

Opinnäytetyö (AMK)

Prosessi- ja materiaalitekniikka

2021

Reeti Jalasmäki

KOMPOSIITTIMATERIAALIEN SOVELTUVUUS VALAISINMATERIAALIKSI

Reeti Jalasmäki

KOMPOSIITTIMATERIAALIEN SOVELTUVUUS VALAISINMATERIAALIKSI

Työssä tutkittiin komposiittimateriaalien soveltuvuutta valaisinmateriaaliksi. Tutkimuksen kohteena oli polypropeenista (PP) ja pientiheyspolyeteenistä (PE-LD) valmistettuja komposiittilevyjä, jotka sisälsivät lisäaineena sellua, vuolukiveä tai molempia näitä materiaaleja.

Työn tarkoituksena oli selvittää, miten nämä komposiittimateriaalit soveltuisivat valaisinmateriaaliksi termisten ominaisuuksiensa puolesta. Tätä selvitettiin laboratoriossa simuloimalla valaisimien käyttöolosuhteita haastavissa ympäristöissä, jolloin komposiittilevyä lämmitettiin inkubointikaapissa samalla, kun komposiittilevyyn kiinnitetty ledikortti oli kytketty päälle.

Sellua sisältävät komposiittilevyt aiheuttivat alhaisemmat lämpötilat kiinnitetyille ledikorteille kuin pelkästään vuolukiveä sisältävät komposiittimateriaalit. Todennäköinen syy tälle tulokselle on komposiittilevyjen sisältämän kosteuden vaikutus mittaustuloksiin. Toinen todennäköinen syy on sellun korkeampi ominaislämpökapasiteetti verrattuna vuolukiveen.

ASIASANAT:

materiaalitekniikka, polymeerit, komposiitit, valaisimet

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Chemical and materials engineering

2021 | 36 pages

Reeti Jalasmäki

SUITABILITY OF COMPOSITE MATERIALS FOR LUMINAIRE HOUSINGS

In this thesis suitability of composite materials for luminaire housings was examined. The composite materials which were examined were panels made from either polypropylene (PP) or low-density polyethylene (PE-LD). These composite materials included cellulose fiber, steatite, or both as additives.

The objective of this thesis was to find out how well these composite materials would work as a luminaire housing material regarding their thermal properties. This was researched in a laboratory by simulating luminaire operating conditions in a challenging environment, which meant heating the composites in an incubator while the LED strips attached to the composite panel were turned on.

Composite panels containing cellulose fiber led to lower temperatures for the LED strips when compared to composite panels containing steatite. A likely cause for this is the humidity absorbed by the composites affecting the results. Another likely cause is the higher specific heat capacity of cellulose fiber compared to steatite.

KEYWORDS:

materials technology, polymers, composites, luminaires

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	6
1 JOHDANTO	7
2 AD-LUX OY	8
3 VALAISINMATERIAALIEN VAATIMUKSET	9
3.1 Valaisimien vaatimukset standardin IEC 60598-1 mukaisesti	9
3.2 Yleisiä valaisinrunгон materiaaleja	9
4 TUTKITUT MATERIAALIT	12
4.1 Polymeerit	12
4.1.1 Polypropeeni (PP) ja pientiheyspolyeteeni (PE-LD)	13
4.1.2 Selluloosa	14
4.2 Vuolukivi	14
4.3 Komposiittimuovit	15
5 LÄMMÖN SIIRTYMINEN	17
5.1 Konvektio	17
5.2 Lämmön johtuminen	17
5.2.1 Lämmön johtuminen kahden kappaleen rajapinnassa	19
5.2.2 Lämmön johtuminen komposiittimateriaalissa	20
5.2.3 Lämmön johtuminen koetilanteessa	21
5.3 Lämpökapasiteetti	21
5.4 Terminen diffuusiokerroin	22
6 LÄMPÖTILAMITTAUKSET	25
6.1 Koejärjestelyt	25
6.2 Esitestit	28
7 TULOKSET JA POHDINTAA	29
7.1 Mittaustulokset	29
7.2 Tulosten virhetarkastelu	30
7.3 Mittaustulosten pohdintaa	31
8 YHTEENVETO	33

KAAVAT

Kaava 1. Lämmönjohtavuuden kaava (Thermal engineering, 2021).....	18
Kaava 2. Lämmönjohtavuuden mekanismien kaava (William D. Callister Jr, 2015, p. 742).	18
Kaava 3. Lämpökapasiteetin kaava (William D. Callister Jr, 2015, p. 735).	22
Kaava 4. Ominaislämpökapasiteetin kaava (Lumen Learning, 2021).	22
Kaava 5. Termisen diffuusiokertoimen kaava (William D. Callister Jr, 2015, p. 749). ..	23

KUVAT

Kuva 1. AD-Lux Oy:n alumiinirunkoinen valaisin (Ad Lux Oy, 2020).	10
Kuva 2. AD Lux Oy:n polykarbonaattirunkoinen valaisin (Ad Lux Oy, 2020).....	10
Kuva 3. PP:n molekyyli rakenne (Specialchem, 2020).	13
Kuva 4. Pientiheyspolyeteenin molekyyli rakenne (Specialchem, 2020).	14
Kuva 5. Selluloosakuitujen rakenne (A-Level Biology, 2020).....	14
Kuva 6. Säännöllinen toistuva kiderakenne (OpenStax, 2016).....	15
Kuva 7. Ympäröivä matriisi ja täyteaineen partikkeleita (William D. Callister Jr, 2015).16	
Kuva 8. Lämmön johtuminen kahden kappaleen välillä (Thermal Engineering, 2021). 19	
Kuva 9. Valaisimia teollisuushallissa (Ad Lux Oy, 2020).	25
Kuva 10. Ledikortti ja virtalähde kiinnitettynä komposiittilevyyn.	26
Kuva 11. Koejärjestelyt inkubointikaapissa.	27
Kuva 12. Lämpömittari ja anturi kiinnitettynä ledikortteihin.	28

KUVIOT

Kuvio 1. Lämmönjohtavuusmittausten tulokset.	30
---	----

TAULUKOT

Taulukko 1. Lämmönjohtavuusmittausten tulokset.	29
--	----

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

PE-LD	Pientiheyspolyeteeni (Muoviteollisuus Ry, 2021).
PP	Polypropeeni (Muoviteollisuus Ry, 2020).
RPE-LD	Kierrätetty pientiheyspolyeteeni
RPP	Kierrätetty polypropeeni

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena oli komposiittimateriaalien soveltuvuus valaisinmateriaaliksi ja sen tutkiminen.

Energiansäästö ja kestävä kehitys ovat tällä hetkellä ajankohtaisempia haasteita kuin koskaan. Jokaisesta tuotteesta ja prosessista pyritään tekemään ympäristöystävällisempiä. Suomalainen valaisinvalmistaja AD-Lux Oy on ottanut tavoitteekseen tutkia mahdollisuutta kehittää uusi, kestävä kehityksen mukainen valaisin. Tämän valaisimen rungon on tarkoitus olla valmistettu polymeeripohjaisesta komposiittimateriaalista. Perinteisesti valaisinrungon materiaalina on suosittu alumiinia, erityisesti sen erinomaisen lämmönjohtavuuden takia. (Bommel, 2013, p. 11.)

Polymeereja ei ole normaalisti suosittu valaisinrungon materiaalina sen alumiinia heikomman lämmönjohtavuuden takia. Viime aikoina valaisinvalmistajat ovat kuitenkin alkaneet käyttämään termoplastisia polymeerejä eli kestopuoveja, kuten polykarbonaattia, runkomateriaalina niiden alhaisten kustannusten takia. (Mishra, 2018.) Voisiko polymeerien ongelmia mahdollisesti paikata lisäämällä kestopuovin sekaan paremmin lämpöä johtavaa materiaalia, kuten vuolukiveä?

Työn tavoitteena oli määritellä eri materiaaleja, tarkemmin vuolukiveä, sellua, kierrätettyä polypropeenaa (PP) ja kierrätettyä pientiheyspolyeteeniä (PE-LD), sisältävien komposiittilevyjen soveltuvuutta valaisinrungon materiaaliksi niiden termisiä ominaisuuksia testaamalla ja analysoimalla. Tavoitteena oli erityisesti tutkia materiaalien soveltuvuutta lämmön kannalta haastavissa olosuhteissa, kuten teollisuushallissa. Ennen mittauksia oletuksena oli, että vuolukivikomposiitti olisi lämmönjohtavuuden kannalta sellukomposiittia parempi runkomateriaali sen huomattavasti paremman lämmönjohtavuuden puolesta.

Työssä käydään läpi yleisiä valaisinmateriaaleja ja niiden ominaisuuksien hyötyjä ja haittoja. Työssä tarkastellaan myös valaisinmateriaaleille standardin asettamia vaatimuksia. Tämän jälkeen työssä käydään läpi teoriaa liittyen työssä käytettyihin materiaaleihin, komposiittimuoveihin ja lämmön siirtymiseen. Sen jälkeen esitetään, miten suoritettut mittaukset tehtiin ja miten mittausjärjestelyihin päädyttiin. Sitten esitetään mittaustulokset ja pohditaan tuloksia. Lopuksi kootaan yhteen tuloksista johdetut päätelmät.

2 AD-LUX OY

AD-Lux Oy on suomalainen valaisinvalmistaja. AD-Luxin tuotanto kattaa yritysten sisätilojen ja ulkotilojen valaistuksen. AD-Luxin valaisintehdas VAS Nordic Oy toimii Kaarinassa.

AD-Lux keskittyy LED-valaisimien valmistamiseen ja energiansäästö on yritykselle keskeinen arvo. AD-Luxin myydessä LED-valaisimiaan yrityksille, voidaan kokonaisinvestointi rahoittaa heidän elinkaarimallillaan, jolloin säästyneellä energiakustannuksella voidaan hoitaa investoinnin rahoitus.

Koska kestävä kehitys ja energian säästö ovat AD-Luxille keskeisiä arvoja, ovat he päättäneet tutkia mahdollisuutta kehittää uusi, kestävä kehityksen mukainen valaisin. Tähän hankkeeseen he ovat yhtenä osapuolena ottaneet mukaan Turun ammattikorkeakoulun. Hankkeen tavoitteena on saavuttaa riittävä tietoisuus valittavien materiaalien ja valmistusmenetelmien soveltuvuudesta valaisinten runkojen valmistukseen. Hankkeessa pyritään myös saavuttamaan riittävä tietoisuus koskien asiakkaiden kyseisille tuotteille asettamia vaatimuksia ja muita asiakastarpeita. Lisäksi hankkeen tavoitteena on saada kuva yrityksen mahdollisuuksista menestyä kansainvälisillä markkinoilla.

Turun ammattikorkeakoulun puolelta tähän hankkeeseen syntyi kaksi erillistä opinnäytetyötä, joista tämän opinnäytetyön tarkoitus oli tutkia materiaalien soveltuvuutta. Toinen opinnäytetyö keskittyi tutkimaan asiakastarpeita.

3 VALAISINMATERIAALIEN VAATIMUKSET

Valaisinrunгон materiaalin yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on, että sen avulla halutaan johtaa mahdollisimman paljon lämpöä pois valaisimesta ympäröivään ilmaan. Useimmat metallit ovat tähän hyviä materiaaleja, kun taas muovit toimivat lämmöneristeenä, eikä niitä voida tällöin käyttää rungon materiaalina, kun toimitaan suuritehoisten lamppujen kanssa. (Bommel, 2013, p. 11.)

3.1 Valaisimien vaatimukset standardin IEC 60598-1 mukaisesti

Standardissa IEC 60598-1 Luminaires – General requirements and tests kerrotaan vaatimuksia valaisimille ja testeja, mitä vaaditaan näiden vaatimusten täyttämiseksi:

- Standardin alussa yleisinä vaatimuksina valaisimille asetetaan, etteivät valaisimet saa normaalikäytön aikana aiheuta vaaraa ihmisille tai muulle ympäristölle. Valaisinten turvallinen toiminta on syytä tarkastaa standardissa kerrottujen testien mukaisesti. (International Standard 60598-1, 2014, p. 15.)
- Valaisimien on oltava tarpeeksi vahvoja, jotta ne ovat yhä turvallisia käyttää normaalin käsittelyn jäljiltä (International Standard 60598-1, 2014, p. 51).
- Termoplastisista materiaaleista tehtyjen valaisimien on syytä kestää sähkökomponenttien viallisesta toiminnasta johtuvia lämpötilan nousuja (International Standard 60598-1, 2014, p. 58).
- Valaisinrunгон täytyy suojata pölyltä ja kosteudelta valaisimeen laitettujen merkintöjen mukaisesti (International Standard 60598-1, 2014, p. 82).
- Valaisinrunkoon täytyy jättää virumista varten tietyn verran ylimääräistä tilaa (International Standard 60598-1, 2014, p. 91).
- Valaisin ei saa rikkoutua tai muuttua vaaralliseksi normaalikäytöstä johtuvan lämpenemisen ja jäähtymisen takia (International Standard 60598-1, 2014, p. 94).

3.2 Yleisiä valaisinrunгон materiaaleja

Alumiinia pidetään erittäin hyvänä runkomateriaalina (Kuva 1) nimenomaan LED-valaisimille, LED-valojen suuremman lämmöntuoton vuoksi. Alumiinilla on erinomainen

lämmön- ja sähkönjohtavuus, mistä syystä siitä on helppo suunnitella valaisimia, mitkä eivät ylikuumene. Alumiinirungon etuihin lukeutuu myös se, että sen voi täysin kierrättää. (Mishra, 2018.)



Kuva 1. AD-Lux Oy:n alumiinirunkoinen valaisin (Ad Lux Oy, 2020).

Termoplastiset polymeerit eli kestopuovut ovat alumiiniin verrattuna suhteellisen uusi materiaali LED-valaisinrungoissa (Kuva 2). Kestomuovista tehdyt rungot eivät ole aivan yhtä hyviä johtaamaan lämpöä kuin alumiinirungot, mutta kestopuovin materiaalikustannukset ovat huomattavasti halvempia kuin alumiinin. Kestomuovista tehdyt rungot ovat myös kevyempiä kuin alumiinirungot. (Mishra, 2018.)



Kuva 2. AD Lux Oy:n polykarbonaattirunkoinen valaisin (Ad Lux Oy, 2020).

Alentaakseen tuotantokustannuksia valaisinvalmistajat ovat pikku hiljaa siirtyneet käyttämään kestopuoveja alumiinin sijaan. Kestopuoveista suosituin runkomateriaali on polykarbonaatti, syynä sen hyvä lämmönkestävyys ja vahvuus. (Mishra, 2018.)

4 TUTKITUT MATERIAALIT

Työssä tutkittiin komposiittimateriaalien soveltuvuutta valaisimen runkomateriaaliksi. Runkomateriaalin tärkeimpiä ominaisuuksia on suojata valaisinta ja johtaa lämpöä pois valaisimesta ympäröivään ilmaan. Runkomateriaalia päätettäessä on otettava myös huomioon materiaalin paino ja hinta. (Mishra, 2018.)

Työssä tutkitut komposiittilevyt oli valmistettu joko polypropeenista (PP) tai pientiheyspolyeteenistä (PE-LD). Näissä komposiittilevyissä oli täyteaineena sellua, vuolukiveä tai molempia näitä materiaaleja.

4.1 Polymeerit

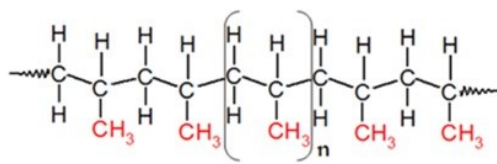
Polymeerit koostuvat hyvin pitkistä molekyyleistä. Useat polymeerit koostuvat hiiliketjuista, esimerkiksi työssä tutkittu polypropeeni. Polymeerien pitkät molekyyliketjut kietoutuvat ja sotkeutuvat itseensä ja keskenään, muodostaen sekavan rakenteen. Polymeerit voivat kiteytyä. Tällöin polymeerin molekyylit ovat järjestäytyneenä yhdisteelle ominaisen kolmiulotteisen mallin mukaan. Polymeerit ovat yleensä vain osaksi kiteytyneitä. Tällöin kiderakenteiden välissä materiaali on amorfista, missä molekyyliketjut ovat sekaisin. Kiteytyminen voi vaihdella 95 % kiteytyneestä materiaalista täysin amorfiseen materiaaliin. (William D. Callister Jr, 2015, pp. 94-95, 118-122.)

Lämmön johtuminen polymeereissä tapahtuu molekyyliketjujen värähtelyn ja rotaation avulla. Polymeerin lämmönjohtavuus riippuu polymeerin kiteytymisasteesta. Paljon kiteytyneet polymeerit johtavat lämpöä paremmin, kuin amorfinen materiaali. Tämä johtuu siitä, että molekyyliketjujen värähtely on koordinoitumpaa ja näin tehokkaampaa kiteisessä polymeerissä. (William D. Callister Jr, 2015, p. 744.)

Polymeerien lämmönjohtavuus on alhainen verrattuna muihin materiaaleihin kuten metalleihin, mistä syystä niitä käytetään usein lämmöneristeenä. Polymeerin huokoisuus parantaa sen lämmöneristämisominaisuuksia. Esimerkkinä tästä toimii paisutettu polystyreeni eli styroksi. (William D. Callister Jr, 2015, p. 745.)

4.1.1 Polypropeeni (PP) ja pientiheyspolyeteeni (PE-LD)

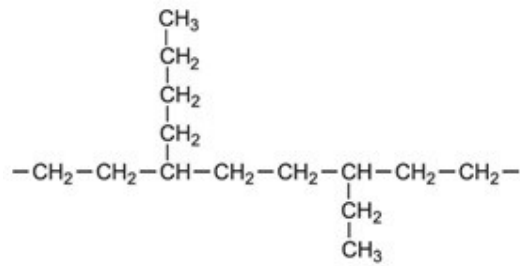
Polypropeeni eli PP on kiteinen kestävä muovi. PP on rakenteeltaan lineaarinen, eikä normaalisti haaraudu (Kuva 3). Ominaisuuksiltaan se on vahvaa ja jäykkää. PP kuuluu polyolefiineihin, mikä tarkoittaa, että polymeeri on tuotettu alkeenista. PP tuotetaan propeenista, mikä on alkeeni. PP on hyvin kevyt verrattuna muihin muoveihin, ja sen tiheys on n. 0,904-0,908 g/cm³. (Specialchem, 2020.)



Kuva 3. PP:n molekyylirakenne (Specialchem, 2020).

Pientiheyspolyeteeni eli PE-LD on melko jämäkkä polymeeri. Kuten PP, myös PE-LD kuuluu polyolefiineihin, sillä polyeteeni tuotetaan eteenistä, mikä myös on alkeeni. (Specialchem, 2020.)

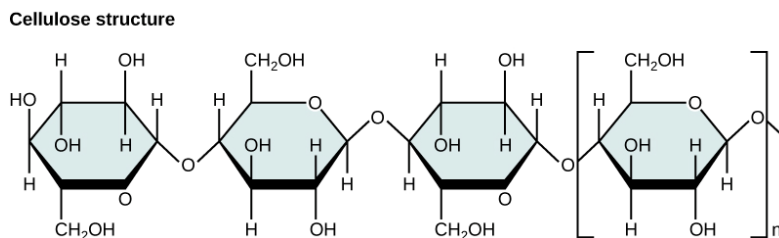
PE-LD on matalatiheyskainen versio polyeteenistä. Verrattuna myös yleisesti käytettyyn suuritiheyspolyeteeniin eli PE-HD:n rakenteeseen, PE-LD molekyyliarakenteessa on huomattavasti enemmän haarautuvia atomiketjuja (Kuva 4). Pientitiheyspolyeteeni on kiteinen, mutta molekyylistä enintään n. 50-60 % on kiteistä, kun taas loput molekyyleistä ovat amorfisia. Pientitiheyspolyeteeni on kevyttä verrattuna muihin polymeereihin, ja sen tiheys on n. 0,910-0,940 g/cm³. (Specialchem, 2020.)



Kuva 4. Pientiheyspolyeteenin molekyyli rakenne (Specialchem, 2020).

4.1.2 Selluloosa

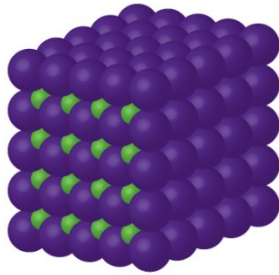
Selluloosa on polysakkariideihin kuuluva polymeeri. Selluloosan rakenne koostuu D-glukoosi-molekyyleistä. Selluloosan molekyyliketjut eivät haaraudu (Kuva 5). Näiden molekyyliketjujen välille muodostuu kuitenkin vetysidoksia, jotka pitävät molekyyliketjut yhdessä. Tällöin sellusta muodostuu mikrosäikeitä, jotka ovat tukevia ja vahvoja. (A-Level Biology, 2020.)



Kuva 5. Selluloosakuitujen rakenne (A-Level Biology, 2020).

4.2 Vuolukivi

Vuolukivi on kivi, jolloin se koostuu mineraaleista. Nämä mineraalit muodostavat säännöllisen toistuvan kiderakenteen (Kuva 6).



Kuva 6. Säännöllinen toistuva kiderakenne (OpenStax, 2016).

Vuolukivi koostuu pehmeistä mineraaleista. Vuolukivi koostuu suurimmaksi osaksi talkista ja magnesiitistä, joita on molempia noin 40-50% vuolukiven muodostavista mineraaleista. Loput vuolukiven muodostavat mineraalit ovat kloriitti ja magnetiitti. (Tulikivi, 2020.)

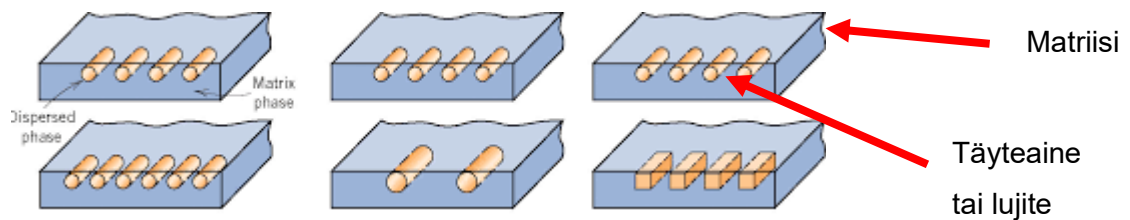
Vuolukivi kuuluu keraamimateriaaleihin. Keraameilla ei ole usein paljon vapaita elektroneja, ja näin niiden pääasiallinen lämmönjohtavuuden mekanismi on lämmön johtuminen fononien avulla. Koska fononit eivät kuitenkaan ole yhtä tehokkaita johtamaan lämpöä kuin elektronit, keraameilla on yleensä selvästi alhaisempi lämmönjohtavuus verrattuna metalleihin, joilla on paljon vapaita elektroneja. (William D. Callister Jr, 2015, p. 743.)

Varsinkin huokoisia keraameja käytetään lämmöneristeenä. Tämä johtuu siitä, että huokoisten materiaalien ilmataskut hidastavat lämmön johtumista. (William D. Callister Jr, 2015, p. 744.) Vuolukivi on kuitenkin hyvin tiivis keraami. Vuolukiven huokoisuus on vain n. 0,08 %, kun taas esimerkiksi laadukkaan rakentamiseen käytetyn kiven huokoisuus on n. 0-30 %. Tiivis rakenne mahdollistaa kohtuullisen nopean lämmön johtumisen vuolukivessä. (Tulikivi, 2020.)

4.3 Komposiittimuovit

Komposiittimateriaaliksi kutsutaan materiaalia, jossa useampi kemiallisilta tai fyysisiltä ominaisuuksiltaan erilaista materiaalia muodostavat yhteisen materiaalin, ilman että nämä materiaalit sekoittuvat keskenään. (Muoviteollisuus Ry, 2020.)

Komposiittimuovissa muovi toimii matriisina sitoen materiaalin yhdeksi kokonaisuudeksi. Komposiittimuovissa toinen materiaali voi toimia esim. lujitteena, täyteaineena tai lisäaineena. Lujitekomposiiteista esimerkkejä ovat lasikuitu ja hiilikuitu (Muoviteollisuus Ry, 2020). Komposiittimateriaalien ominaisuudet määrittävät ainesosien ominaisuuksien ja määrien perusteella. Komposiittimateriaaliin vaikuttaa myös täyteaineena tai lujitteena käytettyjen partikkeleiden muoto, koko, jakautuma ja suunta (Kuva 7). (William D. Callister Jr, 2015, p. 540.)



Kuva 7. Ympäröivä matriisi ja täyteaineen partikkeleita (William D. Callister Jr, 2015).

Tässä työssä analysoitiin komposiittimuoveja, joiden lisäaineina toimivat sellu ja vuolukivi. Lisäaineiden tavoitteena tässä tapauksessa oli vähentää materiaalin muovipitoisuutta ja parantaa valaisinrungon termisiä ominaisuuksia.

Sekä vuolukivi- että sellukomposiitot ovat suuren partikkelikoon komposiitteja. Suuren partikkelikoon komposiiteissa partikkelit ovat jäykempiä kuin ympäröivä matriisi. Tämän seurauksena matriisi johtaa osan siihen kohdistuvasta voimasta partikkeleihin, jotka tukevat materiaalia. Suuren partikkelikoon komposiittimateriaalien mekaaniset ominaisuudet riippuvat matriisin ja partikkeleiden välisestä rajapinnasta (William D. Callister Jr, 2015, p. 541).

5 LÄMMÖN SIIRTYMINEN

Tässä työssä tarkastellaan pääasiassa lämmönjohtavuutta lämmönsiirtymismekanismeina. Lämpö voi siirtyä johtumisen lisäksi säteilemällä ja konvektion avulla. Lämpösäteilyssä lämpö siirtyy sähkömagneettisen säteilyn avulla. (Thermal engineering, 2021.) Kokeessa ledeistä lähtevästä lämpösäteily kohtaa ensimmäisenä ledikortin, eikä tällöin osu komposiittilevyyn. Toisaalta ledeistä lähtenyt lämpösäteilyä luultavasti heijastuu inkubointikaapin peilimäisistä seinistä komposiittilevyyn. Tämän lämpösäteilyn vaikutusta on kuitenkin vaikea arvioida tarkemmin.

5.1 Konvektio

Konvektiossa lämpö siirtyy fluidin, kuten esimerkiksi ilman, mukana. Fluidin lämmetessä siinä tapahtuu lämpölaajenemista. Tällöin sen tiheys vähenee ja fluidi kohoaa ylöspäin. Tämä luo virtoja fluidissa, jossa lämpimämmät alueet nousevat ylös suhteessa viileämpiin osiin. (Thermal engineering, 2021.)

Konvektio on otettu kokeessa huomioon asettamalla komposiittilevyt ledikorttien yläpuolelle, minkä tarkoituksena on simuloida reaalityilannetta, missä konvektion aiheuttamana lämmin ilma kohoaa ylöspäin ja lämmittää levyä. Toisaalta mittausten aikana inkubointikaapissa oli päällä ilmakierto, mikä sekoittaa ilmavirtoja ja mistä syystä konvektiota ei voi tarkemmin tarkastella.

5.2 Lämmön johtuminen

Lämmön johtuminen eli konduktio on aineen sisällä tai kahden toisiaan koskettavan aineen välillä tapahtuvaa lämmön siirtymistä (Thermal engineering, 2021). Lämmön johtuminen tapahtuu lämpimmästä kappaleesta tai kappaleen alueesta viileämpään kappaleeseen tai kappaleen alueeseen.

Lämmön johtumisen nopeus perustuu Fourierin lakiin. Tämän lain mukaan lämmön johtuvuuden nopeus materiaalin läpi on suhteellista lämpötilan negatiiviseen gradienttiin

ja alueeseen, mikä on suorakulmassa mainittuun gradienttiin, minkä läpi lämpö virtaa. (Thermal engineering, 2021.) Kaavana se näyttää tältä (Kaava 1):

$$\vec{q} = -k\nabla T$$

missä:

q on lämpövuon vektori (W/m^2)

k on materiaalin lämmönjohtavuus ($W/m\cdot K$)

∇T on lämpötilan gradientti väliaineessa eli materiaalissa

Kaava 1. Lämmönjohtavuuden kaava (Thermal engineering, 2021).

Kiinteissä materiaaleissa lämpö voi johtua sekä fononeina eli hilan värähtelyaaltoina että vapaina elektroneina. Lämmönjohtavuus on näiden kahden ominaisuuden summa. (William D. Callister Jr, 2015, p. 742.) Kaava 2:n mukaisesti:

$$k = k_1 + k_e$$

missä:

k on materiaalin lämmönjohtavuus

k_1 on hilan värähtelystä johtuva lämmönjohtavuus

k_e on elektronien liikkeestä johtuva lämmönjohtavuus

Kaava 2. Lämmönjohtavuuden mekanismien kaava (William D. Callister Jr, 2015, p. 742).

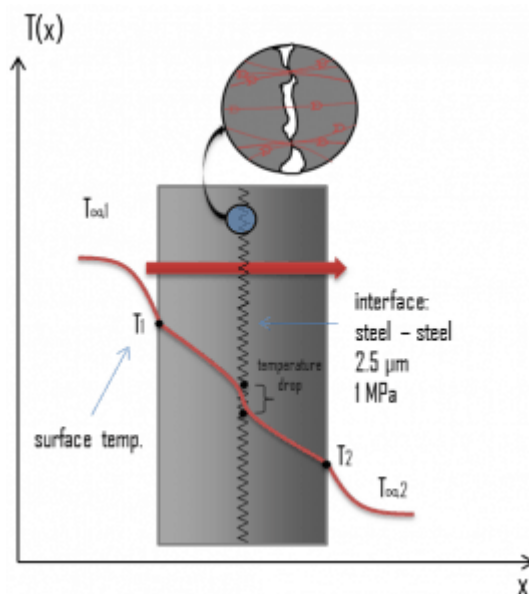
Yleensä toinen näistä lämmönjohtavuuden tavoista on materiaalissa johtava tapa. Elektronien lämmönjohtavuus on paljon tehokkaampaa kuin fononien lämmönjohtavuus.

Tämä johtuu siitä, että hilarakenteen epätäydellisyydet ovat tehokkaita hajottamaan fononeita. Mitä enemmän materiaalissa on vapaita elektroneja, sitä suurempi on elektronien liikkeestä johtuva lämmönjohtuvuus. Tästä syystä metallit ovat hyviä lämmönjohteita, koska niillä on paljon vapaita elektroneja. (William D. Callister Jr, 2015, p. 742.)

Kokeessa halutaan tarkastella, miten komposiittilevyn lämpötilä muuttuu siinä kiinni olevan ledikortin lämmitessä, mistä syystä pääasiallisena lämmön siirtymistapana tarkastellaan kokeen aikana tapahtuvaa lämmön johtumista. Lämmön johtumisen nopeus on suhteellista sekä kahden aineen väliseen lämpötilaeroon että kahden aineen välisen rajapinnan kokoon. Tässä kokeessa tämä tarkoittaa, että mitä suurempi lämpötilaero ja mitä suurempi pinta-ala kahden aineen välillä on, sitä nopeammin lämpimämpi aine luovuttaa lämpöenergiaa ja näin viilenee. (Thermal engineering, 2021.)

5.2.1 Lämmön johtuminen kahden kappaleen rajapinnassa

Kun tarkastellaan lämmönjohtavuutta kahden kiinteän kappaleen välillä, on syytä ottaa huomioon myös lämpökontaktin johtokyky. Lämmön johtuessa kahden kappaleen välillä, niiden rajapinnassa lämpötila laskee (Kuva 8). (Thermal Engineering, 2021.)



Kuva 8. Lämmön johtuminen kahden kappaleen välillä (Thermal Engineering, 2021).

Lämmön johtuminen kappaleiden välillä riippuu suurelta osin kappaleiden pintojen tasaisuudesta. Tämä johtuu siitä, että vaikka epätasaisten pintojen huippukohdat koskettavat toisiaan ja näin mahdollistavat lämmön johtumisen kappaleesta toiseen, pintojen kuopat luovat ilmasta koostuvia alueita. Nämä alueet toimivat eristeenä kappaleiden välillä ilman alhaisen lämmönjohtavuuden takia. Vaikka kaksi kappaletta näyttäisi koskettavan toisiaan, epätasaisuudet kappaleiden pinnoissa pienentävät oikean kontaktipinta-alan kappaleiden välillä paljon pienemmäksi. (Thermal Engineering, 2021.)

Tämä ilmiö ei ole yhtä suuressa roolissa pienen lämmönjohtavuuden materiaaleilla eli esimerkiksi polymeereilla kuin se on suuren lämmönjohtavuuden materiaaleilla kuten metalleilla (Thermal Engineering, 2021). Tästä syystä tämä ilmiö ei myöskään tässä testissä ole todennäköisesti suuri tekijä, sillä lämmönjohtumista tarkastellaan komposiittilevyihin, jotka ovat suurimmaksi osaksi polymeeriä.

5.2.2 Lämmön johtuminen komposiittimateriaalissa

Koska komposiittilevyt eivät ole homogeenisia, vaan niiden rakenne sisältää sellu- tai vuolukivipartikkeleita polymeerien seassa, eroaa levyjen lämmönjohtavuus myös homogeenisen materiaalin lämmönjohtavuudesta. Komposiittimateriaalien lämmönjohtavuudelle on tärkeää, että matriisin ja lisäaineen välisen rajapinnan vastus olisi mahdollisimman pieni. Lämmön johtumiselle tämän rajapinnan vastuksen vähentäminen voi monissa tapauksissa olla jopa tärkeämpää kuin komposiitin yksittäisen materiaalin hyvä lämmönjohtamiskyky. Rajapintaan luo vastusta, jos matriisin ja lisäaineen rajapinta on epätäydellinen. Epätäydellinen rajapinta johtuu pääasiallisesti siitä, etteivät matriisin ja lisäaineen pintojen muodot kohtaa toistensa kanssa, mikä haittaa lämpövuota materiaalien välillä. (Pathak, 2013, pp. 30-34.)

Pintojen erilaisuus voi johtua viallisesta polymeerin prosessoinnista. Pintojen erilaisuus voi johtua myös matriisin ja lisäaineen hyvin erilaisista tilavuuden lämpölaajenemiskertoimista, jolloin prosessoinnin jälkeen komposiitin jäähtyessä matriisin ja lisäaineen deformaatiot ovat erilaiset. Muita syitä pintojen erilaisuudelle on heikko mekaaninen sidos, epätäydellinen kemiallinen kiinnittyminen ja mahdolliset epäpuhtaudet matriisin ja lisäaineen välillä. (Pathak, 2013, pp. 30-34.)

5.2.3 Lämmön johtuminen koetilanteessa

Tässä kokeessa tarkasteltiin pääasiassa kolmea eri aineiden rajapintaa. Nämä rajapinnat ovat ledikortin ja komposiittilevyn välinen rajapinta, ledikortin ja ilman välinen rajapinta, sekä komposiittilevyn ja ilman välinen rajapinta.

Ilman lämmönjohtavuus on hyvin pieni 0,0262 W/m*K, mikä tekee ilmasta hyvän lämmöneristeen. Muiden kokeessa käytettyjen materiaalien lämmönjohtavuudet ovat moninkertaiset ilmaan verrattuna. Tästä syystä voidaan päätellä, että iso osa kokeessa tapahtuvasta lämmön johtumisesta tapahtuu ledikortin ja komposiittilevyn välillä. Toisaalta ympäröivä 60 °C:n lämpöinen ilma on huomattavasti viileämpää kuin noin 100 °C:n lämpöinen ledikortti ja vähän viileämpi komposiittilevy. Tämä lämpötilaero oletettavasti kiihdyttää lämmönjohtumista kiinteistä materiaaleista ilmaan. Koska koeympäristössä ilma ympäröi komposiittilevyä ja ledikorttia, on näiden kahden materiaalin rajapinnan pinta-ala ilmaan suuri. Myös tämä voi kasvattaa kiinteistä aineista ilmaan tapahtuvan lämpöenergian johtumisen määrää.

Vuolukiven lämmönjohtavuus on 6,4 W/m*K, kun taas sellun lämmönjohtavuus on vain 0,23 W/m*K. Vuolukivellä on siis paljon suurempi lämmönjohtavuus kuin sellulla. Tämän perusteella oletettiin, että vuolukivinäytteisiin siirtyisi ledikorteista suhteessa enemmän lämpöä kuin sellunäytteisiin, jolloin ledikortti jäähtyisi. Vuolukivilevyistä myös oletettavasti siirtyy suuren lämmönjohtavuuden takia paljon sellulevyjä enemmän lämpöä ympäröivään ilmaan, mikä jäähdyttää vuolukivilevyä. Näiden seikkojen perusteella oletettiin, että vuolukivi olisi soveliaampi runkomateriaali kuin sellu.

5.3 Lämpökapasiteetti

Kun kiinteää materiaalia lämmitetään, sen lämpötila kasvaa. Tällöin materiaaliin on siirtynyt tietty määrä energiaa. Lämpökapasiteetti kertoo materiaalin kyvyn sitoa lämpöenergiaa ympäristöstä itseensä. Mitä suurempi lämpökapasiteetti materiaalilla on, sitä enemmän ne tarvitsevat energiaa lämmitäkseen. (William D. Callister Jr, 2015, pp. 735-736.) Lämpökapasiteetin kaava on (Kaava 3):

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

missä:

C on lämpökapasiteetti (J/K)

dQ on energian muutos (J)

dT on lämpötilan muutos (K)

Kaava 3. Lämpökapasiteetin kaava (William D. Callister Jr, 2015, p. 735).

Ominaislämpökapasiteetti kuvaa, kuinka paljon lämpöenergiaa materiaaliin sitoutuu lämpötilaeroa ja massaa kohti. (William D. Callister Jr, 2015, pp. 735-736.)

Ominaislämpökapasiteetin kaava on (Kaava 4):

$$c = \frac{C}{m}$$

missä:

c on ominaislämpökapasiteetti (J/kg*K)

C on lämpökapasiteetti (J/K)

m on massa (kg)

Kaava 4. Ominaislämpökapasiteetin kaava (Lumen Learning, 2021).

Sellun ominaislämpökapasiteetti on 1300-1500 J/kg*K (Engineering ToolBox, 2001; Goodfellow, 2021), kun taas vuolukiven ominaislämpökapasiteetti on 785-980 J/kg*K (Engineering ToolBox, 2001; Tulikivi, 2020; Traditional Oven, 2021).

5.4 Terminen diffuusiokerroin

Terminen diffuusiokerroin kertoo sen, millä nopeudella lämpö jakaantuu kappaleen sisällä. Lämpö jakaantuu nopeasti sellaisten materiaalien sisällä, joilla on suuri

lämmönjohtavuus. Tiheissä materiaaleissa molekyylit ja atomit ovat tiheämmässä, mikä voi jarruttaa lämmön jakaantumista materiaalin sisällä. Suuri ominaislämpökapasiteetti myös jarruttaa lämmön jakaantumista materiaalin sisällä, sillä molekyylit ja atomit voivat varastoida enemmän lämpöenergiaa, ennen kuin ne haluavat luovuttaa sitä eteenpäin. (Boucher, 2019.)

Terminen diffuusiokerroin kuvaa materiaalin lämmönjohtavuuden suhdetta tilavuudelliseen ominaislämpökapasiteettiin. Kaava 5:n mukaisesti:

$$D_t = \frac{k}{\rho c_p}$$

missä:

D_t on termisen diffuusiokerroin (m^2/s)

k on materiaalin lämmönjohtavuus ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)

ρ on tiheys (kg/m^3)

c_p on ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)

Kaava 5. Termisen diffuusiokertoimen kaava (William D. Callister Jr, 2015, p. 749).

Materiaalit joiden termisen diffuusiokerroin on suuri, saavuttavat nopeasti ympäristön lämpötilan, koska niiden lämmönjohtavuus on suuri verrattuna ominaisuuslämpökapasiteettiin eli kykyyn varastoida lämpöä. Suuren diffuusiokertoimen omaavia materiaaleja suositaan jäähdytyslementteinä (Boucher, 2019). Sellun tiheys on $1420\text{--}1670 \text{ kg}/\text{m}^3$ (Kazuho Daicho, 2020), kun taas vuolukiven tiheys on $2980 \text{ kg}/\text{m}^3$ (Tulikivi, 2020). Seuraavaksi lasketaan vuolukiven ja sellun termiset diffuusiokertoimet:

Vuolukiven diffuusiokerroin:

Ominaisuuslämpökapasiteetiksi valitaan lähdearvojen ääripäiden $785\text{--}980 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ keskiarvo $882,5 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K}$.

$$D_t = \frac{k}{\rho c_p}$$

$$D_{t_{vuolukivi}} = \frac{6,4 \text{ W/m} \cdot \text{K}}{2980 \text{ kg/m}^3 \cdot 882,5 \text{ J/kg} \cdot \text{K}}$$

$$D_{t_{vuolukivi}} = 0,0000024335 \dots \text{m}^2/\text{s}$$

$$D_{t_{vuolukivi}} \approx 2,4 \text{ mm}^2/\text{s}$$

Sellun diffuusiokerroin:

Tiheydeksi valitaan lähdearvon 1420-1670 kg/m³ keskiarvo 1545 kg/m³.

Ominaisuuslämpökapasiteetiksi valitaan lähdearvojen 1300-1500 J/kg*K keskiarvo 1400 J/kg*K.

$$D_t = \frac{k}{\rho c_p}$$

$$D_{t_{sellu}} = \frac{0,23 \text{ W/m} \cdot \text{K}}{1545 \text{ kg/m}^3 \cdot 1400 \text{ J/kg} \cdot \text{K}}$$

$$D_{t_{sellu}} = 0,00000010633 \dots \text{m}^2/\text{s}$$

$$D_{t_{sellu}} \approx 0,11 \text{ mm}^2/\text{s}$$

Laskujen mukaan vuolukiven diffuusiokerroin (2,4 mm²/s) on moninkertaisesti sellun diffuusiokerrointa (0,11 mm²/s) suurempi. Tämän perusteella vuolukivilevy olisi parempi jäähdytyslementtinä verrattuna sellulevyyn.

.

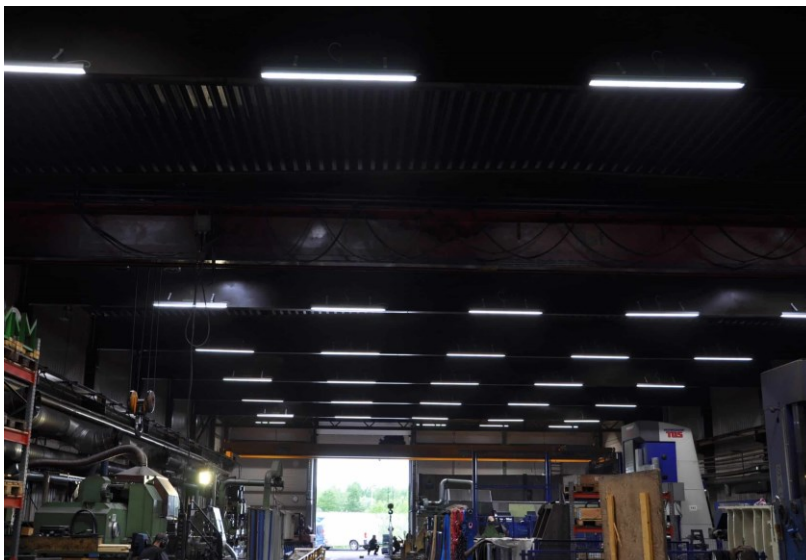
6 LÄMPÖTILAMITTAUKSET

Lämpötilamittausten tavoitteena oli saada selville, mitkä komposiittimateriaalit soveltuisivat parhaiten valaisinmateriaaliksi termisten ominaisuuksiensa puolesta. Oletuksena ennen mittauksia oli, että eri materiaaleista tehdyt levyt johtaisivat eri tavalla lämpöä, mikä vaikuttaisi ledikortin lämpötiloihin ja voisi johtaa ledien ylikuumenemiseen.

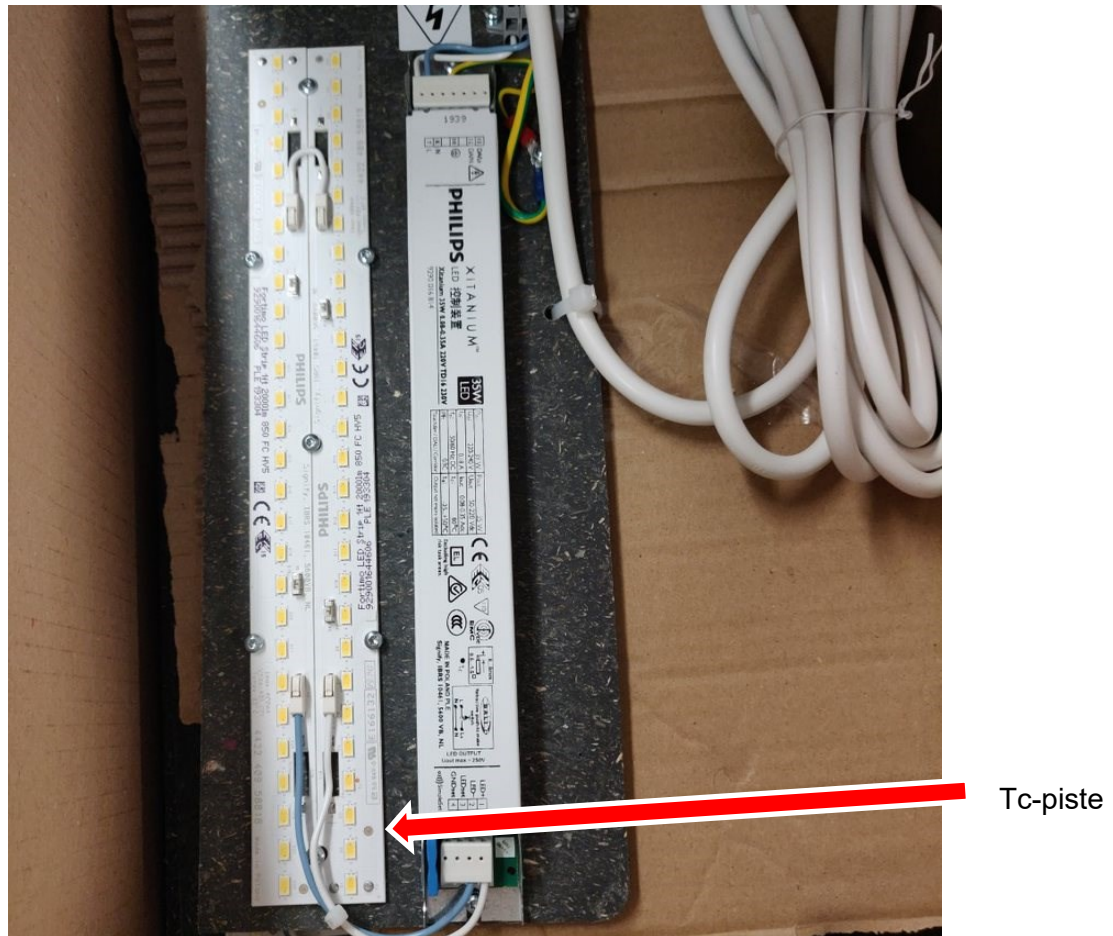
Lämpötilamittausten tavoitteena tässä työssä oli mahdollisimman tarkasti simuloida todellisia olosuhteita. Lämpötilamittaukset suoritettiin standardia IEC 60598-1 soveltamalla (International Standard 60598-1, 2014, pp. 95-109).

6.1 Koejärjestelyt

Koetilanteessa haluttiin simuloida todellisen ympäristön ääriolosuhteita, mitä valaisimet voisivat todellisuudessa joutua kestäämään. Tämä tarkoitti ympäröivän lämpötilan pitämistä 60 °C:ssa. Tätä lämpötilaa voitaisiin lähestyä todellisuudessa esimerkiksi teollisuushalleissa (Kuva 9). Koeolosuhteiden simulointi tarkoitti myös, että ledikortit olivat kiinnitettynä komposiittilevyihin (Kuva 10).

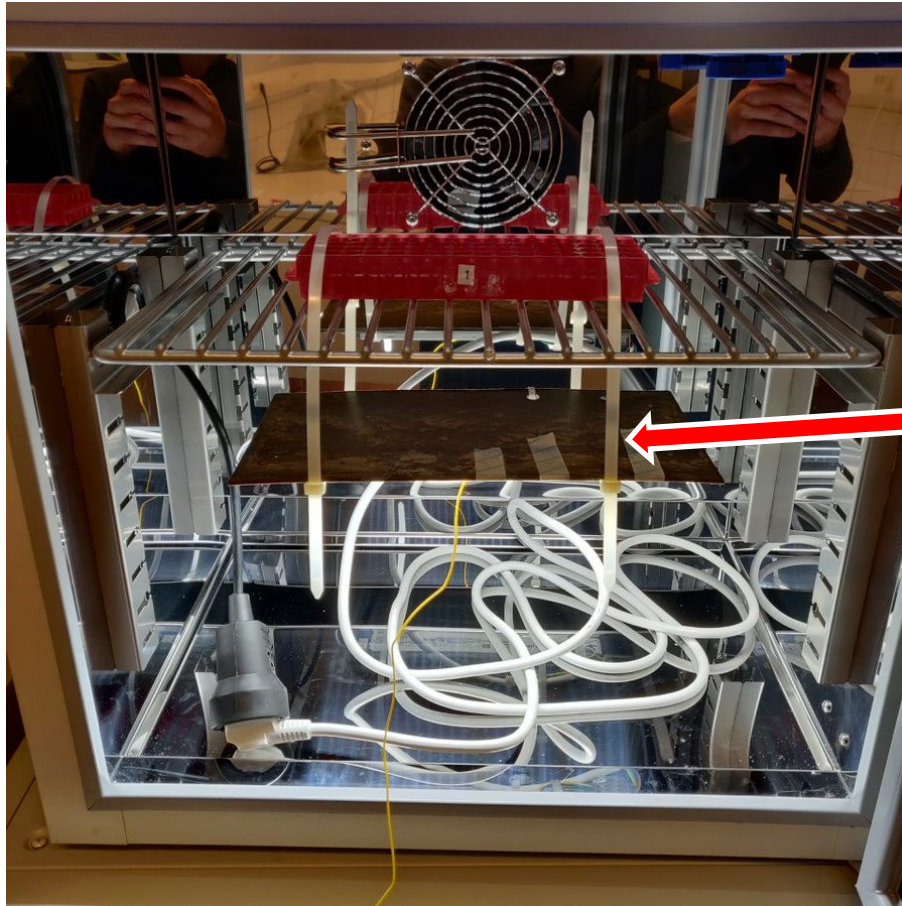


Kuva 9. Valaisimia teollisuushallissa (Ad Lux Oy, 2020).



Kuva 10. Ledikortti ja virtalähde kiinnitettynä komposiittilevyyn.

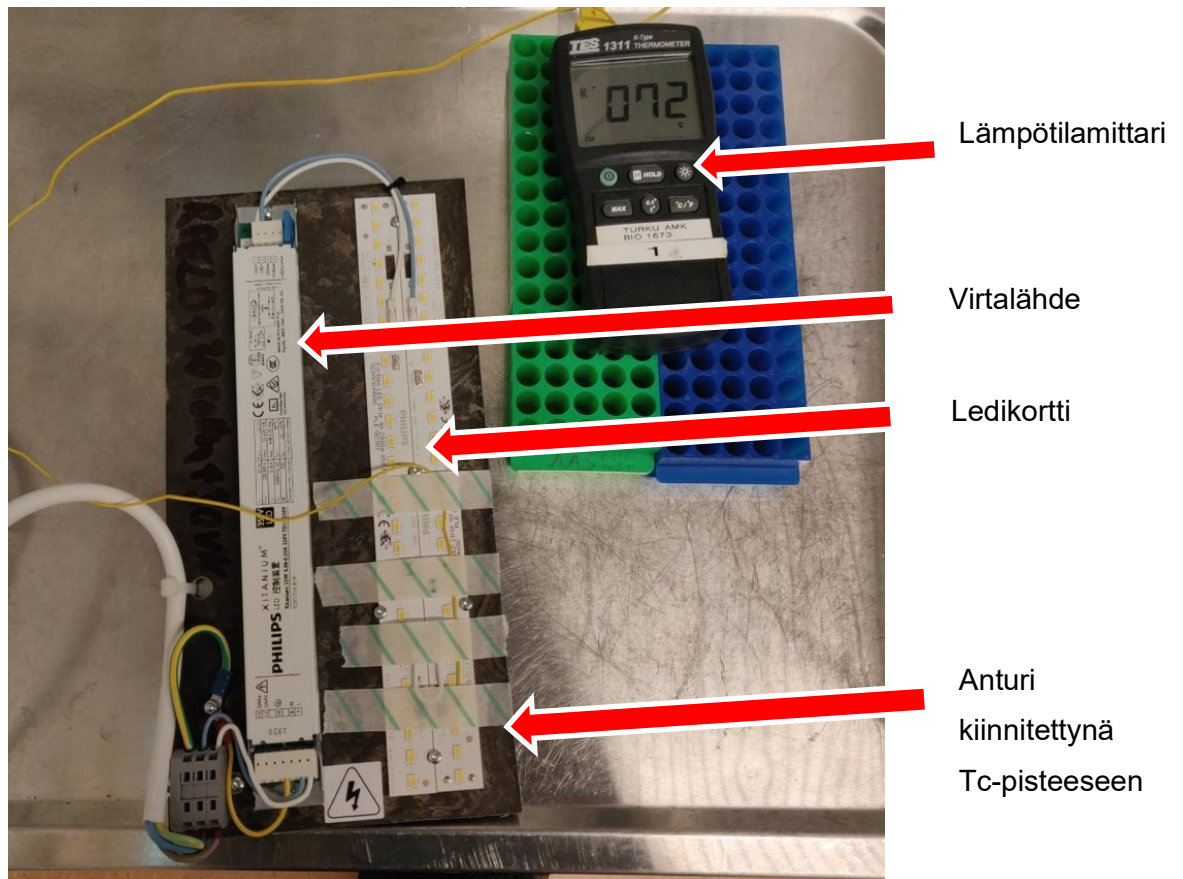
Levyt myös käännettiin ylösalaisin, jolloin ledit loistivat kohti maata ja niistä kohoava lämpö kohtaisi komposiittilevyn kuten todellisissa valaisimissa (Kuva 11). Levyt ripustettiin roikkumaan ilmaan nippusiteiden varaan, jotta ledikorteista ei haihtuisi lämpöä muualle kuin kiinnitettyyn komposiittilevyyn ja ympäröivään ilmaan.



Komposiittilevy
ylösalaisin
inkubointi-
kaapissa

Kuva 11. Koejärjestelyt inkubointikaapissa.

Mittaukset suoritettiin VWR Incu-Line 68R inkubointikaapissa. Mittaukset suoritettiin käyttämällä TES 1311 K-Type lämpötilamittaria, mihin oli kiinnitetty termoparianturi. Jokaisesta materiaalityypistä mitattiin kolme rinnakkaismittausta. Näytteitä mitattiin 90 min ajan 60 °C:ssa. Anturi kiinnitettiin teipillä ledikorttien Tc-pisteeseen mittausten ajaksi (Kuva 12). Standardin EN 61347-1:2008 Lamp controlgear - Part 1: General and safety requirements mukaan Tc-lämpötilalla viitataan korkeimpaan sallittuun lämpötilaan, kun se mitataan ledikorttiin merkitystä Tc-pisteestä (Tridonic, 2018).



Kuva 12. Lämpömittari ja anturi kiinnitettynä ledikortteihin.

Jokaista näytettä mitattiin vain kerran yhden päivän aikana, jotta levyt ehtisivät jäähtyä mittausten välillä huoneenlämpöön.

6.2 Esitestit

Esitestien tavoitteena oli löytää optimaaliset mittaolosuhteet, mitkä mahdollisimman tarkasti simuloisivat todellisia valaisimiin vaikuttavia olosuhteita. Tämä tarkoitti kaikenkaltaisten virhetekijöiden minimoimista. Esitesteissä saatiin esimerkiksi selville, minkälaista teippiä käyttää mittausten aikana, jotta anturi pysyisi kiinni koko lämmityksen ajan.

Esitestien tavoitteena oli myös löytää oikeanpituisen lämmitysaika. Lopulta päädyttiin 90 min lämmitysaikaan. 90 min lämmityksen jälkeen ledin ja levyn lämpötilat eivät enää muuttuneet merkittävästi.

7 TULOKSET JA POHDINTAA

Neljästä eri näytteestä mitattiin kolme rinnakkaimittausta, eli yhteensä 12 mittausta. Lisäksi mittauksista määritettiin keskiarvo, keskihajonta ja vaihteluväli. Tuloksissa kierrätetystä PP:stä ja PE-LD:stä tehtyihin komposiitilevyihin viitataan lyhenteillä RPP ja PE-LD.

7.1 Mittaustulokset

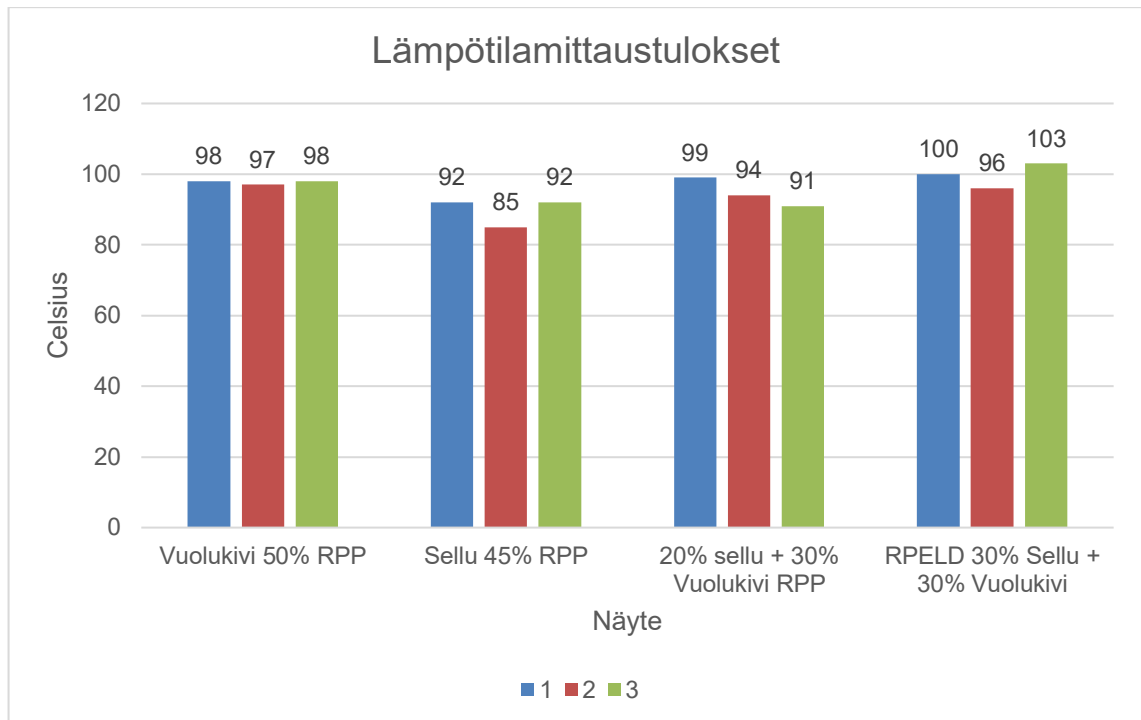
Kaikkien muiden mittausten vaihteluväli ja keskihajonta olivat suuria, paitsi näytteen Vuolukivi 50% + RPP kohdalla (Taulukko 1).

Kokeiden mittaustulokset olivat seuraavanlaiset:

Taulukko 1. Lämmönjohtavuusmittausten tulokset.

Näyte:	1	2	3	Keskiarvo	Keskihajonta	Vaihteluväli
Vuolukivi 50% RPP	98	97	98	98	0,5	1
Sellu 45% RPP	92	85	92	90	3,3	7
20% sellu + 30% Vuolukivi RPP	99	94	91	95	3,3	8
RPE-LD 30% Sellu + 30% Vuolukivi	100	96	103	100	2,9	7

Lämpötiloja vertailtaessa selkeästi alhaisimmat lämpötilat mitattiin ledikorteista silloin, kun ne olivat kiinni pelkästään sellua sisältävissä näytteissä. Kaikki muut näytteet sisälsivät vuolukiveä, ja niissä kiinni olleista ledikorteista mitatut lämpötilat olivat huomattavasti korkeampia (Kuvio 1). Näiden tulosten perusteella vuolukiveä sisältävät komposiittimateriaalit aiheuttavat korkeampia lämpötiloja kiinnitetyille ledikorteille kuin pelkästään sellua sisältävät komposiittimateriaalit.



Kuvio 1. Lämmönjohtavuusmittausten tulokset.

7.2 Tulosten virhetarkastelu

Lämpötilamittari TES 1311 K-Type:n mittatarkkuus oli mittauksessa noin $\pm 1,1$ °C.

Mittauksissa vaikutti useampi tekijä, mitkä vaikuttavat tulosten luotettavuuteen. Inkubointikaapin ilmakierto puhalsi kohti näytettä ja anturia, mikä on aiheuttanut todellista alhaisempien lämpötila-arvojen mittauksen. Tämä ei todennäköisesti kuitenkaan vaikuta tulosten keskinäiseen vertailukelpoisuuteen.

Tulosten keskinäiseen vertailukelpoisuuteen on todennäköisesti vaikuttanut ilmankosteuden imeytyminen näytteisiin mittausten välillä puutteellisten säilytystilojen takia. Tämä voi selittää suuria vaihteluvälejä useimpien rinnakkaisnäytteiden välillä. Ilmankosteuden imeytyminen on todennäköisesti myös vaikuttanut enemmän sellua sisältäviin näytteisiin kuin vain vuolukiveä sisältävään näytteeseen.

Mittausten luotettavuuten vaikuttaa myös se, ettei lämpökaapin lämmitystä aloitettu joka kerta huoneenlämmöstä. Neljän mittauksen kohdalla lämpökaapin lämmitys 60 °C:een aloitettiin noin 40 °C:sta. Tämä on johtanut siihen, että näiden näytteiden ledit ovat

mahdollisesti olleet päällä lyhyemmän aikaa verrattuna muihin näytteisiin johtuen lämpökaapin nopeammasta lämpenemisestä. Tämä on voinut alentaa ledikortista mitattua lämpötilaa suhteessa muihin näytteisiin. Nämä neljä näytettä missä tämä on voinut vaikuttaa ovat Sellu 45 % RPP:n rinnakkaisnäytteet 1. ja 2. sekä 20 % & 30% vuolukivi RPP:n rinnakkaisnäytteet 2. ja 3.

7.3 Mittaustulosten pohdintaa

Materiaaleihin imeytynyt kosteus on todennäköisesti vaikuttanut suuresti mittaustuloksiin. Vedellä on huomattavan suuri ominaislämpökapasiteetti (4157 J/kg*K 20 °C:ssa). Tämä tarkoittaa, että iso osa komposiittilevyihin kohdistuneesta lämpöenergiasta on kulunut komposiittilevyihin imeytyneen kosteuden lämmittämiseen ja haihduttamiseen. Tämä on vaikuttanut sellukomposiitteihin enemmän kuin vuolukivikomposiitteihin, koska sellu imee kosteutta paremmin. Tällöin sellukomposiittilevyt olisivat lämmenneet vähemmän suhteessa vuolukivilevyihin, kun osa niihin kohdistuneesta energiasta olisi mennyt veden lämmittämiseen ja haihduttamiseen.

Sellu, PP ja PE-LD ovat kaikki polymeerejä, jolloin niiden rakenne on hyvin samanlainen. Vuolukiven rakenne taas eroaa huomattavasti näistä materiaaleista, jolloin sen ominaisuudetkin kuten lämpölaajeneminenkin ovat hyvin erilaiset. Nämä erot materiaalien ominaisuuksissa oletettavasti heikentävät huomattavasti komposiitin matriisin ja lisäaineen välistä rajapintaa, kun taas sellun ja samankaltaisuudet PP:n ja PE-LD:n kanssa parantavat sitä. Nämä erot rajapinnoissa vaikuttaisivat merkittävästi lämmön johtuvuuteen materiaaleissa. Vain 10%:n lisäys komposiitin materiaalien rajapinnan vastuksessa voi vähentää poikittaisuuntaista lämmönjohtavuutta komposiitissa 50 %:lla. (Pathak, 2013, p. 30.) Tämä on todennäköisesti pääsyy lämpötilaeroille mittauksista sellulevyjen ja vuolukivilevyjen välillä.

Toinen tekijä eroille voi johtua siitä, että mittausympäristön ilman lämmittäminen 60 °C:een ennen mittauksien suorittamista on vaikuttanut merkittävästi mittaustuloksiin. Ympäröivä ilma on luultavasti lämmentänyt vielä lisää kiinteistä kappaleista tapahtuneen lämmönjohtumisen seurauksena. Koska ilman ja kiinteiden materiaalien lämpötilaero oli niin pieni, tämä hidasti huomattavasti lämmön johtumista komposiittilevystä ympäröivään ilmaan. Tällöin merkittäväksi tekijäksi nousi lämmönjohtumisen lisäksi ominaislämpökapasiteetti. Koska sellun ominaislämpökapasiteetti on huomattavasti

vuolukiveä suurempi, ovat sellua sisältävät levyt todennäköisesti varastoineet lämpöenergiaa suurempia määriä kuin vuolukiveä sisältävät levyt. Tämän seurauksena sellulevyn lämpötila kasvoi vuolukiveä hitaammin. Vuolukivilevyn korkeampi lämpötila taas johti siihen, että lämmön johtuminen ledikortista vuolukivilevyyn on hidastunut. Tällöin sellulevyyn on suhteellisesti johtunut enemmän lämpöenergiaa, mikä lopulta johti sellulevyn alhaisempiin mittaustuloksiin.

Muovilaatujen välillä on myös lieviä eroja. RPE-LD-mittauksissa mitatut lämpötilat olivat keskimääräisesti korkeampia, kuin mistään RPP-mittauksesta mitatut lämpötilat. PE-LD:n lämmönjohtavuus on $0,33 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ ja ominaislämpökapasiteetti on $1900\text{--}2300 \text{ J/kg}^{\circ}\text{K}$, kun taas PP:n lämmönjohtavuus on $0,1\text{--}0,22 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ ja ominaislämpökapasiteetti on $1920 \text{ J/kg}^{\circ}\text{K}$. Nämä luvut vaihtelevat muoviblendistä riippuen, ja toimivat tässä vain arvioina. Varsinkin, koska muovit ovat kierrätettyjä, niiden ominaisuudet voivat olla normaalia arvaamattomampia. Luvun aikaisemman pohdinnan perusteella koskien materiaalien lämmönjohtavuutta ja ominaislämpökapasiteetia, PE-LD-levyjen pitäisi aiheuttaa ledikortille hieman alhaisemmat lämpötilat kuin RPP-levyjen. Muovilaatujen erot ovat kuitenkin pieniä, ja kierrätysmuovien mahdolliset laatuvariaatiot ja vain kolme RPE-LD-mittausta verrattuna yhdeksään RPP-mittaukseen aiheuttavat epäluotettavuutta muovilaatujen väliseen vertailuun.

8 YHTEENVETO

Työssä tutkittiin komposiittimateriaalien soveltuvuutta valaisinmateriaaliksi. Tutkimuksen kohteena oli polypropeenista- ja pientiheyspolyeteenistä valmistettuja komposiittilevyjä, jotka sisälsivät lisäaineena sellua, vuolukiveä tai molempia näitä materiaaleja. Työn tarkoituksena oli selvittää, miten nämä komposiittimateriaalit soveltuisivat valaisinmateriaaliksi termisten ominaisuuksien puolesta. Tämä tapahtui lämmittämällä komposiittilevyä lämpökaapissa, samalla kun komposiittilevyyn kiinnitetty ledikortti oli kytketty päälle. Kun 90 min mittausaika oli päättynyt, kirjattiin ledikortin lämpötila ylös lämpötilamittarista, jonka lämpötila-anturi oli kiinnitetty ledikorttiin.

Mittauksissa esiintyneiden useiden virhetekijöiden takia mittaustulokset eivät ole vertailukelpoisia muissa koeympäristöissä tehtyjen mittaustulosten kanssa. Tästä syystä tuloksia ei voida verrata esimerkiksi ledikorttien valmistajan suorittamiin mittauksiin. Mittaustulokset ovat silti keskenään vertailukelpoisia.

Mittaustulosten perusteella termisten ominaisuuksensa puolesta sopivin valaisimen runkomateriaali on 45% sellua sisältänyt RPP-komposiitti. Tämä ei vastaa alkuperäisiä odotuksia, joissa vuolukiveä pidettiin sopivimpana runkomateriaalina sen paljon sellua korkeamman lämmönjohtavuuden takia. Kuitenkin ledikortit lämpenivät vähiten niiden ollessa kiinni siinä komposiittilevyssä, mikä ei sisältänyt ollenkaan vuolukiveä. Todennäköinen syy tälle tulokselle on komposiittilevyjen sisältämän kosteuden vaikutus mittaustuloksiin.

RPP- ja RPE-LD-muovien välillä havaittiin mittaustuloksissa lieviä eroja, mitkä suosivat RPP:tä valaisinmateriaalina. Epäluotettavuustekijöiden takia tästä ei kuitenkaan voi tehdä kovin suuria johtopäätöksiä.

Mahdolliset jatkotutkimukset aiheesta valottaisivat mahdollisesti laajemmin testattujen materiaalien soveltuvuutta valaisinkäyttöön. Esimerkiksi veto- ja taivutustestit ja niiden tulokset voisivat kertoa enemmän materiaalien lopullisesta soveltuvuudesta. Myös materiaalien viruman testaus voisi auttaa materiaalin soveltuvuuden määrittämisessä. Tulosten luotettavuutta voisi parantaa se, että näytteet pystyttäisiin ilmastoimaan oikeanlaisissa säilytystiloissa. Tämä voisi huomattavasti pienentää mahdollista ilmakehän kosteuden imeytymistä näytteisiin.

LÄHTEET

Ad Lux Oy, 2020. *Tuotteet; Ad Lux Oy*. [Online]

Available at: <https://adlux.fi/kaikki-tuotteet/>

[Haettu 2020].

A-Level Biology, 2020. *Cellulose*. [Online]

Available at: <https://alevelbiology.co.uk/notes/cellulose/>

[Haettu 2020].

Bommel, W. v., 2013. *Luminaires*, New York: Springer science+Business Media.

Boucher, C., 2019. *Thermal diffusivity - An overview*. [Online]

Available at: <https://thermtest.com/thermal-diffusivity-overview>

Engineering ToolBox, 2001. *Specific Heat of some common substances*. [Online]

Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html

[Haettu 2021].

Goodfellow, 2021. *Cerrulose material information*. [Online]

Available at: <http://www.goodfellow.com/E/Cellulose.html>

[Haettu 2021].

International Standard 60598-1, I., 2014. *International Standard 60598-1 Luminaires - General requirements and tests*, s.l.: IEC.

Kazuho Daicho, K. K. S. F. a. T. S., 2020. *Crystallinity-Independent yet Modification-Dependent True Density of Nanocellulose*, s.l.: ACS Biomacromolecules.

Lumen Learning, 2021. *Boundless Physics*. s.l.:Pressbooks.

Mishra, S., 2018. A look at the most preferred materials for LED light housings.

Muoviteollisuus Ry, 2020. *Komposiitit - Loputtomasti mahdollisuuksia*, s.l.: s.n.

Muoviteollisuus Ry, 2021. *Muovisanastoa*. [Online]

Available at: <https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/sanasto/>

[Haettu 2021].

OpenStax, 2016. *Chemistry*. s.l.:OpenStax CNX.

Pathak, S. V., 2013. *Enhanced Heat Transfer in Composite Materials*, s.l.: Ohio University.

Specialchem, 2020. *Polyethylene*. [Online]

Available at: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-plastic>

[Haettu 2020].

Specialchem, 2020. *The Definitive Guide to Polypropylene*. [Online]

Available at: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polypropylene-pp-plastic>

[Haettu 2020].

Thermal engineering, 2021. *Thermodynamics*. [Online]
Available at: <https://www.thermal-engineering.org/main-menu/>
[Haettu 2021].

Thermal Engineering, 2021. *What is Thermal Resistance*. [Online]
Available at: <https://www.thermal-engineering.org/what-is-thermal-resistance-thermal-resistivity-definition/>
[Haettu 2021].

Traditional Oven, 2021. *Soapstone technical data*. [Online]
Available at: <https://www.traditionaloven.com/articles/691/soapstone-data-info>
[Haettu 2021].

Tridonic, 2018. *Technical Information - t and t Temperature for Controlgear*. [Online]
Available at:
https://www.tridonic.com/com/en/download/technical/Technical_Information_ta_and_tc_Temperature_for_Controlgear_en.pdf
[Haettu 2021].

Tulikivi, 2020. *Soapstone*. [Online]
Available at: <https://www.tulikivi.com/en/tulikivi/Soapstone>
[Haettu 2020].

William D. Callister Jr, D. G. R., 2015. *Materials Science and Engineering*. s.l.:Wiley.

