Kuvio 10. Mittalaitteisto lämpövuon mittaamiseen seinästä	19
Kuvio 11. Mittalaitteiston kytkentäkaavio	19
Kuvio 12. LabVIEW-sovelluksen ohjelmistorakenne	20
Kuvio 13. LabVIEW-sovelluksen käyttöliittymä.....	21
Kuvio 14. Kuvaaja kahden vuorokauden mittaustuloksista aika - lämpövuotoordinaatistossa	22
Kuvio 15. Huoneen ja ulkoilman lämpötilatiedot mittauksen ajalta	23
Kuvio 16. Testilaitteisto lämpövirtalevyjen luotettavuuden arvioimiseen.....	24
Kuvio 17. Mittalaitteiston osien mitat	25
Kuvio 18. Mittalaitteisto ilman alumiinifoliota ympärillä	26
Kuvio 19. Tehovastusten virtapiiri.....	27
Kuvio 20. Tehovastukset mittauksen jälkeen vihon sivua vasten.....	28
Kuvio 21. Lämpövirtalevyjen kytkentä testilaitteistossa.....	29
Kuvio 22. PR-2261 vahvistin liitettynä stereojohdimmalla HOBO-tiedonkeruulaitteeseen.....	30
Kuvio 23. HOBOWare -luentaohjelmiston asetukset mittaustuloksen muuttamiseksi oikeaksi.....	31
Kuvio 24. Kuvaaja testilaitteiston tuloksista aika - lämpövuotoordinaatistossa	34
Kuvio 25. Lämpötilan muutos huoneessa mittauksen aikana	35
Kuvio 26. Mittalaitteiston läpinäkyvä mallikuva	37
Kuvio 27. Mallinnus mittalaitteiston lämmityksen aiheuttamasta lämpövuostalaitteiston pinnalla.....	38

Taulukot

Taulukko 1. Erilaisia lämpövirtalevyjen valmistajia ja malleja	14
--	----

Taulukko 2. Testilaitteiston mittalaitteiston kytkennät	20
Taulukko 3. Lämpövirtalevyjen muuntokertoimet	29
Taulukko 4. Mittalaitteiston kytkennät.....	29
Taulukko 5. Vahvistimen asetusarvot	30
Taulukko 6. Lämpövuon arvoja sen jälkeen, kun lämpövuon kasvu on loppunut	35
Taulukko 7. Lämpösimulaatiota varten materiaalien termiset ominaisuudet	36
Taulukko 8. Simulaation laskemia lämpövuon arvoja sensorin pinta-alalla eri konvektiokertoimen arvoilla	39

1 Johdanto

Nykyaikana teollisissa yhteiskunnissa on alettu korostamaan energiatehokkuuden tärkeyttä, jolloin lämmönmittauslaitteiden merkitys kasvaa: erilaisissa teollisuuden ja kiinteistöjen sovelluskohteissa halutaan saada mitattua siirtyvää energiaa ja lämpötiloja tarkasti ja luotettavasti, jotta energiankulutus saadaan optimoitua ja mittauslaitteisiin kytketyt ohjausjärjestelmät toimivat halutulla tavalla. Lämpövuota mittaavat lämpövirtalevyt perustuvat vanhaan tekniikkaan, mutta ovat yllättävän vähäisessä käytössä sovelluskohteissa, joissa niistä olisi paljon etua verrattuna nykyisiin mittalaitteistoihin.

Tein Jyväskylän ammattikorkeakoululla olleilla kahdella lämpövirtalevyllä syksyllä 2015 testimittauksia. Koska lämpövirtalevyistä löytyi aikaisempia tutkimustuloksia hyvin vähän, niin ehdotin lämpövirtalevyihin liittyvää opinnäytetyöaihetta Jyväskylän ammattikorkeakoululle. Tavoitteena oli tutustua lämpövirtalevyillä mittaamiseen ja niiden sovelluskohteisiin, jotta niiden toiminnasta saataisiin enemmän tietoa, joka voisi helpottaa niiden käyttöönottoa yleisemmin mittauksiin.

Tässä opinnäytetyössäni kuvaan lämpövirtalevyjen rakennetta, toimintaa ja sovelluskohteita ja tekemääni testilaitteistoa, jolla arvioin lämpövirtalevyn mittausten luotettavuutta ja mittalaitteiston käytännöllisyyttä. Mittaukset toteutin Jyväskylän ammattikorkeakoulun rakennusautomaatiolaboratoriossa.

Rajasin opinnäytetyöni käsittelemään lämpövirtalevyillä mittaamista käytännön ja lämmön siirtymisen teorian näkökulmasta. Mittalaitteiston mittausteknisestä puolesta kerron käyttämistäni laitteistoista ja kytkennöistä. Lisäksi näytän, kuinka mallinushjelmalla voidaan havainnollistaa lämmön siirtymistä kappaleessa.

2 Lämpövirtalevyillä mittaamiseen liittyvää teoriaa

Lämpövirtalevyjen toiminnan ymmärtämiseen on oleellista ymmärtää lämmön siirtymiseen liittyvän teorian perusteet. Lämpöä voi siirtyä kolmella eri tavalla, eli johtamalla, konvektiolla tai säteilyllä, kokonaissysteemin kokonaisenergiämäärän säilyessä

samana. Lämpövirtalevyt itsessään perustuvat jo tunnettuun tekniikkaan, eikä lämpövirtalevyillä mittaaminen eroa muista yleisistä mittausjärjestelmistä, joten lämpövirtalevyjen käyttöönotto on yksinkertaista.

2.1 Lämmön siirtyminen

Energian säilyminen

Termodynamiikan ensimmäisen lain mukaan systeemin kokonaisenergian muutos on sama kuin systeemin sisään tulevan energian ja systeemistä poistuvan energian erotus kaavan 1 mukaisesti. (Çengel 2004, 11.)

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system} \quad (1)$$

Systeemiin voi tulla tai siitä voi poistua energiaa lämmön, työn tai massan siirron avulla. Systeemin tila voi olla tasainen tai epätasainen, jos jokin ominaisuus kuten pinnan lämpötila muuttuu ajan kuluessa. Mikäli systeemin tila ei muutu, niin kokonaisenergia ei muutu. (Çengel 2004, 11.)

Aineen pinnan läpi siirtyvä energia säilyy kaavan 2 mukaisesti

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}. \quad (2)$$

Lämpöä voi siirtyä johtumisen, konvektion tai säteilyn avulla. Siirtyessään pinnan läpi lämpöenergia voi muuttaa muotoaan, mutta säilyy silti yhtä suurena. (Çengel 2004, 13.)

Johtuminen

Johtumisella eli konduktiolla tarkoitetaan lämpöenergian siirtymistä aineessa suurempienergisistä hiukkasista ympärillä oleviin pienempienergisiiin hiukkasiin. Johtumista voi tapahtua kiinteissä aineissa, nesteissä ja kaasuissa. Johtumisen määrä riippuu kappaleen muodosta, paksuudesta, materiaalista ja kappaleen sisäisestä lämpötilaerosta. (Çengel 2004, 17-18.) Johtumisen lämpöteho saadaan kaavalla 3,

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

jossa k on materiaalin lämmönjohtokerroin, A on lämmön siirtymissuuntaan kohtisuoran tason ala ja $\frac{dT}{dx}$ lämpötilan derivaatta paikan suhteen. Lämmön siirtyessä ulospäin lämpötila pienenee, jolloin kaavan miinusmerkki kumoutuu pois $\frac{dT}{dx}$:n ollessa

negatiivinen. Kun materiaalin lämmönjohtokerroin on suuri niin se johtaa hyvin lämpöä ja kun pieni niin se on hyvä eriste.

Materiaalin lämmönjohtokertoimen pystyy kokeellisesti määrittämään mittaamalla lämpötilaeron lämmitettävän ja poistuvan lämmön puolen välillä, ja sijoittamalla sen lisäksi yhtälöön 1 kappaleen pinta-alan ja paksuuden. (Çengel 2004, 20.) Materiaalin lämmönjohtokerroin on riippuvainen lämpötilasta, mutta laskettaessa käytetään yleensä lämpötilojen keskiarvon lämmönjohtokerrointa. (Çengel 2004, 23.)

Konvektio

Konvektio on lämpöenergian siirtymistapa kiinteän pinnan ja viereisen liikkeessä olevan nesteen tai kaasun välillä. Aluksi lämpö siirtyy johtumisella pinnan viereiseen ilmakerrokseen, josta se siirtyy konvektiolla pois. Käytännössä esimerkiksi ihmisen ihon lähetyvillä oleva ilma lämpenee, jolloin syntyy luonnollista konvektiota ja ilma siirtää ihmisestä lämpöenergiaa pois. Konvektion siirtämä lämpöteho saadaan kaavalla 4.

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty), \quad (4)$$

jossa A_s on pinnan ala, T_∞ on ympäristön lämpötila, T_s on pinnan lämpötila ja h on materiaalin konvektiokerroin, joka ei ole nesteen tai kaasun ominaisuus vaan kokeellisesti määritetty parametri, jonka arvo riippuu muuttujista, kuten pinnan muodosta ja nesteen ominaisuuksista. (Çengel 2004, 25-26.)

Säteily

Säteily eli radiaatio on kappaleesta elektromagneettisena säteilynä poistuva energia, ja se johtuu molekyyliä muutosista kappaleessa. Säteily ei vaadi väliainetta, kuten johtuminen ja konvektio. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nol-lapisteen yläpuolella, lähettävät lämpösäteilyä. Lämpösäteily kulkee läpinäkyvien materiaalien läpi, mutta on pintailmiö läpinäkymättömissä materiaaleissa. Korkein mahdollinen lämpösäteily määrä, ns. mustan kappaleen säteilemä teho, kappaleelle saadaan kaavalla 5.

$$\dot{Q}_{emit,max} = \sigma A_s T_s^4 \quad (5)$$

jossa A_s on pinnan ala, T_s pinnan lämpötila ja Stefan-Boltzmanin vakio $\sigma = 5,67 \cdot$

$10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$. Todellisten pintojen lämpösäteily määrä on kuitenkin mustan kappaleen

säteilyä pienempi. Se saadaan kertomalla mustan kappaleen säteilyteho kappaleen materiaalin emissiivisyyskertoimella ε kaavan 6 mukaisesti

$$\dot{Q}_{emit} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (6)$$

Lisäksi kappaleen pinta absorboi ulkopuolisesta lämpösäteilystä tietyn osan, jonka absorptiokerroin α on yleisesti sama kuin emissiivisyyskerroin ε (ks. kaava 7).

$$\dot{Q}_{absorbed} = \alpha \dot{Q}_{incident} \quad (7)$$

(Çengel 2004, 28-29.)

Lämmön siirtymistapojen samanaikaisuus

Kaikki kolme lämmön siirtymismenetelmää eivät voi olla toiminnassa samanaikaisesti. Kiinteän läpinäkyvämmän kappaleen läpi lämpöenergia siirtyy vain johtumalla, ja läpinäkyvän läpi johtumalla ja säteilemällä. Lämmön siirtymistä tapahtuu pinnalla säteilyä ja/tai konvektiona. Paikallaan pysyvässä nesteessä lämpö siirtyy johtumalla ja mahdollisesti säteilemällä, mutta liikkeessä olevassa nesteessä johtumisen sijaan konvektiolla. Kaasuilla lämpösäteilyn absorboituminen on käytännössä yleensä merkityksettömän pientä. (Çengel 2004, 30.)

Lämmön siirtymisen tila

Lämmön siirtyminen voi olla tasaista tai epätasaista. Tasaisella lämmön siirtymisellä tarkoitetaan, että missä tahansa pisteessä väliaineessa lämpöteho ja lämpötila eivät muutu ajan kuluessa, kun taas epätasaisessa lämmön siirtymisessä ne muuttuvat. Tasaisessakin tilassa lämpötila ja teho voivat kuitenkin riippua paikasta. Suurin osa käytännön lämmitys- tai jäähdystilanteista ovat luonteeltaan epätasaisia johtuen muuttuvista tekijöistä, kuten auringon säteilytehosta tai tuulenopeudesta, mutta niitä voidaan yleistää tasaisiksi tiloiksi esimerkiksi määritettäessä lämmitystehoa huonimmissa tai parhaimmissa olosuhteissa. (Çengel 2004, 63-64.)

Lämpövuoto

Lämpövuolla tarkoitetaan lämmön siirtymisnopeutta pinnan alaa kohti, joka on kohtisuora lämmön siirtymissuuntaa vastaan, (ks. kaava 8)

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (8)$$

jossa \dot{q} on lämpövuon arvo, \dot{Q} siirtyvä lämpöteho ja A lämmön siirtymisen pinta-ala. Lämpövuon arvo voi muuttua ajan kuluessa ja voi riippua myös sijainnista pinnalla. (Çengel 2004, 11.)

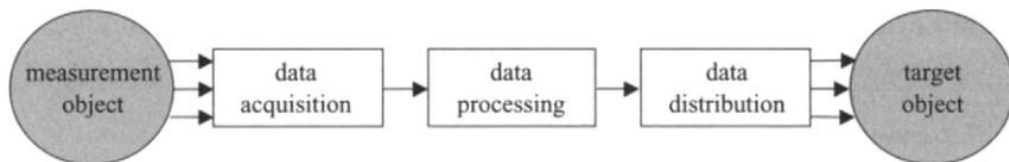
2.2 Lämpövirtalevyn mittaustekniikkaa

Seebeck-ilmio

Virolainen fyysikko Thomas Johann Seebeck (1770-1831) havaitsi tutkimuksissaan, että yhdistämällä kaksi erilaista metallipalasta toisiinsa tapahtuu yhdistelmän ympärillä muutoksia magneettikentässä, kun lämpötilaa muutetaan. Samalla syntyy jännite sähköä johtavien materiaalien välille, kun materiaalien välillä on lämpötilaero. Ilmiötä hyödynnetään esimerkiksi lämpösähköpareissa, jotka toimivat lämpötila-antureina. (Fraden 2010, 106-108.)

Mittausjärjestelmä

Mittausjärjestelmässä siirretään tietoa mitatusta kohteesta haluttuun kohteeseen. Mittausjärjestelmän voi jaotella kolmeen osaan: tiedonkeruuseen (data acquisition), tiedonkäsittelyyn (data processing) ja tiedonvälitykseen (data distribution) (ks. kuvio 1).



Kuvio 1. Mittausjärjestelmän päätoiminnot (van der Heijden, Korsten, Olthius & Regtien 2004, 8)

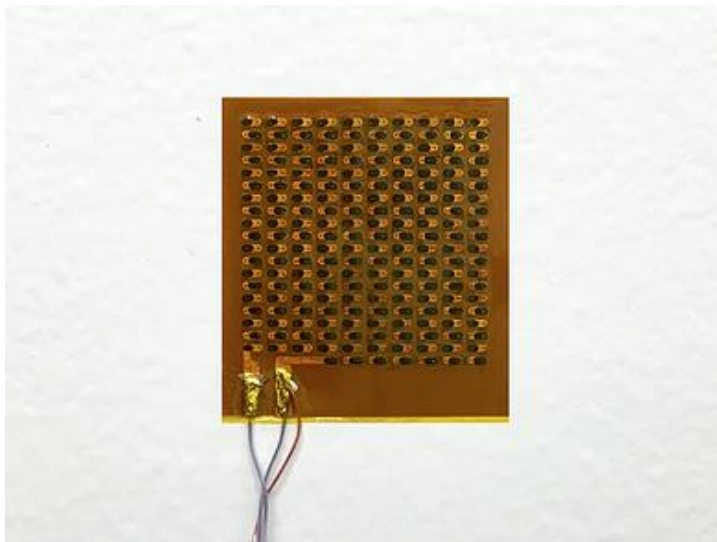
Tiedonkeruussa mitattu fyysikaalinen ominaisuus muutetaan sähköiseksi signaaliksi anturin avulla. Mittausjärjestelmässä sisääntulokanavia voi olla useampia, mikä mahdollistaa useampien parametrien samanaikaisen mittaamisen. Tiedonkäsittelyssä mittausdataa käsitellään vahvistamalla, suodattamalla tai muulla tavoin muuttamalla signaalia haluttuun muotoon. Koska prosessorit pystyvät käsittelemään vain digitaalista signaalia, niin analoginen signaali täytyy muuttaa digitaalseksi. Tiedonkäsittely

toteutetaan mikroprosessorilla, mikrokontrollerilla tai tietokoneella. Tiedonvälityksessä käsitelty data siirretään haluttuun kohteeseen. Kohteena voi olla luentanäyttö, tiedonkeruulaite tai ohjauslaite. (van der Heijden ym. 2004, 8-9)

3 Lämpövirtalevy

3.1 Lämpövirtalevyn toiminta

Lämpövirtalevy on levymainen sensori, jolla mitataan rakenteeseen siirtyvän tai rakenteesta poistuvan lämpövirran lämpövuoto.

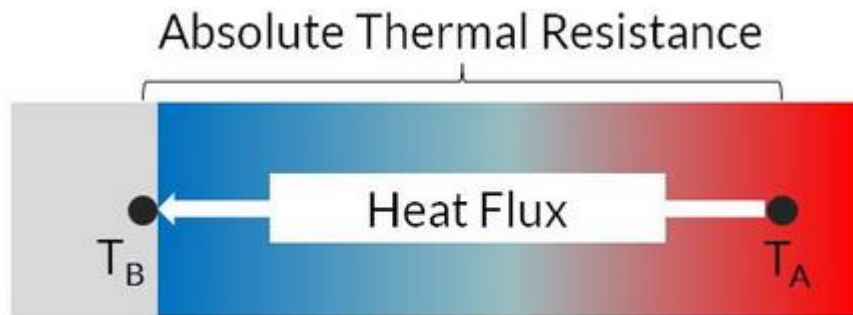


Kuvio 2. Lämpövirtalevy mittaamassa seinän läpi kulkevaa lämpövuota (PHFS-01 Heat Flux... n.d.)

Kuviossa 2 mitataan lämpövirtalevyllä seinän läpi kulkevaa lämpövuota. Lämpövirtalevyn läpi kulkeva lämpöteho on yhtä suuri kuin seinärakenteen läpi kulkeva lämpöteho. Kappaleen läpi kulkevaa lämpövuota on aikaisemmin mitattu asettamalla kuvion 3 mukaisesti kaksi lämpömittaria mittauskohteeseen, jolloin tietämällä kappaleen lämpövuoto voidaan laskea siirtyvän lämpötehon kautta sijoittamalla kaavaan 9 lämpötilaero ΔT ja kokonaislämpövastus R_{th} .

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (9)$$

Mittaustavassa haastavaa on selvittää lämpövastuksen tarkka arvo, joka riippuu kappaleen koosta, muodosta, materiaaliominaisuuksista ja mittauspisteiden välisestä etäisyydestä. Lisäksi lämpötilasensorien tulisi olla hyvin tarkkoja, jolloin mittalaitteisto tulisi olemaan hyvin kallis. Lämpövirtalevyn avulla lämpövuon arvo saadaan selville helpommin ja edullisemmin kuin perinteisellä menetelmällä (ks. kuvio 4). (Heat Flux Measurement... n.d.)



Kuvio 3. Epäsuora lämpövuon mittaus lämpötilaeron avulla (Heat Flux Measurement... n.d.)

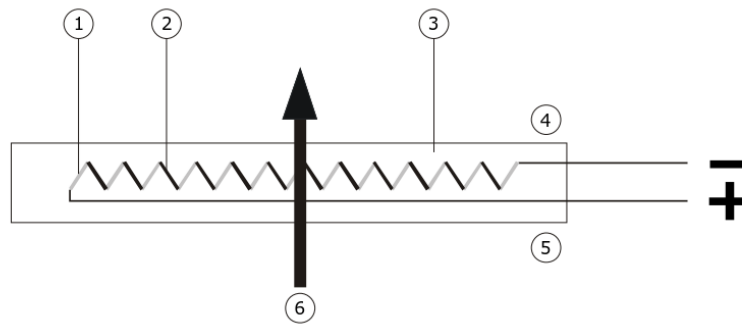


Kuvio 4. Suora lämpövuon mittaus lämpövirtalevyn avulla (Heat Flux Measurement... n.d.)

3.2 Lämpövirtalevyn rakenne

Kuviossa 5 on esitetty lämpövirtalevyn rakenne. Lämpövirtalevy koostuu rungosta ja sensorista. Hukseflux HFP-01 -lämpövirtalevyssä rungon (3) materiaalina on käytetty keraami-muovikomposiittia, koska tällöin runko on kestävä ja lämmönvastus on pieni, jolloin lämpö johtuu hyvin lämpövirtalevyn läpi. Sensori on rungon sisällä oleva lämpösähköpariketju, joka koostuu useista sarjaan kytketyistä lämpösähköpareista. Lämpösähköparissa kahden eri materiaalin välille syntyy lämpötilaeron vaikutuksesta jännite (Seebeck-ilmiö). Lämpövirtalevyn sensorissa eri metalliseoksista koostuvat

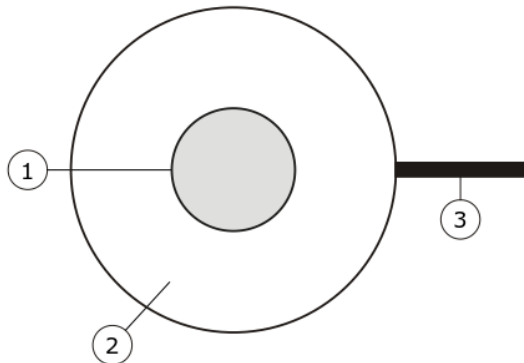
lämpösähköparin johtimet (1 ja 2) sijaitsevat vastakkaisilla pinnoilla (4 ja 5). Sensoriin syntyy jännite, kun pintojen välillä on sensorin läpi kulkevan lämpövirran (6) aiheuttama lämpötilaero. Kun lämpösähköparit asetetaan sarjaan, kokonaisjännite on yksittäisten lämpösähköparien muodostamien jännitteiden summa. (Hukseflux n.d., 9.)



Kuvio 5. Lämpövirtalevyn rakenne (User Manual HFP01... n.d., 9)

Kuviossa 6 näkyy lämpövirtalevyn rakenne sensorin pintaan päin katsottuna. HFP-01 -mallissa termoparit on asetettu lämpövirtalevyn keskiosaan (1) pyöreään, hyvin lämpöä johtavan metallilevyn taakse, jolloin saadaan metallilevyn pinta-alan kattavan alueen keskimääräinen lämpötilaero selville. Ulommaisessa komposiittirakenteessa (2) ei ole lainkaan termopareja. Näin saadaan lämpö jakautumaan laajemmalle pinta-alalle, jolloin lämpötilaero sensorin pintojen välillä ei muutu niin suureksi, että mitaustarkkuus huononee. Koska lämpövirtalevyn lämpövastus on pieni, lämmön siirtyminen lämpövirtalevyn sisällä muuttuu epätasaisesta tilasta tasaiseksi nopeasti. Lämpö siirtyy lämpövirtalevystä mitattavaan rakenteeseen tai toisin päin, mitattavasta rakenteesta lämpövirtalevyyn, johtumisen avulla. Lämpövirtalevyn ja mittaustarkkuuden pinnan väliin tarvitaan hyvin lämpöä johtavaa väliainetta peittämään pintojen väliin jäävät pienet ilmataskut, esimerkiksi lämpötahnaa, silikoniliimaa tai kaksipuolista teippiä. Lämmön virtauksen suunnan muuttuminen muuttaa syntyvän jännitteen etumerkkiä. HFP-01 -mallissa sensorin metallipinta on peitetty lämpövirtalevyn toiselta puolelta vähentämään konvektion ja säteilyn vaikutusta tämän puolen ollessa ulommaisena, mutta mitaustarkkuuden kannalta ei ole merkitystä kummalta puolelta lämpö virtaa, koska molemmat sensorin pinnat ovat toisiaan vastaavia. Lämpövirtalevyn johtimesta (3) voidaan syntynyt jännite mitata suoraan yleismittarilla,

lukea jännite luentaohjelmistolla tai kirjata jännitteet halutulla aikavälillä tiedonkeruulaitteeseen. (User Manual HFP01... n.d., 11-14.)



Kuvio 6. Lämpövirtalevyn pinta (User Manual HFP01... n.d., 14)

3.3 Lämpövuon laskeminen

Kun lämpövirtalevystä muodostuvan jännitteen avulla saadaan selville lämpötilaero pintojen välillä, saadaan laskettua lämpövirtalevyn sisäinen lämpötilan muutosnopeus lämpövirtalevyn poikkileikkauksen matkalla siirtyvän lämmön virtaussuunnan suuntaisesti. Kun tiedetään lämpövirtalevyn materiaalin lämmönjohtavuus, voidaan laskea lämpövirtalevyn läpi johtumisen avulla siirtyvä lämpöteho. Johtumisen kaavasta voidaan johtaa lämpövuon arvo. Koska lämpö siirtyy johtumisen avulla mitattavan kohteen ja lämpövirtalevyn välillä, lämpövirtalevyn läpi kulkeva lämpövuon on yhtä suuri kuin mitattavan kohteen lämpövuon, mikäli lämpövirtalevyn ulkopintaan ei kohdistu ylimääräistä paikallista lämpövirtausta esimerkiksi lähellä sijaitsevasta lämpöpöä tuottavasta laitteesta tai ilmavirtaa tuulettimesta.

Hukseflux HFP-01 -mallissa on jokaiselle sensorille annettu valmiiksi valmistajan testiolosuhteissa määritetty muuntokerroin S , jolla saadaan suoraan mitattu jännite U muutettua lämpövuon arvoksi kaavalla 10. (User Manual HFP01... n.d., 27.)

$$\dot{q} = \frac{U}{S}. \quad (10)$$

Kytkemällä lämpövirtalevyt sarjaan signaali vahvistuu (User Manual HFP01... n.d., 6), jolloin lämpövuon saadaan laskettua kaavalla 11.

$$\dot{q} = \frac{U}{S_1 + S_2}, \quad (11)$$

jossa S_1 ja S_2 ovat kunkin lämpövirtalevyn muuntokertoimet (User Manual HFP01... n.d., 27).

3.4 Luentatavat

Jännite voidaan lukea suoraan yleismittarilla, tai muuttaa tiedonkeruulaitteen luenta-ohjelmistossa suoraan lämpövuon arvoksi. Esimerkiksi Hukseflux HFP-01 -mallissa rakennusten lämpövuon mittauksissa lämpövirtalevyn tuottaman jännitteen arvo on tyypillisesti -10 mV – 70 mV, joten joihinkin tiedonkeruulaitteisiin joudutaan vahvistamaan jännitettä viestimuntimella, jotta lukema vastaisi tiedonkeruulaitteen sisään-tulon jännite- tai virta-alueita. Kokeilemistani tiedonkeruulaitteista LabVIEW-tiedonkeruulaitteen luenta-alue oli 0-10 VDC ja HOBO U12 Temp/RH/2 External Data Logger -tiedonkeruulaitteen 0-2,5 VDC. Vahvistimia ja tiedonkeruulaitteita valitessa oleellista on, että mitta-alueet ovat oikein ja mittatarkkuus sekä halutut ominaisuudet ovat mittausjärjestelyihin sopivat.

3.5 Mittauksessa huomioitavat tekijät

Mitatessani talvella lämpövuon arvoja luokkahuoneen seinältä huomasin, että arvot muuttuivat päivän aikana todella paljon. Syynä on, että lämmönsiirto tapahtuu hyvin epätasaisessa systeemissä. Luokkahuoneen sisäpuolella lämpöarvoihin vaikuttavat esimerkiksi rakennuksen sisällä olevien ihmisten lukumäärä ja käynnissä olevat laitteet, joista siirtyy lämpöä seinärakenteisiin, sekä lämmitysjärjestelmä ja ilmastointi. Seinän ulkopuolella taas vaikuttavat esimerkiksi tuulen voimakkuus, tuulen suunta ja auringon säteily.

3.6 Lämpövirtalevyjen valmistajia ja niihin liittyviä tuotteita

Taulukkoon 1 on listattu joitain lämpövirtalevyjen valmistajia ja niiden tarjoamia erilaisia lämpövuon mittaamiseen tarkoitettuja laitteita. Osa valmistajista myy myös signaalinvahvistimia ja luentalaitteita. Niiden ei kuitenkaan tarvitse olla mittalaitteissa samalta valmistajalta kuin lämpövirtalevy, vaan oleellista on, että mittausalue on oikea ja mittaustarkkuus, mittausalueet ja muut laitteistolta vaaditut ominaisuudet ovat käyttötarkoitukseen sopivia.

Taulukko 1. Erilaisia lämpövirtalevyjen valmistajia ja malleja

Hukseflux	
HFP01	Yleinen lämpövirtalevy
HFP01SC	Itsestään kalibroituva lämpövirtalevy
HFP03	Lämpövirtalevy suurella herkkyydellä
SBG01	Vesijäähdytetty lämpövuosensori korkeisiin lämpövuomittauksiin
NF01	Neulamainen lämpövuosensori
NF02	Pienempi versio NF01:sta
HF01	Lämpövirtalevy korkeisiin lämpötiloihin
HF02	Säteilevän lämpövuon sensori hälyttämään leimahduksista
HF03-LI19	Kannettava lämpövirtalevy lukijayksiköllä
HF05	Lämpövirtalevy eristetyllä ruostumattomasta teräksestä valmistetulla rungolla teollisuuskäyttöön
RHF SERIES	Onton lieriön muotoinen lämpövirtalevy putkistoihin
BS01	Vedenkestävä vyön mallinen lämpövuon mittaussensori mittauskohteisiin, joissa korkea hydrostaattinen paine
greenTEG	
gSKIN® -sarja	XM (4,4 mm x 4,4 mm), XP (10 mm x 10 mm), XI (18 mm x 18 mm) ja XO (30 mm x 30 mm) ohuet lämpövirtalevyt erilaisilla herkkyysillä
EKO INSTRUMENTS	
MF-180	Pienikokoinen lämpövirtalevy suurella herkkyydellä
MF-190	Ohut lämpövirtalevy laajalla sensorin mittausalueella (310 mm x 310 mm)
MF-200	Neliön muotoinen ja ohut lämpövirtalevy
FluxTeq	
PHFS-01	Halpa lämpövirtalevy
PHFS-09e	Halpa lämpövirtalevy laajalla sensorin mittausalueella (88 mm x 95 mm)
HTHFS-01	Korkeita lämpötiloja kestävä lämpövirtalevy

3.7 Sovelluskohteita

Termisissä systeemeissä on tärkeää tietää, kuinka lämpövirta vaikuttaa systeemiin tai kuinka paljon lämpöä virtaa pois. Monissa tapauksissa lämpötila-anturit ovat riittävän tarkka väline lämpövirran selvittämiseksi, mutta jos halutaan tarkastella syvemmin termisiä prosesseja lämpövirtalevyn avulla voidaan saada enemmän tietoa lämpövirtauksista (Heat Flux Measurement... n.d.). Seuraavaksi on mainittu lämpövirtalevyille

muutamia sovelluskohteita, joiden mittaukset on toteutettu aiemmin muilla menetelmillä, kuten pelkästään lämpötila-antureilla.

Ohutkalvon kuivatuksen optimointi

Karlsruhen teknologiainstituutin tutkijat käyttivät greenTEG:in valmistamia lämpövirtalevyjä optimoimaan ohutkalvojen kuivausprosessia. Laboratorio-olosuhteissa selvitettiin kuivaimen lämmönsiirtokertoimet mittamaalla lämpövuon arvot jokaisen ilma-suuttimen alta lämpövirtalevyllä. Testissä saatujen lämmönsiirtokertoimien jakautuman avulla saatiin pintakerrokselle määritettyä suurin pituus, joka voidaan kuivattaa koko pituudelta kuivatuslaitteistossa. (Measure local heat... n.d.)

Komposiitin lämmöneristävyys

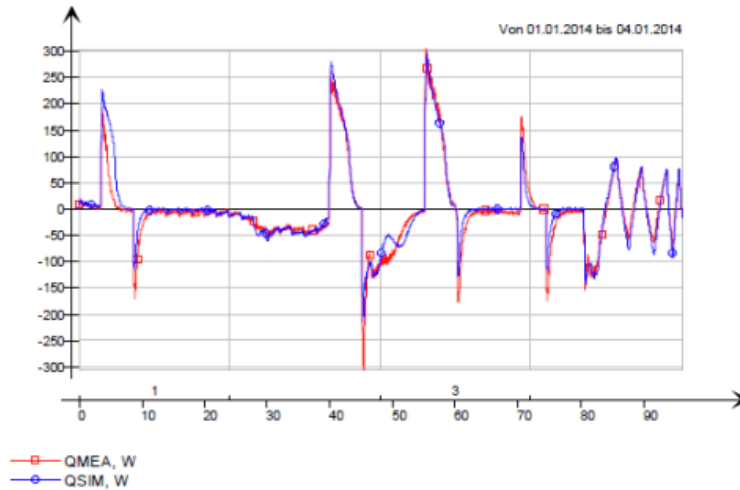
Waikaton yliopistossa tutkittiin lämmöneristävyttä komposiitista, johon on lisätty kanan sulkia. Lämpövuon mittaus toteutettiin ASTM C518 – 04 -standardia noudattaen asettamalla lämpövirtalevy lämmitettävän alumiinilevyn päälle, mitattava näyte sensorin päälle ja päällimmäiseksi kylmä alumiinilevy. Mittauksessa käytettiin gSKIN-XB 27 9C -lämpövirtalevyä ja gSKIN DLOG-4218 -tiedonkeruulaitetta. (Qin 2015, 56-58.)

Litiumparistojen kalorimetrinen mittaus

Pariston latautuessa tai purkautuessa litiumionit kiinnittyvät tai irtautuvat elektrodiin, jolloin vapautuu tai purkautuu myös lämpöenergiaa. Lämpövirtalevyllä voidaan mitata lämmön siirtymistä pariston sisään ja ulos lataus- ja purkautumisvaiheissa edullisemmin ja nopeammin kuin tavallisilla paristojen kalorimetreillä. Mittausten avulla voidaan kehittää paristoja turvallisemmiksi. (Calorimetric Measurement of... n.d.)

Faasimuutosmateriaalin termiset ominaisuudet

Sveitsiläinen faasimuutosmateriaalista tehtyjen läpikuultavien julkisivuelementtien valmistaja GLASSX on tehnyt Lucernen ammattikorkeakoulun kanssa yhteistyössä teoreettisen mallin tuotteistaan. Yhtiö testasi mallin paikkansapitävyyttä vertaamalla lämpövirtalevyillä mitattuja tuloksia mallin avulla laskettuihin arvoihin. Tulokset olivat yhtenäisiä teoreettisten arvojen kanssa (ks. kuvio 7). (Model validation embedded... n.d., 1-2.)



Kuvio 7. GLASSX-yrityksen tekemän lämpövuomittauksen arvot verrattuna simulaatiolla laskettuihin arvoihin (Model validation embedded... n.d., 2)

Seinän U-arvon määrittäminen

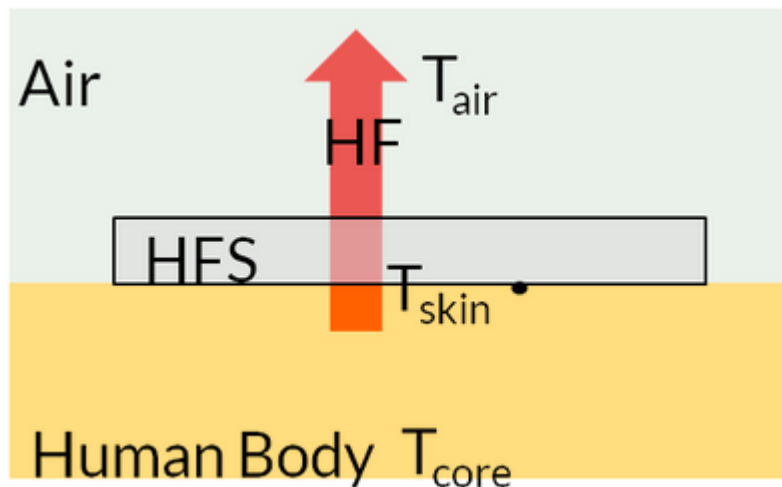
Seinän U-arvo eli lämmönläpäisykerroin kuvaa rakennuksen eristävyyttä. Materiaalin lämmönläpäisykerroin voidaan katsoa suoraan taulukosta, mutta taulukkoarvo on vain arvio. Pelkkien lämpötila-anturien avulla lämmönläpäisykerroimen laskemista varten joudutaan katsomaan taulukosta teoreettinen konvektiivinen lämmönläpäisykerroin seinän pinnalla olevan lämpötehon selvittämistä varten, joten laskettu lämmönläpäisykerroimen arvo on epätarkka. Tarkemman arvon lämmönläpäisykerroimelle saa mittaamalla kylmän ja kuuman puolen välisen lämpötilaeron lisäksi seinän läpi kulkeva lämpövuoto lämpövirtalevyllä. Tämä mittaustapa on määritetty standardeissa ISO 9869, ASTM C1046 ja ASTM C1155. (U-value and Building... n.d.)

Tekstiilit

Lämpövirtalevyn avulla voidaan tutkia tekstiileistä poistuvaa ja tekstiileihin siirtyvää lämpöä. Mittausten avulla voidaan kehittää tavallisten kuluttajien vaatteiden materiaalien lisäksi vaativiin ympäristöihin sopivia materiaaleja, kuten palomiesten suojavausteita. Esimerkiksi SANKO Textile -yhtiön mukaan lämpövirtalevyjen käyttö on helppoa ja lämpövuon mittaaminen auttaa yritystä luomaan parempilaatuisia kangasmateriaaleja nopeammin. (Other Applications: Textile... n.d.)

Kehon lämpötilan mittaaminen

Lämpötilamittareilla mitattaessa todellisen ruumiinlämmön saa selville vain asettamalla lämpömittarin kehon sisälle. Todellinen ruumiinlämpö voidaan laskea myös pelkästään ihon päälle asetettavien lämpövirtalevyn ja lämpötilamittarin avulla, mikäli tiedetään kehon lämpöresistanssi (ks. kuvio 8). Mittaamisen avulla voidaan esimerkiksi optimoida urheilijan urheilupäätöstä tai varoittaa lämpimässä työympäristössä työskenteleviä ihmisiä, jos ruumiinlämpö kohoaa liian korkeaksi. (Other Applications: Textile... n.d.)



Kuvio 8. Lämpövuon mittaaminen lämpövirtalevyllä ihmisen iholta (Other Applications: Textile... n.d.)

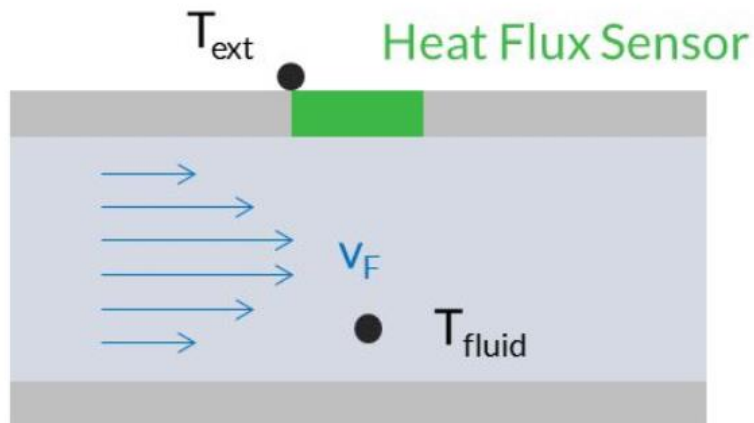
Auringon säteilemän lämmön mittaaminen

Materiaaliin kohdistuvan lämpösäteilyn voi mitata lämpövirtalevyllä, jonka ulkopinta on mustan värinen. Tällöin lämpövirtalevyn emissiivisyys on mahdollisimman suuri, jolloin lämpövirtalevy lämpenee ja sen läpi kulkeva lämpöteho on sama kuin auringon lämmittämä säteilyteho. Auringon säteilyn lämpövuota mittaamalla voidaan esimerkiksi ohjata älykkäitä automaatiojärjestelmiä rakennuksissa tai saada mittaustietoa meteorologisten prosessien tutkimiseen ja ennustamiseen. (Other Applications: Textile... n.d.)

Massavirran mittaaminen

Putkessa virtaavan nesteen virtausnopeus voidaan mitata lämpövirtalevyn ja kahden lämpötila-anturin avulla. Lämpövirtalevy asennetaan putken pinnalle, ja lämpötila-anturit asennetaan mittaamaan nesteen ja putken ulkopinnan lämpötiloja (ks. kuvio

9) (Other Applications: Textile... n.d.). Lämpövirtalevyvalmistaja greenTEG:in nettisivuilla mainitussa laskutavassa sovelletaan lämmönsiirtolakien lisäksi Kingin lakia, joka on virtausnopeutta mittaavassa kuormalanka-anemometreissä käytetty laskukaava (How Thermal Dispersion... 2014). Mittaustavan tarkkuus on hyvä verrattuna kalorimetrisiin virtausmittareihin eivätkä mittalaitteet häiritse virtausta ollenkaan. (Other Applications: Textile... n.d.)



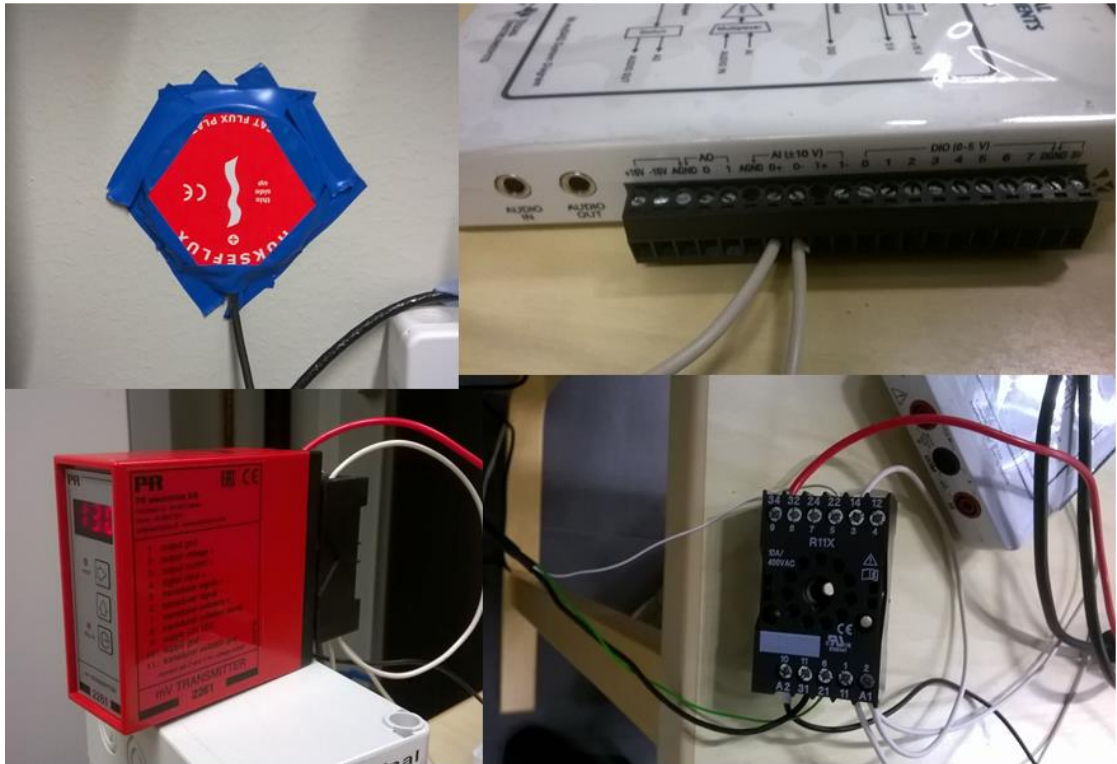
Kuvio 9. Massavirran mittaaminen lämpövirtalevyn avulla (Other Applications: Textile... n.d.)

Kerrostuman havaitseminen

Kun esimerkiksi vesiputken sisäpintaan alkaa kertyä veden epäpuhtauksista johtuen kerrostumaa, niin putken kokonaislämpövastus kasvaa. Vertaamalla lämpövirtalevyn avulla mitattua lämpövuon arvoa alkuperäiseen arvoon, joka putkella on ilman kerrostumaa, voidaan havaita kerrostuman syntyminen ja harkita jatkotoimenpiteitä. Muita vastaavia sovelluskohteita ovat esimerkiksi jään muodostuminen lentokoneen siipiin tai levän muodostuminen laivan runkoon. (Other Applications: Textile... n.d.)

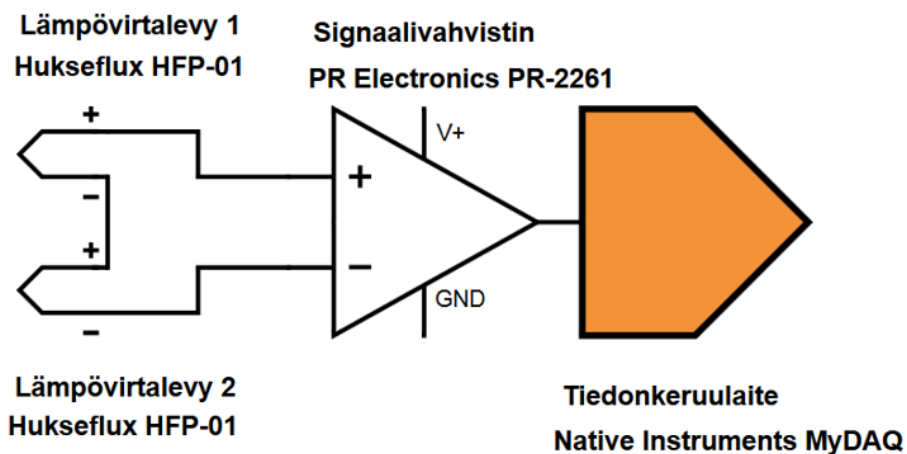
4 Lämpövuon mittaus huoneen seinästä

Tein vuoden 2015 marraskuussa Jyväskylän ammattikorkeakoulun rakennusautomaatiolaboratoriossa lämpövuon mittaukseen kuviossa 10 näkyvän testilaitteiston Hukseflux -HFP-01 lämpövirtalevyllä ja NI myDAQ-tiedonkeruulaitteella ja LabVIEW-ohjelmistolla, johon tein mittaukselle graafisen käyttöliittymän ja mahdollisuuden kirjata mittaustietoja taulukkoon.



Kuvio 10. Mittalaitteisto lämpövuon mittaamiseen seinästä

Kaksi lämpövirtalevyä asetettiin rakennuslaboratorion seinän sisäpinnalle, jolloin lämpövirtalevy mittasi huoneesta seinän läpi ulos ulkoilmaan virtaavaa lämpövuota. Kytin lämpövirtalevyn ohjekirjan mukaisesti lämpövirtalevyt sarjaan, jotta mittauksessa saataisiin seinästä keskimääräinen lämpövuoto suuremmalta alalta kuin vain yhdellä lämpövirtalevyllä. Kuviossa 11 näkyy mittalaitteiston kytkentäkaavio ja taulukossa 2 on listattu mittalaitteiston kytkennät.

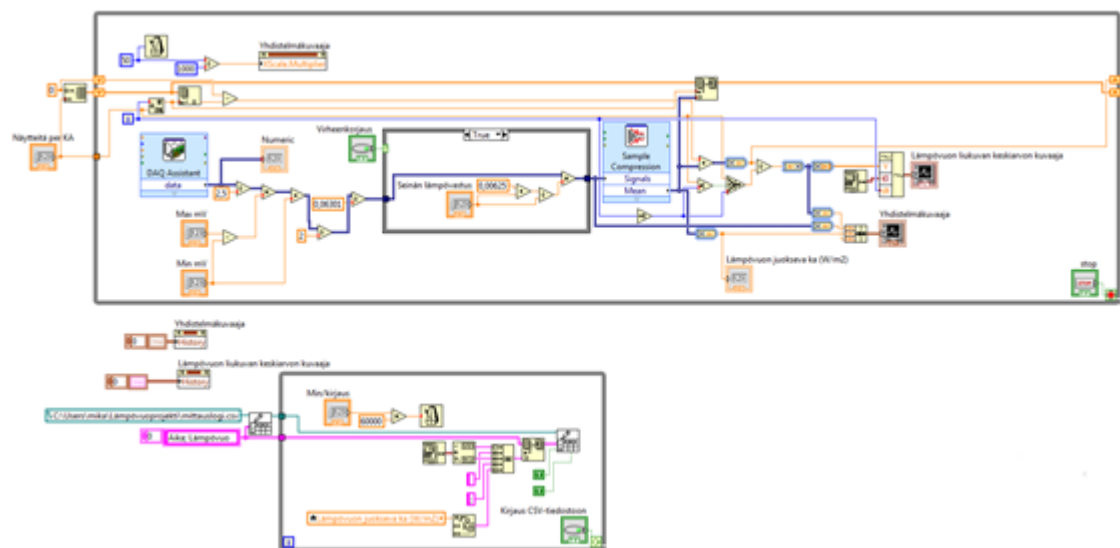


Kuvio 11. Mittalaitteiston kytkentäkaavio

Taulukko 2. Testilaitteiston mittalaitteiston kytkennät

Lämpövirtalevy (1) + (valkoinen) →	Lämpövirtalevy (2) – (vihreä)
Lämpövirtalevy (2) + (valkoinen) →	5 Transducer signal +
Lämpövirtalevy (1) – (vihreä) →	6 Transducer signal -
Lämpövirtalevy suoja (1&2) (musta) →	11 Transducer exitation gnd
Vahvistimen virtalähde + →	9 Supply +24 VDC
Vahvistimen virtalähde - →	10 Supply gnd
3 Output current + →	2 Output voltage +
2 Output voltage + →	NI myDAQ AI 0 +
1 Output gnd →	NI myDAQ AI 0 -

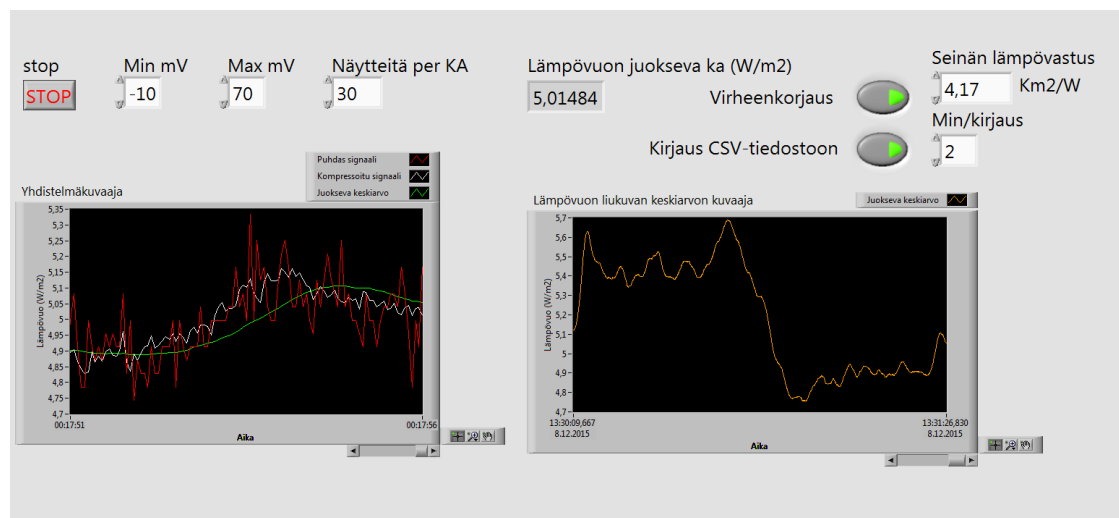
LabVIEW-ohjelmistolla tehdyssä käyttöliittymässä pystyy tarkkailemaan reaaliaikaisesti lämpövuon muutosta. Kuviossa 12 näkyy tekemäni käyttöliittymän viimeisen version ohjelmistorakenne ja kuviossa 13 näkyy sovelluksen graafinen käyttöliittymä.



Kuvio 12. LabVIEW-sovelluksen ohjelmistorakenne

Toteutin sovelluksen niin, että se kerää tiedonkeruulaitteelle saapuvaa jännitettä tietyn lyhyen ajan välein. Kukin jännitteen arvo muutetaan matemaattisilla operaattoreilla vastaamaan sensorin mittaamaa lämpövuon arvoa. Lämpövuon arvot esite-

tään kahdella graafisella näytöllä, joista toinen näyttää kuvaajan viimeisen viiden sekunnin ajalta ja toinen koko mittauksen ajalta. Käyttöliittymässä pystyy myös asettamaan vahvistimelle laitetut syöttöjännitteen minimi- ja maksimiarvot, muuttamaan keskiarvoistamisen asetusarvoa, asettamaan tarvittaessa seinän lämpövastuksen huomioiva virheenkorjaus päälle ja asettamaan sovellus kirjaamaan taulukkoon mitausarvoja halutulla aikavälillä. Tarkempi kuvaus sovelluksen rakenteesta löytyy Jyväskylän ammattikorkeakoululle tekemästäni raportista ”Lämpövuon mittaaminen lämpövirtalevyillä” (Multaharju 2016.)

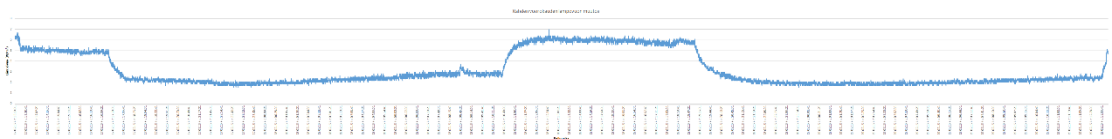


Kuvio 13. LabVIEW-sovelluksen käyttöliittymä

Kuvion 13 yhdistelmäkuvaajassa vasemmalla punainen käyrä on lämpövirtalevyiltä tiedonkeruulaitteeseen saapuva puhdas signaali. Kuvaajasta huomataan, että signaalin hajonta on suhteellisen suuri. Yhdistelmäkuvaajan näyttämän viiden sekunnin mittausjakson aikana sekunnin murto-osassa lämpövuon arvo vaihteli suurimmillaan noin $0,4 \text{ W/m}^2$. Tämän vuoksi signaali vaati kompressoinnin. Koska LabVIEW-ohjelmiston kompressointityökalulla saatu signaali oli vielä hajanaista, tein ohjelmistoon vielä kompressoitua signaalista liukuvan keskiarvon (kuvaajassa nimellä juokseva keskiarvo) käyrän, jolloin lyhyen aikavälin hajonta saatiin pois. Keskiarvon käyrästä huomataan kuitenkin, että viiden sekunnin aikana lämpövuon keskiarvo ei säily tasaisena. Kuviossa 13 oikealla puolella oleva liukuvan keskiarvon kuvaaja 1 min 17 s aika-

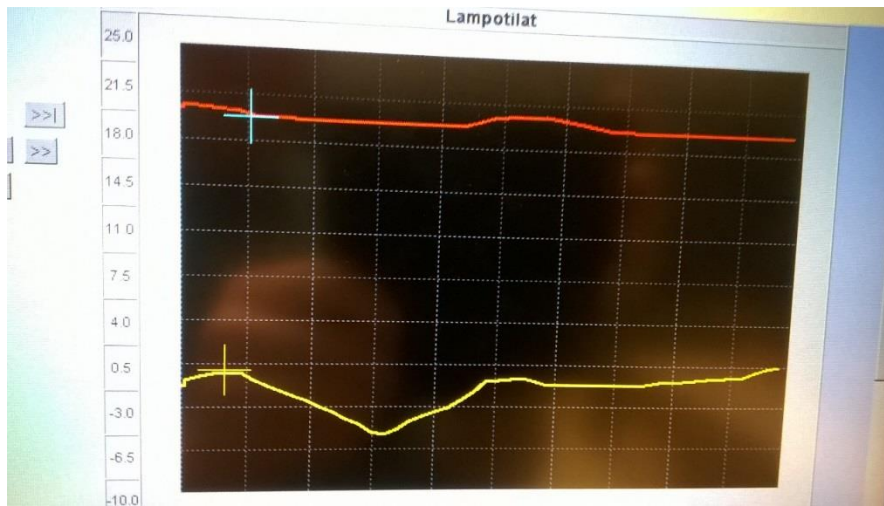
väliltä osoittaa hyvin lämpövuon mittauksen luonteen. Lämpövirtalevyn mittaustuloksen vaihtelevuuteen ovat voineet vaikuttaa huoneen sisäiset tekijät, kuten esimerkiksi valaisimien tuottama lämpösäteily, seiniin varautunut lämpö päivän aikana koululla liikkuneista ihmisistä ja käynnissä olleista laitteista, huoneen ilmastointi, lämpötilan vaihtelu ja sähköstaattinen häiriö muista sähkölaitteista, tai seinän ulkopuoliset tekijät, kuten auringon säteilytehon laskeminen ja säteilykulman muutos auringon laskemisen myötä ja tuulen vaikutuksen vaihtelevuus ulkoseinään.

Tein mittalaitteistolla samasta seinästä myös kahden vuorokauden pituisen mittauksen HOBO U12 Temp/RH/2 External Data Logger –tiedonkeruulaitteella. Kytkeä säilyi muuten samana, mutta NI DAQ –laitteen sijaan ulostulo vahvistimelta oli stereo-kaapelin johtimiin, joiden toisessa päässä juottamani stereoliitin oli kytketty tiedonkeruulaitteeseen. Laitoin laitteen kirjaamaan mittaustiedot 10 sekunnin välein. Noin 48 tunnin mittauksen tulokset näkyvät kuviossa 14.



Kuvio 14. Kuvaaja kahden vuorokauden mittaustuloksista aika - lämpövuon –koordinaatistossa

Kuviossa 15 näkyvät mittauksen ajalta sisä- (punainen) ja ulkolämpötilan (keltainen) arvot rakennusautomaatiolaboratorion mittauskeskuksen näytöltä katsottuna.



Kuvio 15. Huoneen ja ulkoilman lämpötilatiedot mittauksen ajalta

Lämpötilatiedoista nähdään, että huoneen lämpötila pysyy melko tasaisena koko mittauksen ajan ja mittauksen puolivälistä eteenpäin huoneen ja ulkoilman lämpötilaerokin pysyy hyvin tasaisena. Lämpövuon mittauservojen kuvaajassa puolivälin jälkeen lämpövuon arvo kuitenkin tippuu nopeasti. Huoneen ja ympäristön lämpötilan stabiilius ei siis takaa tasaista lämpövuon arvoa. Kuvaajasta näkee näin ollen hyvin, kuinka myös säteily ja konvektio vaikuttavat lämpövuon arvoon. Ajan hetkillä, jolloin lämpövuon arvo laskee nopeasti, koulu tyhjenee opiskelijoista ja aurinko laskee. Yön aikana lämpövuon arvo pysyy tasaisena, kunnes taas aurinko alkaa nousta ja opiskelijoita saapuu kouluun, jolloin lämpövuon arvo kasvaa nopeasti.

5 Lämpövuon mittaus testiympäristössä

5.1 Testilaitteisto

Tein vuoden 2016 lopulla testilaitteiston (ks. kuvio 16), jonka avulla pystyy näkemään, kuinka tarkasti lämpövirtalevyn mittausarvo vastaa teoreettista lämpövuon arvoa.



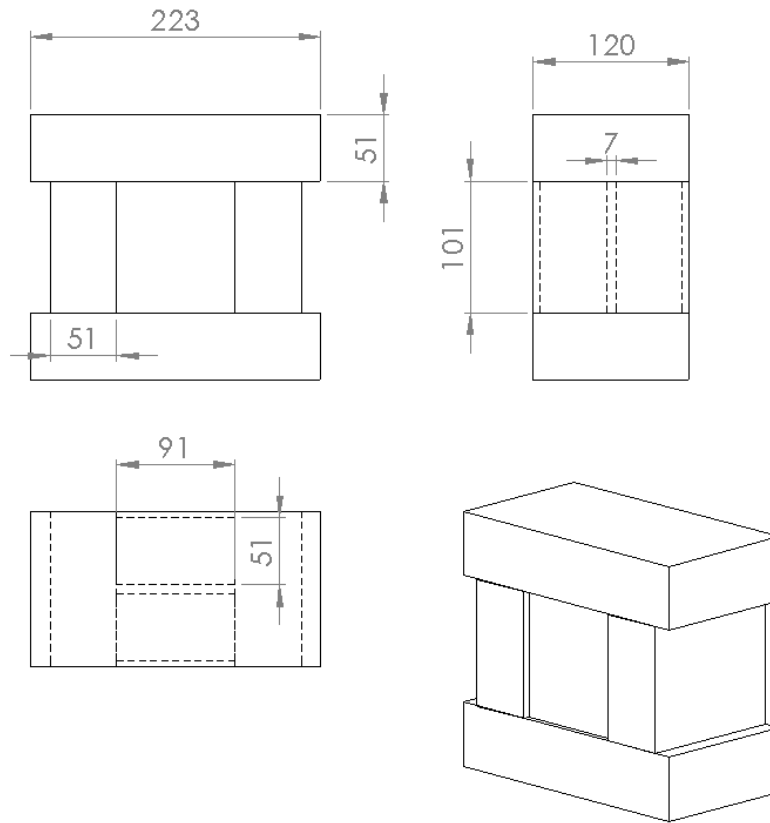
Kuvio 16. Testilaitteisto lämpövirtalevyjen luotettavuuden arvioimiseen

Laitteiston materiaaleina käytin koululla saatavilla olleita materiaaleja. Laitteiston tarkoituksena oli, että kahden saman kokoisen ja samaa materiaalia olevan kappaleen välissä olevat tehovastukset lämmittävät kappaleita, joissa molempien kylmällä puolella on lämpövirtalevy mittaamassa materiaalin läpi kulkevaa lämpövuon arvoa. Lämpövirta on suunnattu yksiulotteiseksi lämpövirtalevyjä vastaan kohtisuoraan, jolloin voidaan helposti laskea teoreettinen lämpövuon arvo, kun tiedetään lämmitysteho ja välimateriaalien poikkipinta-ala.

Lämmitettäväksi välimateriaaliksi valitsin PVC-muovin. PVC-muovi ei ole ideaalinen materiaalivalinta testilaitteistoa varten, koska PVC ei kestä jatkuvaa lämmitystä korkeilla lämpötiloilla kovin hyvin. Testin toiminta-aika ja käytetty lämmitysteho olivat kuitenkin varsin pieniä ja PVC:n kiderakenne takaa tasaisen lämmön jakautumisen, joten PVC oli tähän mittaustarkoitukseen riittävän hyvä valinta.

Yksiulotteisen lämpövirtauksen aikaansaamiseksi täytyi eristää lämmitettävistä välimateriaaleista kaikki muut suunnat kuin halutut virtaussuunnat. Käytin eristämiseen sopivan kokoiseksi leikattuja Finnfoam XPS –eristelevyjä. Eristelevyjen ja PVC:n väliin

jäi pieniä ilma-aukkoja, joten tiivistin kaikki liitoskohdat ulkopuolelta ilmastointiteipillä estääkseni konvektion vaikutuksen materiaalien välissä.



Kuvio 17. Mittalaitteiston osien mitat

Kuviossa 17 on esitetty materiaalien mitat. Mittalaitteisto koostui kahdesta PVC-palasta (keskellä), kahdesta pidemmästä XPS-levystä (pohja ja päällys) ja kahdesta lyhyemmästä XPS-levystä (sivut). PVC-palasten väliin jäävään 7 mm:n väliin oli sijoitettu lämmityskomponentit. Vastusten tuottama lämpö jakautuu molempien PVC-kappaleiden pinta-alalle, joten lämmön siirtyessä johtumisella kappaleiden läpi efektiivinen pinta-ala on:

$$A_{kond} = 0,101 \text{ m} \cdot 0,091 \text{ m} \cdot 2 = 0,0184 \text{ m}^2$$



Kuvio 18. Mittalaitteisto ilman alumiinifoliota ympärillä

Peitin lopuksi testilaitteiston pinnan alumiinifoliolla säteilyn vaikutuksen minimoimiseksi. Alumiinifolion emissiivisyyskerroin ε on 0,07 (Çengel 2004, 28), jolloin kaavojen 6 ja 7 mukaisesti säteilytehon vaikutus jää hyvin pieneksi alumiinifolion absorboimissa vain 7 % ulkopuolisesta lämpösäteilystä. Toisaalta alumiinifolion lämmönjohtokerroin k on $237 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (Çengel 2004, 20), joka on hyvin suuri PVC:n lämmönjohtokertoimeen verrattuna. Tällöin folio ei toimi lämmöneristimenä testilaitteistossa, joten se ei vaikuta mittaustuloksiin muuten kuin vähentämällä ympäristön säteilyn vaikutusta lämpövirtalevyn ulkopintaan.

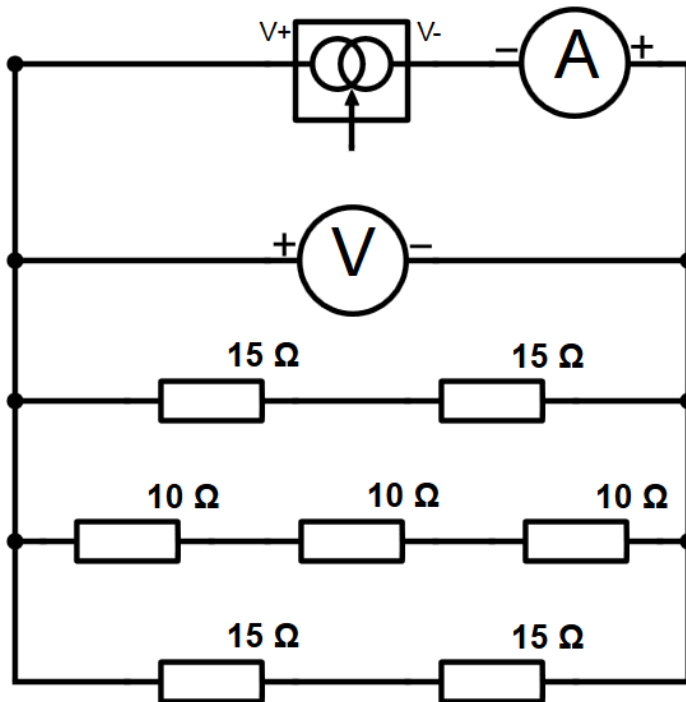
5.2 Laitteiston lämmityskomponentit

Tarkoitukseni oli toteuttaa lämmitys vastuslangalla, joka olisi taiteltu tasaisesti lämmitettävien materiaalien sisäpintojen poikkipinta-alalle, jotta lämpövirtaus PVC-kappaleisiin olisi mahdollisimman tasaista ja olisi täten lähempänä teoreettista mallia. Vastuslankaa ei ollut saatavilla, joten toteutin lämmityksen tehovastusten avulla. Tehovastukset asetettiin kahden PVC-kappaleen väliin.

Käytössäni oli säädettävä tasavirtajännitelähde. Mitoitin tehovastukset niin, että ne tuottaisivat yhteensä 12 VDC:n jännitteellä noin 15 W:n lämmitystehon. Tällöin vastusten kokonaisresistanssi olisi kaavan 12 mukaisesti:

$$R_{kok,mitoitus} = \frac{U_{kok}^2}{P_{kok}} = \frac{(12 \text{ V})^2}{15 \text{ W}} = 9,6 \Omega. \quad (12)$$

Saatavilla olevilla tehovastuksilla päädyin tekemään kuvion 19 mukaisen kytkennän.



Kuvio 19. Tehovastusten virtapiiri

Maksimiteho yksittäiselle vastukselle oli 5 W. Kuviossa 20 on juottamani tehovastusten kytkentä, jossa suurimman tehon tuottaa yksittäinen 15 Ω:n vastus. 15 Ω:n vastuksen tuottama teho 12 VDC:n kokonaisjännitteellä on tällöin kaavan 13 mukaisesti

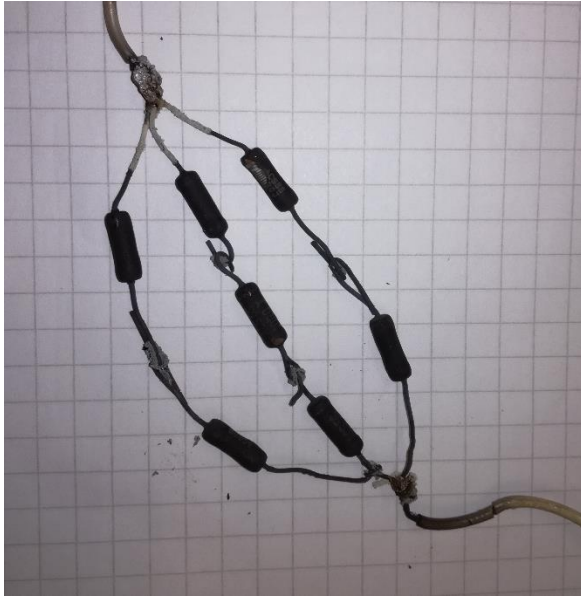
$$P_{15\Omega} = \frac{U_{15\Omega}^2}{R_{15\Omega}} = \frac{\left(\frac{U_{kok}}{2}\right)^2}{R_{15\Omega}} = \frac{\left(\frac{12 \text{ V}}{2}\right)^2}{15 \Omega} = 2,4 \text{ W} \quad (13)$$

ja 10 Ω:n vastukselle kaavan 14 mukaisesti

$$P_{10\Omega} = \frac{U_{10\Omega}^2}{R_{10\Omega}} = \frac{\left(\frac{U_{kok}}{3}\right)^2}{R_{10\Omega}} = \frac{\left(\frac{12 \text{ V}}{3}\right)^2}{10 \Omega} = 1,6 \text{ W}. \quad (14)$$

Kytkenässä ei siis suurin sallittu teho vastukselle ylity. Valittujen vastusten kokonaisresistanssi on kaavan 15 mukaisesti

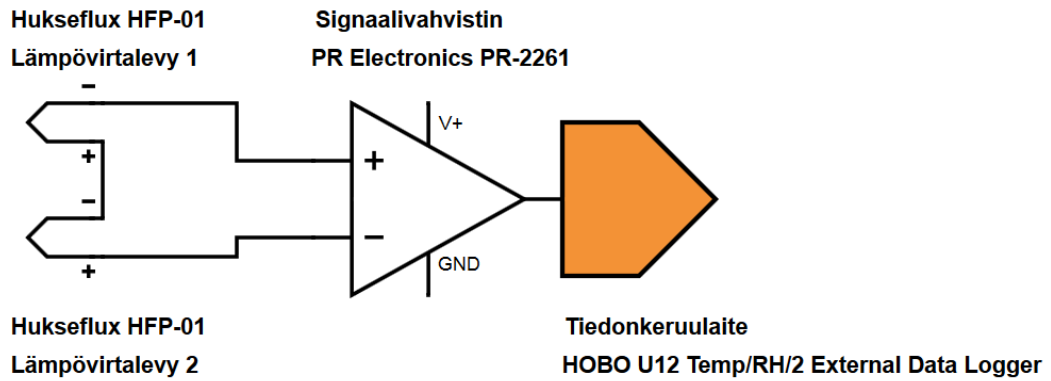
$$\frac{1}{R_{kok}} = \frac{1}{2 \cdot 15\Omega} + \frac{1}{3 \cdot 10\Omega} + \frac{1}{2 \cdot 15\Omega} = \frac{1}{10\Omega} \Rightarrow R_{kok} = 10\Omega. \quad (15)$$



Kuvio 20. Tehovastukset mittauksen jälkeen vihon sivua vasten

5.3 Lämpövirtalevyjen kytkennät

Kytin kaksi lämpövirtalevyä sarjaan kuvion 21 kytkentäkaavion mukaisesti ja laitoin ne mittaamaan lämpövuota kummaltakin puolelta testilaitteistoa. Näin saadaan selville lämpövirtalevyjen mittaama keskimääräinen lämpövuon arvo. Käytettyjen lämpövirtalevyjen herkkyydet ovat taulukossa 3. Lämpövirtalevyjen ja PVC:n välille laitoin DOW CORNING *heat sink compound 340* –lämpötahnaa ja teippasin lämpövirtalevyjen reunat kiinni PVC:n pintaan.



Kuvio 21. Lämpövirtalevyjen kytkentä testilaitteistossa

Taulukko 3. Lämpövirtalevyjen muuntokertoimet

S_1	$6,188 \cdot 10^{-5} \text{ Vm}^2/\text{W}$
S_2	$6,413 \cdot 10^{-5} \text{ Vm}^2/\text{W}$

Lämpövirtalevyt oli kytketty PR Electronics PR-2261 -vahvistimeen taulukon 4 mukaisesti. Huomioitavaa on, että HFP-01 -lämpövirtalevyissä positiivinen jännitteen arvo syntyy, kun lämpö virtaa punaiselta puolelta siniselle. Mittalaitteistossa lämpö virtaa päinvastoin siniseltä puolelta, joka osoittaa lämpövastuksia päin, kohti punaista puolta, joka on laitteiston ulkopuolella. Tämän vuoksi täytyi vaihtaa lämpövirtalevyjen plus- ja miinusjohtimien paikkaa vahvistimen liitännöissä (vrt. taulukko 2), jotta tiedonkeruulaitteelle saataisiin positiivinen jännitteen arvo.

Taulukko 4. Mittalaitteiston kytkennät

Lämpövirtalevy (1) + (valkoinen) →	Lämpövirtalevy (2) – (vihreä)
Lämpövirtalevy (2) + (valkoinen) →	6 Transducer signal -
Lämpövirtalevy (1) – (vihreä) →	5 Transducer signal +
Lämpövirtalevy suoja (1&2) (musta) →	11 Transducer excitation gnd
Vahvistimen virtalähde + →	9 Supply +24 VDC
Vahvistimen virtalähde - →	10 Supply gnd
3 Output current + →	2 Output voltage +
2 Output voltage + →	Stereokaapeli (+) HOBO Dataloggeriin
1 Output gnd →	Stereokaapeli (-) HOBO Dataloggeriin

Taulukossa 5 on listattu vahvistimen asetusarvot. Laitoin mitta-alueeksi -10 mV – 100 mV, koska arvelin mittauksen alussa ennen lämmitystä lämpövuon arvon olevan ainakin tilapäisesti negatiivinen ja syntyvän jännitteen jäävän suurimmillaan reilusti alle 100 mV:n arvon. Ulostuloasetuksena oleva 0 V – 2,5 V on HOBO -tiedonkeruulaitteen sisääntulojännitealue.

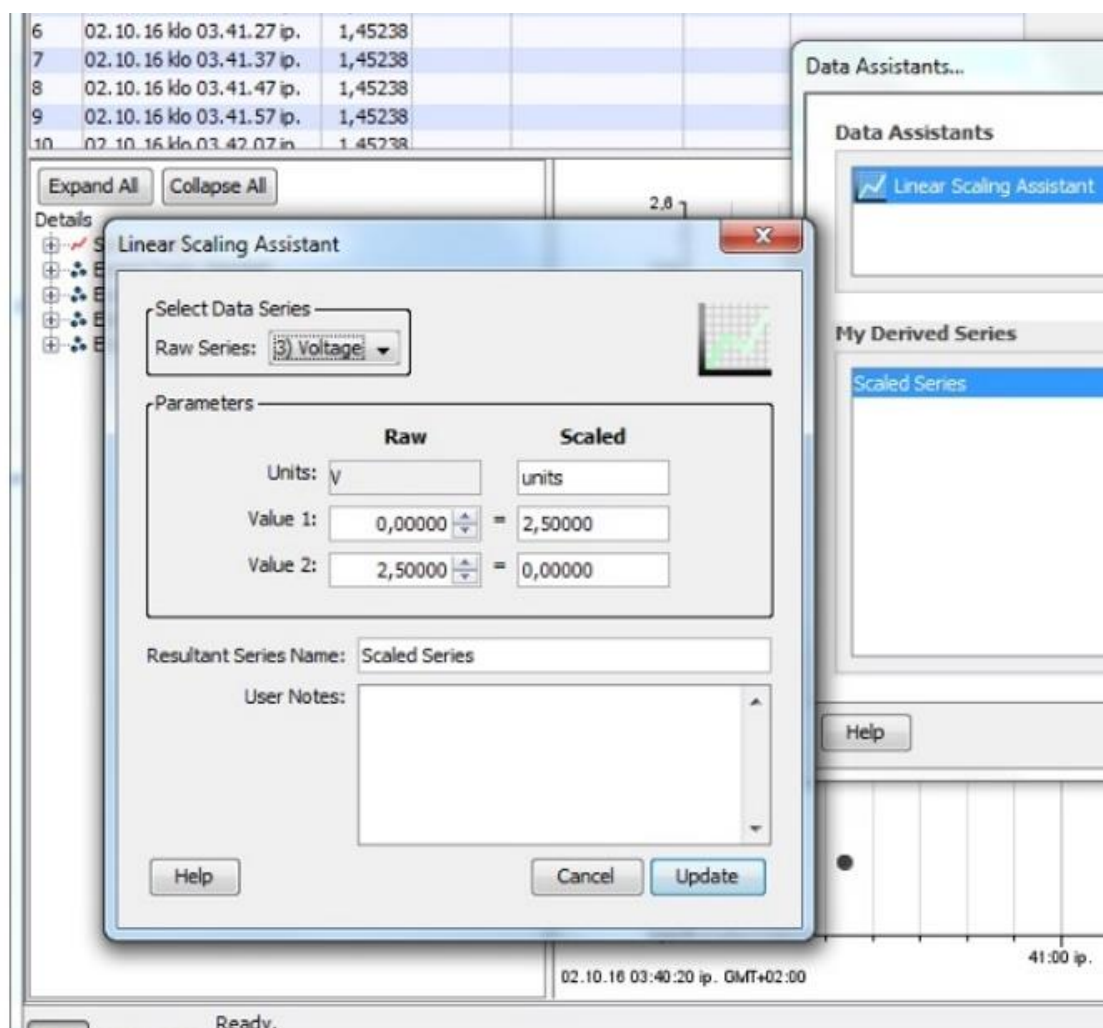
Taulukko 5. Vahvistimen asetusarvot

In – InL (sisääntulon minimiarvo)	-10 (mV)
In – InH (sisääntulon maksimiarvo)	100 (mV)
OUT – OL (uloslähdön minimiarvo)	0 (V)
OUT – OH (uloslähdön maksimiarvo)	2,5 (V)
OUT – UI (uloslähdön alue)	006 (0... 10 V)



Kuvio 22. PR-2261 vahvistin liitettynä stereojohtimella HOBO-tiedonkeruulaitteeseen

HOBO -tiedonkeruulaitteen kirjausasetukset asetetaan HOBOWare-luentaohjelmiston kautta. Laitoin tiedonkeruulaitteen mittaamaan tietoa 10 sekunnin välein, jotta näkisin, kuinka mittaustulosten hajonta muuttuu lämpövuon arvon kasvaessa. HOBOWare-luentaohjelmisto näytti oletuksena mittausarvoksi vahvistimelta saapuvan jännitteen arvon poikkeaman 2,5 VDC maksimiarvosta, joten ohjelmistossa täytyi tehdä käänteinen skaalaus, jolloin saapuvan syöttöjännitteen suurin jännitteen arvo 2,5 VDC muuttuu arvoksi 0 VDC ja syöttöjännitteen pienin arvo 0 VDC muuttuu arvoksi 2,5 VDC (ks. kuvio 23).



Kuvio 23. HOBOWare -luentaohjelmiston asetukset mittaustuloksen muuttamiseksi oikeaksi

5.4 Mittaus

Jotta mittauksesta pituus ei olisi ollut liian pitkä, päätin tavoitella lämpövuon arvoa, jonka tuottaa vastukset, kun jännitelähteen jännitteen arvo on 4 VDC. Vastuksesta kaikki teho muuttuu lämmöksi. Tällöin vastusten tuottama lämmitysteho on kaavan 16 mukaisesti:

$$\dot{Q} = \frac{U^2}{R_{kok}} = \frac{(4 \text{ V})^2}{10 \Omega} = 1,6 \text{ W}. \quad (16)$$

Odotettavan lämpövuon arvon laskemiseksi yksinkertaistetaan systeemiä niin, että lämpöteho jakautuu puolittain molempien PVC-kappaleiden pinnoille, jolloin ei huomioida sivuttais- ja pystysuuntiin siirtyvää lämpöä näiden pinta-alojen ollen hyvin pieniä verrattuna PVC-palojen poikkipinta-alaan. Tällöin yhden kappaleen lämpövuon arvo olisi kaavan 17 mukaisesti:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A_{kond}} = \frac{1,6 \text{ W}}{0,018382 \text{ m}^2} = 87,0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}. \quad (17)$$

Toteutin mittauksen niin, että lämmitin ensin kappaleita 12 VDC jännitteen tuottamalla teholla, jotta saavutettaisiin nopeammin tavoiteltava lämpövuon arvo. Havaitsin aikaisemmissa testimittauksissa kappaleiden lämpenevän hitaasti. Lämmittämällä ensin suuremmalla teholla sain pienennettyä mittausaikaa huomattavasti.

Käynnistin jännitelähteen 12 V jännitteellä, jonka jälkeen tarkkailin lämpövirtalevyjen vahvistimen näytöltä prosenttimäärää, joka kertoi syöttöjännitteen arvon suhteutettuna asetettuihin minimi- ja maksimiarvoihin. Kun yhden lämpövirtalevyn läpi kulkisi $87,0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ lämpövuon, niin prosenttilukema vahvistimen näytöllä saadaan, kun lasketaan mitatun jännitteen ja vahvistimen sisääntulon minimijännitteen erotuksen suhde vahvistimen sisääntulon maksimi- ja minimijännitteiden erotukseen kaavan 18 mukaisesti:

$$p_{loppu} = \frac{U - U_{min}}{U_{max} - U_{min}} = \frac{2\dot{q}(S_1 + S_2) - U_{min}}{U_{max} - U_{min}}$$

$$= \frac{2 \cdot 87,0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot (6,188 \cdot 10^{-5} + 6,413 \cdot 10^{-5}) \frac{\text{V}}{\text{W/m}^2} - (-0,010 \text{ V})}{0,110 \text{ V}} = 29 \%. \quad (18)$$

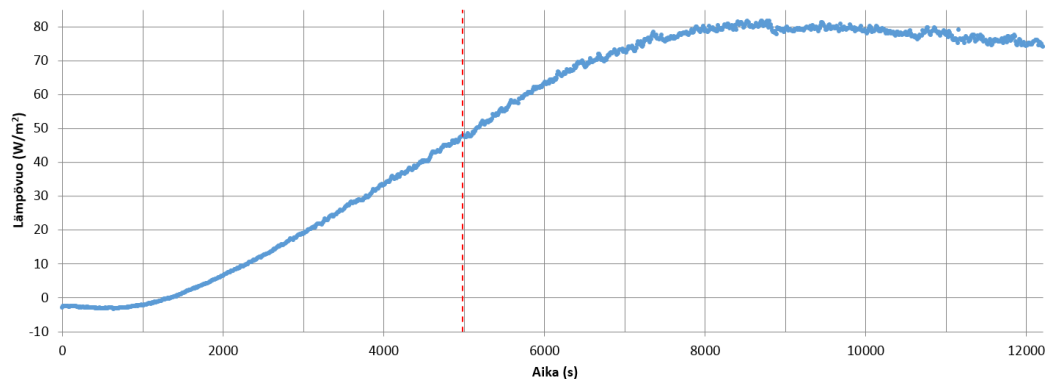
Kaavassa U tarkoittaa lämpövirtalevyjen tuottamaa jännitettä. Se on saatettu muotoon $2\dot{q}(S_1 + S_2)$ johtamalla kaavasta 11. Havaittiin testimittauksissa, että mittalaitteisto näyttää arvot kaksinkertaisena verrattuna todelliseen lämpövuon arvoon, joka on PVC-kappaleen pinnalla. Tämän vuoksi kaavassa 18 lämpövuon on kerrottu kahdella.

Päätin pienentää jännitelähteestä jännitteen arvosta 12 V arvoon 4 V hetkellä, kun lämpövirtalevyjen mittaama lämpövuon arvo oli noin puolet odotetusta arvosta. Odotin, kunnes vahvistimen näytöllä näkyvä lukuarvo alkoi tasoittua. Annoin mittauksen jatkaa vielä jonkin aikaa, kunnes lopetin HOBOTiedonkeruulaitteella tiedonkeräämisen. Tämän jälkeen kytkin tiedonkeruulaitteeseen tietokoneeseen kiinni ja loin HOBOWare -ohjelmistolla Excel-taulukon mittausarvoista. Excel-taulukossa näkyi vahvistimelta tiedonkeruulaitteelle saapuvan jännitteen arvo kymmenen sekunnin välein. Muutin jännitteen lämpövuon arvoksi Excel:ssä kaavalla 19, joka on johdettu kaavasta 11:

$$\dot{q} = \frac{\left[\frac{U_{out}}{U_{out,max}} \cdot (U_{in,max} - U_{in,min}) + U_{in,min} \right] \cdot 0,001 \frac{V}{mV}}{2 \cdot (S_1 + S_2)}, \quad (19)$$

jossa U_{out} on vahvistimelta tiedonkeruulaitteelle tuleva jännitteen lukema voltteina, $U_{out,max}$ on vahvistimen uloslähdön asetettu maksimiarvo, $U_{in,max}$ on vahvistimen sisääntulon asetettu maksimiarvo ja $U_{in,min}$ minimiarvo millivolteina, ja S_1 ja S_2 ovat taulukossa 3 näkyvät lämpövirtalevyjen herkkyydet. Nimittäjässä on kertoimena 2, koska mittalaitteiston näyttämä tulos on kaksinkertainen PVC:n pinnan todelliseen lämpövuon arvoon nähden. Lämpövuon arvoista tein kuvaajan (kuvio 24).

5.5 Tulosten analysointi



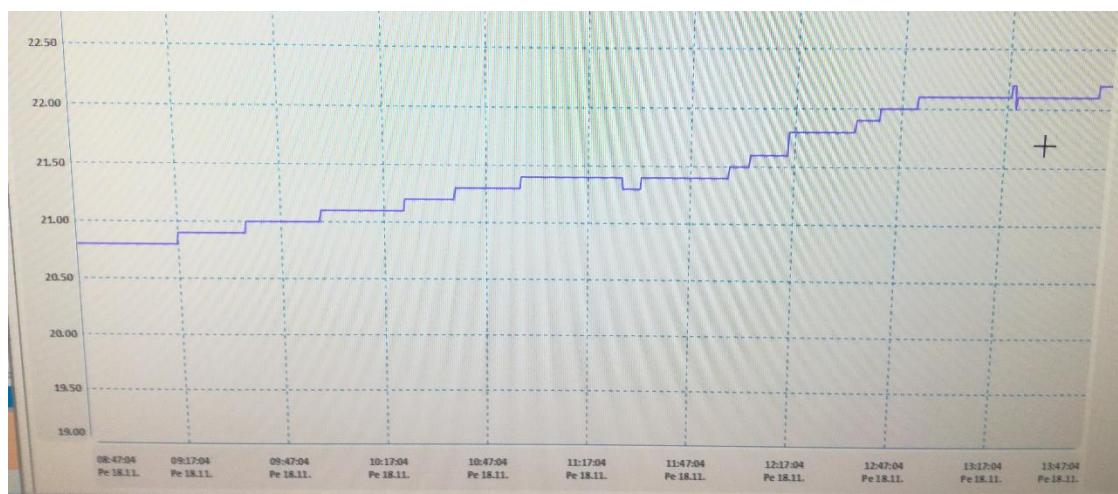
Kuvio 24. Kuvaaja testilaitteiston tuloksista aika - lämpövuoto -koordinaatistossa

Kuviossa 24 näkyvän kaavion x-akselilla on mittaukseen kulunut aika laitteiston käynnistämishetkestä lopetukseen ja y-akselilla lämpövirtalevyjen mittaama keskimääräinen lämpövuonon arvo PVC-palan pinnalta. Punaisella katkoviivalla on merkitty hetki, jolloin vaihdoin syöttöjännitteen 12 voltista 4 volttiin. Yleisesti voidaan nähdä, että lämpövuonon arvon kasvaessa signaalin hajonta kasvaa. Kuvaajasta huomataan, että aluksi lämpövuonon arvo on negatiivinen. Tämä johtuu siitä, että aamulla aloitettua lämpövuonon mittauksen klo 9:51:41 PVC-kappaleet eivät olleet vielä yön jäljiltä lämmenneet ympäristön lämpötilaan, jolloin lämpöä virtasi kappaleita kohti ympäristöstä lämmittäen niitä. Noin 22 minuuttia mittauksen aloittamisesta lämpövuonon arvo nousee kiihtyen negatiivisesta positiiviseksi, jolloin lämpöä alkaa virrata PVC-kappaleista ulospäin. Pinnoilta mitattu lämpövuoto kasvaa tasaisesti noin 80 minuutin ajan, jonka jälkeen lämpövuonon kasvunopeus hidastuu ja loppuu kokonaan noin 137 minuutin päästä mittauksen aloittamisesta. Mitattuja peräkkäisiä lämpövuonon arvoja tasoittumisen alettua on listattu taulukkoon 6.

Taulukko 6. Lämpövuon arvoja sen jälkeen, kun lämpövuon kasvu on loppunut

\dot{q} (W/m ²)	t (s)
79,2	8200
79,7	8210
79,3	8220
80,0	8230
80,7	8240
80,4	8250
80,4	8260
80,1	8270
81,0	8280

Lämpövuon arvo tasoittuu aluksi noin 80 W/m² arvoon. Verrattuna aikaisemmin laskettuun teoreettiseen arvoon 87 W/m² voidaan todeta, että lämpövirtalevyjen mitaama lämpövuon arvo on hyvin lähellä todellista arvoa. Todellisuudessa mittalaitteistossa lämpö ei virtaa yksilotteisesti ulos PVC-kappaleista, vaan pieni osa lämmöstä poistuu myös eristelevyjen kautta. Tällöin todellinen lämpövuon arvo PVC-palasten pinnoilta mitattuna on pienempi kuin laskemani teoreettinen arvo. Mittausjakson lopussa mitatun lämpövuon arvo alkaa laskea, koska huoneen lämpötila alkoi kasvaa, jolloin lämmön virtaus ympäristöön alkoi vähentyä.



Kuvio 25. Lämpötilan muutos huoneessa mittauksen aikana

5.6 SolidWORKS –mallinnus

Halusin arvioida lämpövirtalevymitausten luotettavuutta, joten mallinsin testilaitteiston SolidWORKS -ohjelmalla simuloidakseni syntyvää lämpövuota. Simulointia varten tarvitsin PVC-kappaleiden ja XPS-lämpöeristeiden termisistä ominaisuuksista SolidWORKS -ohjelmaan syöttöarvoiksi materiaalien lämmönjohtavuuden ja ominaislämmön.

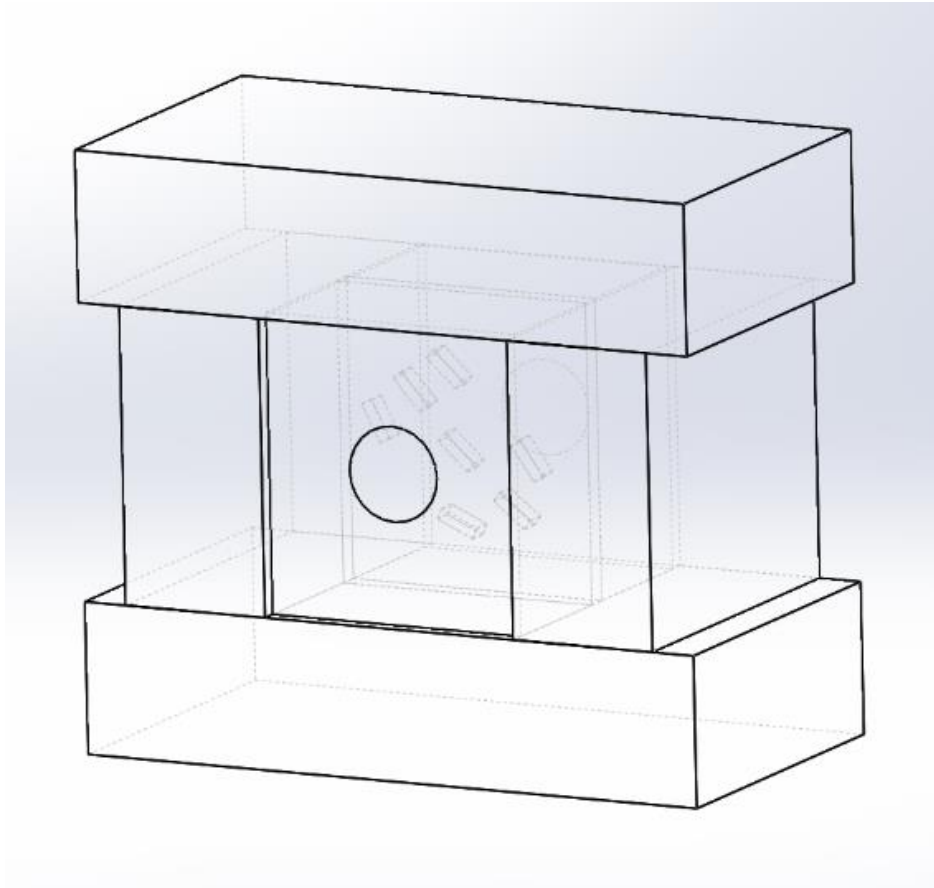
Taulukko 7. Lämpösimulaatiota varten materiaalien termiset ominaisuudet

PVC	
Lämmönjohtokerroin (Thermal Conductivity)	$0,147 \frac{W}{mK}$
Ominaislämpö (Specific Heat)	$1355 \frac{J}{kgK}$
XPS	
Lämmönjohtokerroin (Thermal Conductivity)	$0,035 \frac{W}{mK}$ (Lämmöneristävyys n.d.)
Ominaislämpö (Specific Heat)	$1500 \frac{J}{kgK}$ (Rigid Polystyrene Foam 2011, 18)

PVC:n materiaaliominaisuudet olivat valmiina SolidWORKS –ohjelman materiaalikirjastossa, mutta XPS-materiaalia ei löytynyt, joten tein ohjelmaan siitä materiaalin internetistä löydettyillä arvoilla.

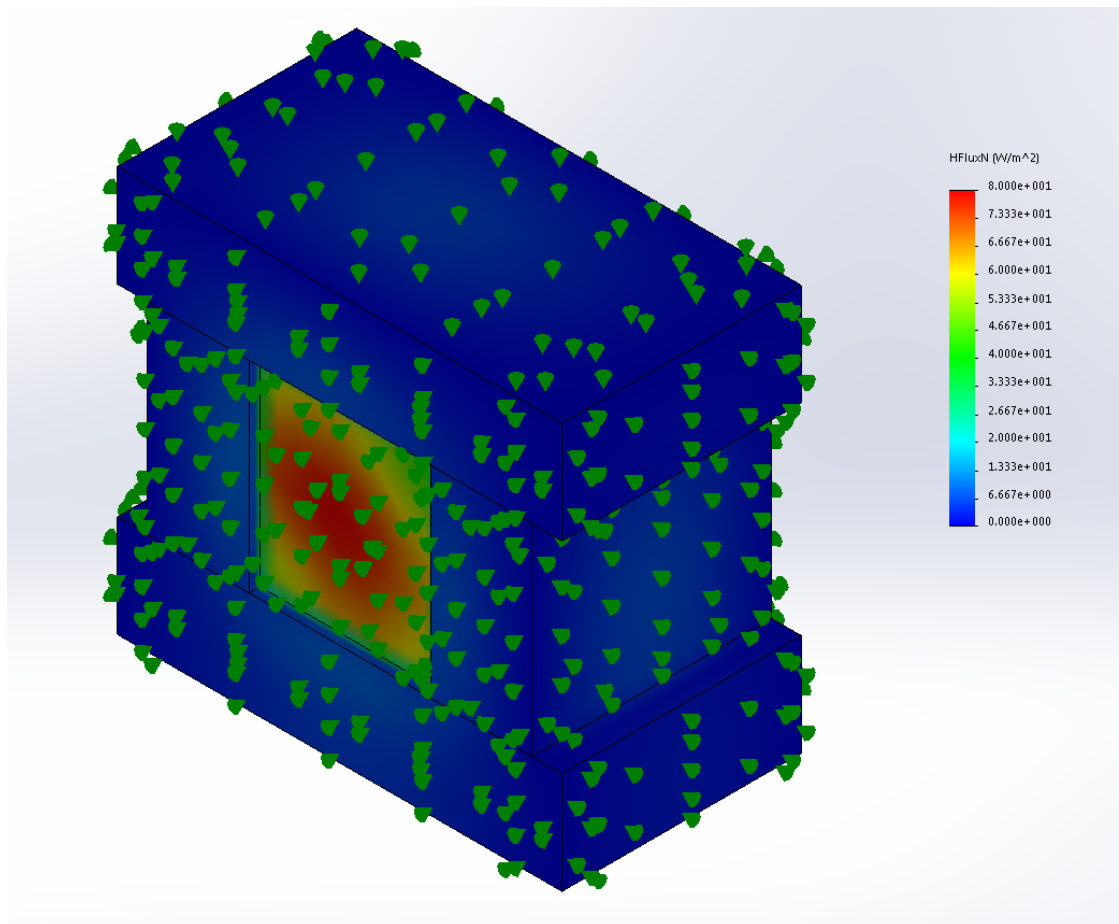
Eriste- ja PVC-kappaleet mallinsin oikean kokoisiksi, ja sijoitin ne samalla tavalla kuin ne olivat oikeastikin. Lämmitysvastusten etäisyydet toisiinsa nähden sain kuviosta 20, kun tiesin taustalla olevan vihon ruudun sivun pituudeksi 7 mm. Yksinkertaistin mallia helpottaakseni SolidWORKS -kokoonpanon luomista muuttamalla vastusten muodon suorakulmaisiksi särmiöiksi, joiden pituus oli sama kuin vastuksilla, ja leveys yhtä suuri kuin vastuksen halkaisija. Syvyydeksi laitoin 7 mm, jolloin molemmat päät koskettavat PVC-kappaleiden pintoja. Keskelle kummankin PVC-kappaleen ulkopintaa tein HFP-01 lämpövirtalevyn sensorin kokoisen ympyrän, jonka pystyin valitsemaan simulaatiossa haluamaksi kohdepinta-alaksi lämpövuon mittaukselle. Tällöin saatu

lämpövuon keskiarvo mittauspisteissä olisi vertailukelpoinen lämpövirtalevyllä mitattuihin arvoihin.



Kuvio 26. Mittalaitteiston läpinäkyvä mallikuva

Lämmityksen mallinnuksen toteutin SolidWORKS Thermal Simulation -simulointiohjelmalla. Sen avulla pystyy laskemaan lämmön siirtymisen ja lämpötilat komponenttien sisällä ja termiset vaikutukset ympäristöön. simulointiohjelmalla pystyy esimerkiksi tutkimaan, että muuttuuko kappaleen lämpötila käytössä liian suureksi, jolloin joutuu mahdollisesti suunnittelemaan lämpöeristyksen sen ympärille. Mallinnuksessa voi valita, että onko kyseessä tasainen vai muuttuva tila (Thermal Analysis n.d.). Valitsin mallinnukseen tasaisen tilan, jolloin lämpövuoto ei muutu ajan myötä.



Kuvio 27. Mallinnus mittalaitteiston lämmityksen aiheuttamasta lämpövuosta laitteiston pinnalla

Kuviossa 27 näkyy mallinnus lämpövuon jakautumisesta mittalaitteiston pinnalla. Koska vastusten avulla lämmittäessä lämpö ei jakaannu tasaisesti, niin odotettavasti huomataan lämpövuon olevan suurimmillaan PVC-kappaleen ulkopinnan keskikohdassa ja pienimmillään pinnan reunoilla. XPS-levyjen kautta poistuu huomattavasti vähemmän lämpöä kuin PVC-palojen kautta. Kappaleen pinnalla olevat vihreät nuolen kärjet näyttävät millä pinnoilla lämpö poistuu konvektion avulla. Valitsin kaikki muut ulkopinnat paitsi pohjan. Jätin mallinnuksesta kokonaan säteilyn pois, koska mittalaitteisto oli peitetty alumiinifoliolla. Tällöin alumiinifolion pieni emissiivisyyskerroin minimoi lämpösäteilyn vaikutuksen hyvin pieneksi.

Konvektion mallinnusta varten tarvittiin huoneen lämpötila ja huoneen ilman konvektiokerroin. Huoneen lämpötilan asetusarvoksi laitoin 294,65 K (21,5 °C), joka oli huoneen keskimääräinen lämpötila huoneen lämmitysjärjestelmän ohjauspaneelistä katsottuna aikavälillä, jolloin systeemi oli saavuttanut tasaisen tilan. Huoneen ilman

konvektiokerrointa ei ollut tiedossa, joten taulukkoon 8 on listattu mittauskohtien keskimääräinen lämpövuon arvo eri konvektiokertoimen arvoilla.

Taulukko 8. Simulaation laskemia lämpövuon arvoja sensorin pinta-alalla eri konvektiokertoimen arvoilla

$h \left(\frac{W}{m^2K} \right)$	$\dot{q} \left(\frac{W}{m^2} \right)$	$h \left(\frac{W}{m^2K} \right)$	$\dot{q} \left(\frac{W}{m^2} \right)$
5	55,5	55	74,3
10	64,0	60	74,6
15	67,7	65	74,8
20	69,8	70	75,0
25	71,2	75	75,1
30	72,1	80	75,2
35	72,8	85	75,4
40	73,3	90	75,5
45	73,7	95	75,6
50	74,1	100	75,6

Taulukosta 8 nähdään, että simulaation antamat lämpövuon arvot ovat hieman pienempiä, kuin lämpövirtalevyjen mitaamat arvot, ja konvektiokertoimen kasvaessa tarpeeksi suureksi sen arvon kasvu ei muuta lämpövuon arvoa kovin paljoa suuremmaksi. Kuvioista 24 nähdään, että testissä mitattu lämpövuon arvo alkaa mittauksen lopussa laskea lähemmäs simulaation laskemia arvoja. Tässä simulaatiossa mittaustulosten ero mitattuihin arvoihin selittyy osittain sillä, että syötetyt materiaalien ominaisuudet eivät välttämättä vastaa täysin todellisessa mittalaitteistossa käytettyjen materiaalien arvoja. Simulaatiossa kaikkiin testilaitteiston ulkopintoihin asetin kohdistumaan yhtä suuren konvektion vaikutuksen, kun taas oikeassa mittaustilanteessa huoneen ilmastoinnin aiheuttamat pienet ilmavirtaukset ovat voineet vaikuttaa eri pintoihin eri tavalla. Lisäksi säteilyn jättäminen pois simuloinnista vaikuttaa tuloksiin hieman, mutta ei kuitenkaan simuloinnissa tekemiäni kokeiluiden perusteella tässä mittaustilanteen tapauksessa niin merkittävästi, että sitä tarvitsisi huomioida. Ottaen kuitenkin huomioon kaikki epävarmat muuttujat voidaan todeta, että simulaation

laskemat arvot ja lämmön jakautumisen mallinnus ovat lähellä todellista tilannetta ja osoittavat lämpövirtalevyjen mittaamien arvojen olevan mittausolosuhteisiin nähden luotettavia.

6 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutustua lämpövirtalevyjen toimintaan. Tiedonhankinta opinnäytetyötä varten osoittautui haasteelliseksi, sillä lämpövirtalevyjen valmistajia ei ole markkinoilla kovin paljon ja aikaisempia tutkimuksia lämpövirtalevyjen toiminnasta, varsinkaan suomen kielellä, ei ole tehty useita. Lämpövirtalevyjen toimintaa lähdettiin ensin tarkastelemaan lämmönsiirtymiseen ja mittalaitteistoon liittyvän teorian kautta, jotta saatiin hyvä yleiskuva siitä, että mitä mitataan ja miten. Sitten tutustuttiin markkinoilla oleviin laitteisiin ja laitevalmistajien esittelemiін sovelluskohteisiin. Teoria ja valmistajien sivut eivät antaneet vielä riittävän hyvää kuvaa lämpövirtalevyillä mittaamisesta. Siksi tehtiin testilaitteisto, jolla voitiin tutkia, että miten lämpövirtalevyillä lämpövuon mittaaminen toteutuu käytännössä, mitä mittauksessa täytyy huomioida ja minkälaisia tuloksia mittauksella saadaan. Tutkittiin myös aikaisemmin toteutettua testimittausjärjestelyä, jotta saataisiin laajempi käsitys erilaisista mittaustilanteista.

Lämpövirtalevy osoittautui yksinkertaiseksi anturiksi, jolle löytyy monia erilaisia sovelluskohteita. Osa sovelluskohteista on aikaisemmin mitattu erilaisin menetelmin, kuten pelkästään lämpötila-antureilla, mutta sisällyttämällä lämpövirtalevy osaksi jo olemassa olevaa mittausjärjestelmää voidaan parantaa mittauksen tarkkuutta ja mittauksen luotettavuutta. Havaittiin, että eri valmistajat valmistavat hyvin erilaisia lämpövirtalevyjä eri käyttötarkoituksiin. Tämä mahdollistaa lämpövirtalevyjen käytön monissa erilaisissa käyttöympäristöissä ja sovelluskohteita löytyy varmasti vielä enemmänkin kuin mitä tuloksissa on listattu. Monista käyttömahdollisuuksista huolimatta löydettiin kuitenkin mittaepävarmuustekijöitä, joiden huomioiminen mittauksessa on välttämätöntä mittauksen luotettavuuden varmistamiseksi. Testilaitteistossa pyrittiin minimoimaan mittaustulokseen vaikuttavat häiriötekijät esimerkiksi peittämällä testilaitteisto alumiinifoliolla ja sijoittamalla testilaitteisto pois ulkoisten lämmönlähteiden lähetyviltä. Toimenpiteistä huolimatta havaittiin ulkoisten muuttujien, kuten

ympäristön lämpötilan vaihtelun ja ympäristön lämpösäteilyn, vaikuttavan mitattuihin lämpövuon arvoihin merkittävästi. Lämpövirtalevyillä mitatessa olisikin syytä huolehtia, että mittaus on toteutettu kontrolloidussa ympäristössä tai häiriöitä varten on myös muitakin mitta-antureita, kuten lämpötila-antureita, havaitsemassa mittausympäristön muutokset, jotka voidaan huomioida lämpövirtalevyjen mittaustulosten käsittelyssä. Mittausepävarmuuksista huolimatta mallinnusohjelmalla tehdyllä testilaitteiston lämpömallinnuksella osoitettiin, että lämpövirtalevyjen mittaamat tulokset ovat lähellä teoreettisia arvoja. Lämpömallinnus osoittautui hyväksi ja havainnollistavaksi apuvälineeksi, jolla voidaan arvioida paremmin mittaustuloksen luotettavuutta.

Lopputulokseksi saatiin yleinen kuva siitä, mitä lämpövirtalevyillä mittaaminen on, mitkä ovat sen mahdollisuudet ja mitkä ovat sen rajoitukset. Testilaitteistojen tuloksista nähdään, että minkälaisia mittajärjestelyjä joudutaan käyttämään ja minkälaisia mittaustuloksia voidaan odottaa lämpövirtalevymittauksista. Lämpövirtalevyjen testilaitteistot olisi ollut hyvä toteuttaa paremmin kontrolloiduissa olosuhteissa, jotta mittaustulokset voitaisiin arvioida luotettavammin. Toisaalta esitellyt testilaitteistot osoittavat hyvin, että miten tyypillisissä mittaustilanteissa lämpövirtalevyissä on monia epävarmuustekijöitä, joita kaikkia ei välttämättä pystytä hallitsemaan. Opinnäytetyössä saaduista tuloksista voidaan oppia lisätietoa näistä harvoin käytetystä mittausanturista ja arvioida lämpövirtalevyn kannattavuutta osana suunniteltua mittausjärjestelmää. Uskon lämpövirtalevyjen käytön lisääntyvän erilaisissa lämmön siirtymiseen liittyvissä mittauksissa, kun tietämys niiden toiminnasta leviää ja kun niiden mittaustulosten luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä tutkitaan enemmän.

Lähteet

- Calorimetric Measurement of Batteries. N.d. GreenTEG. Viitattu 27.1.2017. <https://www.greenteg.com/heat-flux-sensor/calorimetric-measurements-batteries/>
- Çengel, Y. 2004. Heat Transfer – A Practical Approach. 2. p. McGraw-Hill Science/Engineering/Math
- Fraden, J. 2010. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. 4. p. Springer.
- Heat Flux Measurement Techniques. N.d. GreenTEG. Viitattu 27.1.2017. <https://www.greenteg.com/heat-flux-sensor/heat-flux-measurement-techniques/>
- How Thermal Dispersion Mass Flow Meter Technology Works. 2014. Process Technology, Inc. Viitattu 27.1.2017. <http://process-tech.com/blogs/item/295-how-thermal-dispersion-mass-flow-meter-technology-works>
- Lämmöneristävyys. N.d. Finnfoam. Viitattu 27.1.2017. <http://www.finnfoam.fi/tuotteet/finnfoam-eristelevyt/ominaisuudet/lammoneristavyys/>
- Measure local heat transfer characteristics for industrial roll-to-roll drying processes. N.d. GreenTEG. Viitattu 27.1.2017. <https://www.greenteg.com/local-heat-transfer/>
- Model validation embedded Phase Change Material in facades with heat flux sensors. N.d. GreenTEG. Viitattu 27.1.2017. https://www.greenteg.com/wp-content/uploads/English-Summary_Model-validation-of-in-facade-embedded-Phase-Change-Material-with-gSKIN-heat-flux-sensors1.pdf
- Multaharju, M. 2016. Lämpövuon mittaaminen lämpövirtalevyillä. Raportti. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, tekniikan ja liikenteen ala, energiatekniikan koulutusohjelma. Asiakirja Jyväskylän ammattikorkeakoulun tietojärjestelmässä.
- Other Applications: Textile, Core Body Temperature, Precise Instrumentation, Solar Measurement, Calorimetry, Mass Flow, Fouling Detection. N.d. GreenTEG. Viitattu 27.1.2017. <https://www.greenteg.com/heat-flux-sensor/other-applications/>
- PHFS-01 Heat Flux Sensor. N.d. FluxTeq. Viitattu 27.1.2017. <http://www.fluxteq.com/phfs-01-heat-flux-sensor>
- PVC polyvinyylidloridi. N.d. IPP Muovitekniikka Oy. Viitattu 27.1.2017. http://www.industrialpp.fi/datafiles/userfiles/File/Fluorotech/Tuotteet/Tekniset_muovit_15.pdf
- Qin, X. 2015. Chicken Feather Fibre Mat/PLA Composites for Thermal Insulation. Master's thesis. University of Waikato. Viitattu 27.1.2017. <http://researchcommons.waikato.ac.nz/bitstream/handle/10289/9371/thesis.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Rigid Polystyrene Foam. 2011. BASF Plastics Portal. Viitattu 27.1.2017. http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~it_IT/function/conversions:/publish/common/upload/technical_journals/plastics_trendreports/Rigid_polystyrene_foam.pdf

Thermal Analysis. N.d. SolidWORKS. Viitattu 27.1.2017.

<http://www.solidworks.com/sw/products/simulation/thermal-analysis.htm>

User Manual HFP01 & HFP03 v1620. N.d. Hukseflux. Viitattu 27.1.2017.

http://www.hukseflux.com/sites/default/files/product_manual/HFP01_HFP03_manual_v1620.pdf

U-Value and Building Physics. N.d. GreenTEG. Viitattu 27.1.2017. <http://u-value.greenteg.com/>

van der Heijden, F. & Korsten, MJ. & Olthius, W. & Regtien, PPL., 2004. Measurement Science for Engineers. Butterworth-Heinemann

Viestinnän tiimi 8/2016. 2016. Pöytäkirja 15.5.2016. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Kielikeskus. Asiakirja Jyväskylän ammattikorkeakoulun tietojärjestelmässä.