

**PALOLUOKITELLUN MDF-LEVYN SOVELTUVUUS
LASERIN RUNKOMATERIAALIKSI**

Haaparanta Arto

Opinnäytetyö
Tekniikan ja liikenteen ala
Konetekniikan koulutusohjelma
Insinööri (AMK)

2017

Tekniikan ja liikenteen ala
Konetekniikan koulutusohjelma
Insinööri (AMK)

Tekijä	Arto Haaparanta	Vuosi	2017
Ohjaaja	TkL Lauri Kantola		
Toimeksiantaja	Puusepäntiike Ari Karvo		
Työn nimi	Paloluokitellun MDF-levyn soveltuvuus laserin runkomateriaaliksi		
Sivu- ja liitesivumäärä	38 + 4		

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, voidaanko paloluokiteltua MDF-levyä käyttää laserin runkomateriaalina. Levyn käytöllä haluttiin vaikuttaa rungon valmistuskustannuksiin, myös laitteen koko pystyttäisiin päättämään itse. Työn perustana toimi laserdioditekniikalla toteutettu PLH3D 6W laser. Materiaalitutkimus suoritettiin vertaamalla paloluokiteltua ja käsittelemätöntä MDF-levyä.

Työssä keskityttiin tutkimaan laserin ja materiaalien mahdollisia paloturvallisuusriskejä unohtamatta työturvallisuutta laserin suuren tehon vuoksi. Työssä kohdatiin ongelmia materiaalin lämpötilamittauksissa, jonka myötä materiaalin tutkiminen toteutettiin lasersäteiden läpäisyajan mittauksina. Läpäisyajan tutkiminen toteutettiin piste- ja hajasäteilymittauksina, joiden avulla saatiin tietoa paloprosessin etenemisestä materiaaleissa ja laserin materiaalin läpäisyajat.

Pistesäteilyn analysoinnissa paloluokitellun ja käsittelemättömän MDF-levyn välillä havaittiin raja-arvot, joiden jälkeen materiaalit alkoivat käyttäytyä samalla tavalla. Hajasäteilyn analysoinnissa pystyttiin toteamaan laserin omaavan läpäisykyvyn, vaikka läpäisy aika onkin moninkertainen verrattuna pistesäteilyyn.

Tulokseksi saatiin, että käsittelemätöntä MDF-levyä ei voi käyttää laserin runkomateriaalina suuren paloturvallisuusrisikin vuoksi. Paloluokiteltu MDF-levy ei käy paljaana laserin runkomateriaaliksi hajasäteilyn polttavan ominaisuuden vuoksi. Ratkaisuna tähän suositellaan alumiinilevyn laminoitua paloluokitellun MDF-levyn pintaan laserkammion sisäpintoihin, jotka toimisivat suojakerroksena.

Avainsanat laserit, säteily, kuitulevyt, paloturvallisuus, säteilyturvallisuus, lämpötila
Muita tietoja Liite 4 Video materiaalin läpäisyajamittauksista

Technology, Communication and
Transport.
Mechanical and Production Engi-
neering
Bachelor of Engineering

Author	Arto Haaparanta	Year	2017
Supervisor	Lauri Kantola, Lic.Sc		
Commissioned by	Puusepäntiike Ari Karvo		
Subject of thesis	Fire resistant MDF board applicability for laser frame material		
Number of pages	38 + 4		

The objective of this thesis was to determine if a fire resistant MDF board could be used as a laser frame material. By using fibreboard the main goal was to affect the manufacturing costs and the size of machine could also be decided. The thesis is based on laser diode technology made with the laser unit PLH3D 6W. Material examination was concluded by comparing fire resistant and untreated MDF board.

A thesis concentrated on studying what possible fire hazards the laser and the used materials could cause and not forgetting work safety because of the high power of the laser. A thesis came across problems in the material temperature readings. For this reason, the material examination was done by measuring the penetration time of the laser beams through the material. The penetration time measurements of the laser beams were done in a focused and scattered beam forms which gave data about the scorching process development through the material and materials penetration times.

When analyzing focused beam on fire resistant and untreated MDF board there was a threshold value found in both materials. After having reached the threshold values the materials started behaving the same way. After analyzing the scattered beam it was discovered that the laser has a penetration power even though it is multiple times longer compared to the focused beam.

Based on the results, untreated MDF board cannot be used as a laser frame material, because of a high fire hazard risk. The fire resistant MDF board does not work as a plain laser frame material, because of the burning effect of the scattered beam. Suggested solution for this is that the aluminum plate is laminated on fire resistant MDF board surface on all the inside surfaces of the burning chamber of the lasers to work as a protective layer.

Key words	laser, radiation, fiberboard, fire safety, radiation safety, temperature
Special remarks	Appendix 4 includes video of material's penetration time measurements

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	LASERKAIVERRUS	9
2.1	Laser.....	9
2.2	Laser ja työturvallisuus	10
2.3	Laserin tehon määrittäminen.....	12
2.4	Laserkaiverrus menetelmänä.....	13
3	TUTKITTAVA MATERIAALI	16
3.1	MDF.....	16
3.2	Paloluokitus	17
3.3	Paloluokiteltu MDF.....	17
4	LÄMPÖTILAN MITTAUSMENETELMÄ	19
4.1	Mittausvälineistö	19
4.2	Mittausten suunniteltu toteutus	20
4.3	Suunnitellussa toteutuksessa kohdatut ongelmat	21
4.4	Laserin tuottaman lämpötilan mittaus	24
4.5	Lämpötilan mittauksissa havaittu ongelma	25
5	LASERSÄTEEN LÄPÄISYAJAN TUTKIMUSMENETELMÄ	26
5.1	Lasersäteen läpäisyajan mittauksen suunniteltu toteutus.....	26
5.2	Lasersäteen läpäisyajan mittausvälineistö.....	26
6	LASERSÄTEEN LÄPÄISYAIKOJEN MITTAUS JA ANALYSOINTI	28
6.1	Pistesäteily – Käsittämätön MDF	28
6.2	Pistesäteily – Paloluokiteltu MDF.....	29
6.3	Pistesäteily – Käsittämätön MDF vs Paloluokiteltu MDF.....	30
6.4	Hajasäteily – Käsittämätön MDF.....	31
6.5	Hajasäteily – Paloluokiteltu MDF	32
6.6	Hajasäteily – Käsittämätön MDF vs Paloluokiteltu MDF	32
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	33
8	POHDINTA.....	35
	LÄHTEET.....	36

LIITTEET38

ALKUSANAT

Työstä kuuluu suuri kiitos PSL Ari Karvolle, joka mahdollisti tämän opinnäytetyön tekemisen. Suuri kiitos kuuluu myös OPT Lasersin toimitusjohtaja Mateusz Szymańskille, joka sponsoroi laseryksikön työtä varten.

Big thanks to PSL Karvo, who made this thesis possible and big thanks to OPT Lasers' CEO Mateusz Szymański who sponsored the laser unit for the thesis.

Rovaniemellä 5.5.2017

Arto Haaparanta

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
MDF	Medium Density Fiberboard
CE	CE-merkintä on valmistajan ilmoitus siitä, että tuote täyttää sitä koskevat Euroopan unionin vaatimukset (TUKES 2017)
FPS	Frame Per Second eli kuinka monta kuvaa videossa näytetään sekunnin aikana

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty puusepäntehtävällä Ari Karvolle. Työssä selvitetään, voidaan laserkaivertimen runkorakenteissa käyttää paloluokiteltua MDF-levyä. MDF-levyä hyödyntämällä laserkaivertimen runko voitaisiin rakentaa itse, jolloin laitteen valmistuskustannukset saataisiin alas ja kaiverruspinta-ala suureksi. Kaupalliset tuotteet ovat usein kalliita ja niissä on pieni kaiverruspinta-ala. Kaupalliset laitteet hyödyntävät yleensä kaasulaseria, joiden käyttöikä on noin 1500 - 3000 h. Tässä työssä tarkastellaan laserdiodia, jolla saavutetaan noin 10 000 h:n käyttöikä.

Työn perusteena on laserdiodin huomattavasti pienempi teho verrattuna kaasulasereihin, minkä oletetaan mahdollistavan erilaisten runkomateriaalien käytön. Erilaista runkomateriaalia ja lasertekniikkaa käyttämällä voidaan vaikuttaa kaiveruslaserin valmistuskustannuksiin ja kokoon johtuen puuntyöstökeskuksien suuremmasta työstöpinta-alasta, joka mahdollistaa suurempien runkorakenteiden työstämisen edullisesti.

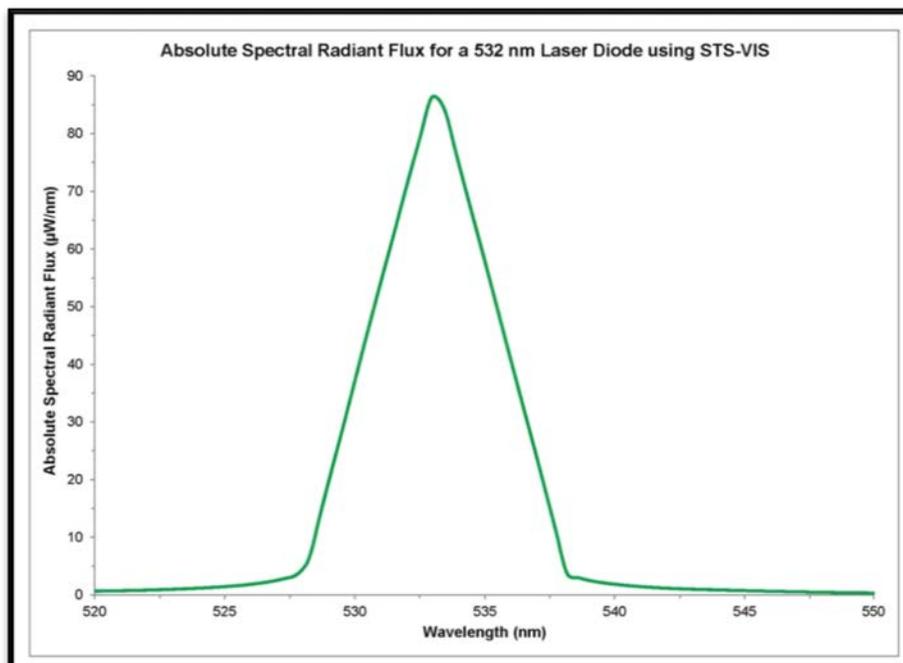
Työssä keskitytään tarkastelemaan MDF-levyn käyttöön liittyviä paloturvallisuusriskejä. Työssä käytetty laser on teholtaan 6 W ja aallonpituudeltaan 445 nm. Laserin teho riittää hyvin puun kaivertamiseen. Suurehkon tehon vuoksi työturvallisuuteen on panostettava. Työ toteutetaan kokeellisena tutkimuksena, jossa verrataan tutkittavan materiaalin palokäyttäytymistä ja laserin läpäisykykyä vertailumateriaaliin, joka on käsittelemätön MDF. Työ rajataan siten, että laserin elektronisiin, optisiin ja mekaanisiin ratkaisuihin ei puututa. Työssä keskitytään ainoastaan materiaalin tutkimiseen edellä mainittua käyttötarkoitusta varten.

2 LASERKAIVERRUS

2.1 Laser

Laser on Gordon Gouldin patentoima keksintö vuodelta 1959. Laser on laite, joka tuottaa koherentin yhden aallonpituuden sisältävän valonsäteen. Koherentissa valossa aallonpituus, -taajuus ja -suunta ovat vakioita. Laserin tuottaman valonsäteen aallonpituus vaikuttaa laserin käyttötarkoitukseen ja ominaisuuksiin. (American Institute of Physics 2017; Oregon State University 2017; Lawrence Livermore National Laboratory 2017.)

Mitä alhaisempi aallonpituus on, sitä enemmän energiaa säde pitää sisällään. Tämän vuoksi lasereissa suositaan alle 1200 nm:n aallonpituuksia paremman teho-hyötysuhteen saavuttamiseksi. Laserien tuottama valo sisältäisi ideaalita-pauksessa vain yhtä aallonpituutta, mutta käytännössä se sisältää myös pääaal-lonpituudelle läheisiä aallonpituuksia, jotka ovat huomattavasti pienempitehoisia verrattuna pääaallonpituuteen tehoon. Kuviossa 1 esitetään laserista mitattu spektri, eli aallonpituuksien jakautuminen suhteessa laserin tuottamaan tehoon. Spektristä käy ilmi läheisten aallonpituuksien teho.



Kuvio 1. 532 nm laserdiodin mitattu aallonpituus suhteessa tehoon (Ocean Optics 2017)

Lasereita on yleisesti neljää eri päätyyppiä: kaasu-, kuitu-, puolijohde- ja elektroniset laserit. Päätyyppien suurimmat erot liittyvät toimintaperiaatteeseen, aallonpituuteen ja niiden tuottamaan tehoon. Kaasu- ja kuitulaserit ovat yleisesti käytössä teollisuudessa johtuen niiden tuottamasta suuresta tehosta, jota käytetään esimerkiksi teräksen leikkaamiseen. Puolijohde- ja elektroniset laserit ovat käytössä lääke- ja elektroniikkateollisuudessa. (Paschotta 2017.)

2.2 Laser ja työturvallisuus

Laserit eivät ole leluja, joten esimerkiksi puutteellinen suojaus tai väärinkäyttö voivat aiheuttaa pahoja silmä- ja ihovammoja. Laserien vaarallisuuden vuoksi laserit jaetaan laserluokkiin vaarallisuusasteen mukaan. Laserluokan tulee olla merkittynä laitteeseen. Mitä suurempi laserluokka sitä vaarallisempi laser on. Laserluokkia ovat: 1, 1M, 1C, 2, 2M, 3R, 3B ja 4. (STUK 2017.)

Laserluokka 4 sisältää laserit, joiden teho ylittää kaikki muut laserluokat. Laserluokka 4:llä ei ole tehoissa ylärajaa, minkä vuoksi kaikki tämän luokan laserit ovat vaarallisia ja voivat aiheuttaa silmävaurion jo pelkästään hajasäteilyllä. Luokan 4 lasereita käytetään yleensä metallin leikkaamisessa ja laserkirurgiassa. Laserluokka 4 on tämän opinnäytetyön kannalta tärkein, koska tutkimuksessa käytettävä laser on 4-luokan väline. (STUK 2017.)

Mikäli kyseessä on pienitehoinen laser, sen tuottamalta säteeltä tai hajasäteilyltä voidaan suojautua CE-sertifioitujen ja ANSI Z136.1- tai EN-207 -standardin mukaan suunniteltujen suojalasiavun avulla. ANSI Z136.1- tai EN-207 -standardi määrittelee, kuinka lasersuojalasiavun turvalliset suojakertoimet lasketaan käytössä olevalle laserille. Laser Institute of America tarjoaa sivuillaan ANSI Z136.1:n mukaan tehdyt laskurit suojaustason määrittämiseen. Kuviossa 2 esitetään jatkuvalle laserisäteelle olevaa laskuria. Kyseistä laskuria on käytetty tässä työssä tarpeellisen suojaustason määrittämisessä. Lisäksi myös sertifioituja lasersuojalaseja myyvät yritykset tekevät laskelmia kyseisen standardin perusteella asiakkaan pyynnöstä. Laserin tehon ylittäessä ANSI Z136.1:ssä määritellyn maksimitehotason mitkään suojalasiavut eivät kykene suojaamaan silmiä, vaan laite on turvallisuussyistä sijoitettava erilliseen huoneeseen ja sen käyttöä valvotaan tällöin esimerkiksi kamerayhteyden avulla. (Laser Institute of America 2017; Thorlabs 2017.)

Welcome to Laser Institute of America's (LIA) Free OD Calculator!

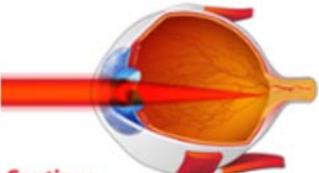
This convenient online tool will calculate what optical density is recommended for use with a laser system of a given power. This site is home to The Evaluator – LIA's Web-based Laser Safety Hazard Analysis System. This system provides a reliable way to easily double-check laser safety calculations. For more information [click here](#).

Pulse Mode:

CW Single Pulse Repetitive Pulse

Wavelength: nm

Average Power: W



Caution:
Always practice safe usage – goggles will not guarantee protection against careless use.

Kuvio 2. Laser Institute of American suojauskertoimen laskuri jatkuvalla säteelle (Laser Institute of America 2017)

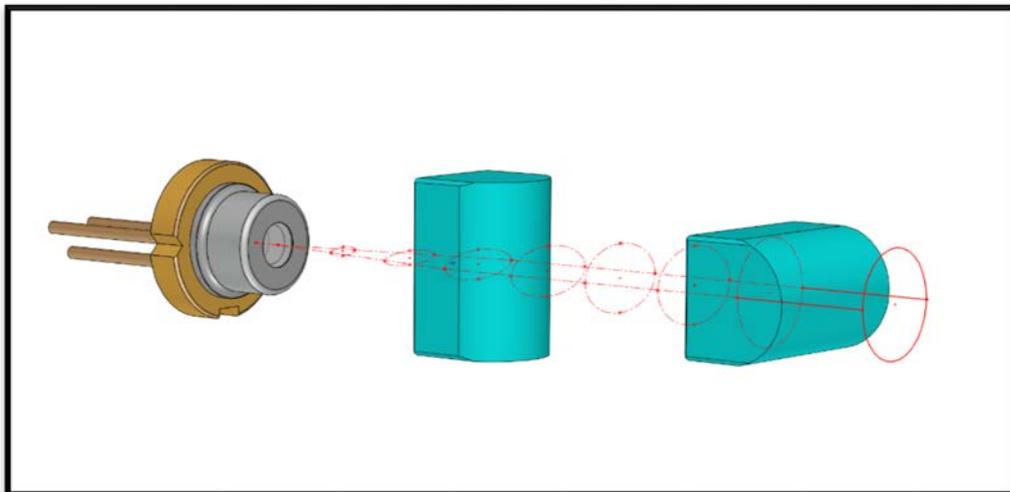
ANSI Z136.1 –standardi määrittelee laserin tehon ja sädetyypin mukaan tarvittavat suojauskertoimet. Näiden perusteella opinnäytetyössä käytettävälle OPT Lasersin PLH3D 6W -laserille mitoitettiin suojalasit, joiden suojaustason pitää olla vähintään OD4. Sertifioidut suojalasit hankittiin Thorlabsin verkkokaupasta, joka on laservälineistöön erikoistunut maailmanlaajuisesti toimiva yritys. Liitteessä 1 ja 2 löytyy suojalasien tarkat tiedot ja sertifikaatit, jotka sisältävät suojaustason eri aallonpituuksille. Lasit otettiin laajemmalle aallonpituusalueelle, johtuen laserin spektristä.

2.3 Laserin tehon määrittäminen

Laserin tehossa joudutaan usein luottamaan valmistajan antamiin arvoihin, koska mittalaitteet, joilla kyseinen asia voidaan mitata, ovat kalliita. Yleisesti valmistaja on mitannut laserin tuottaman tehon käyttämällä optista sensoria, jonka läpi lasersäde kulkee. Sensori mittaa säteestä intensiteetin ja laserin tuottaman kokonaistehon. Kalliimmissa mittalaitteissa on mahdollisuus myös spektrianalyysin tekemiseen.

Valmistajan ilmoittama teho on laseryksikön tuottaman säteen jatkuva teho. Valmistajan ilmoittaman tehon avulla voidaan laskea laserin tuottama teoreettinen intensiteetti määrätylle alueelle, kun tiedetään optiikan tuottaman polttopisteen koko. Intensiteetti kertoo tehon pinta-alaa kohden ja mitä suurempi intensiteetti on, sitä tehokkaampi laser on. Teoreettisen intensiteetin arvo ei kuitenkaan ota huomioon optiikasta tulevaa hävikkiä.

Laserissa optiikka on todella tärkeässä roolissa, koska ilman optiikkaa lasersäde on laaja ja intensiteetti pieni. Optiikan merkitys kasvaa puolijohdelasereissa, joissa säteen muoto ennen optiikkaa on pitkänmallinen ellipsi. Puolijohdelaserin säteenmuoto on nähtävissä kuviossa 3, joka esittää miten optiikkaa muotoilee sädettä. Tämä pitkänmallinen sädemuoto on lähtökohtaisesti heikkolaatuinen verrattuna muihin lasereihin, minkä vuoksi puolijohdelaserit vaativat paljon optiikalta säteen korjaamiseksi pistemäiseen muotoon, mikä ei onnistu ilman tehohäviöitä. (Integrated Optics 2017.)



Kuvio 3. Puolijohdelaserin säteenmuodostus (Integrated Optics 2017)

Korkealaatuiset optiset linssit eivät ole halpoja, minkä vuoksi käytössä olevat optiikat ovat aina kompromissi. Mikäli optiikalla haetaan pientä pistettä, uhrataan laserin tehoa. Jos tyydytään suurempaan pisteeseen, optiset häviöt ovat pienemmät ja voidaan saavuttaa suurempi kokonaisteho. Nämä valinnat riippuvat siitä, mihin laseria tullaan käyttämään ja minkälaiselle sädemuodolle on tarvetta. (Integrated Optics 2017.)

2.4 Laserkaiverrus menetelmänä

Mekaaninen kaiverrus toteutetaan yleensä poistamalla materiaalia aihion pinnasta pyörivällä työkalulla. Laserkaiverruksessa laser puolestaan saa aikaan materiaalin poiston polttamalla. Koska laserin tehoa pystytään säätämään, mahdollistuu esimerkiksi harmaasävyjen kaiverrus puuhun. Laserkaiverruksessa kapaleeseen kohdistetun laserpisteen koko halutaan usein mahdollisimman pieneksi, jolloin kaiverrus on tarkkaa ja siistiä. Pieni piste mahdollistaa myös suuren intensiteetin, mikä tekee kaiverruksesta huomattavasti nopeamman, johtuen nopeasta paloreaktiosta. Asia on sama kuin jos yrittäisi polttaa paperiin reiän käyttämällä suurennuslasia ja auringon valoa. Kun suurennuslasin kautta tuleva piste on suuri, reiän palaminen kestää kauan. Vastaavasti kun piste on pieni, niin palaminen tapahtuu lähes välittömästi. (engraved.com.au 2017; Gravotech Marking 2017.)

Laserkaiverruksessa materiaalin ominaisuuksilla on suuri merkitys laserkaiverruksen laatuun ja polttojälkeen. Laserkaiverruksessa paloprosessin hallinta on tärkeä asia, johon pitää kiinnittää huomiota. Paloprosessit vaihtelevat eri materiaalien välillä. Kuviossa 4 voidaan nähdä MDF-levyn pintaan tehty kaiverrus. Cut-LaserCut on yritys, jolla on tarjolla laaja tietokanta eri materiaalien testikaiverruksesta ja leikkauksista laserilla. Lisäksi yrityksen sivustoilla löytyy kattavasti tietoa materiaalikohtaisesta paloprosessin hallinnasta.



Kuvio 4. Esimerkki MDF-levyn laserkaiverruksesta (CutLaserCut Ltd. 2017)

CutLaserCutin dokumentoimat havainnot MDF-levyn laserkaiverruksesta kertovat muunmuassa seuraavia asioita: värisävyerot ovat mahdollisia, ja ne johtuvat materiaalin puukuitu-, tiiveys- ja kosteus-eroista. Kuviossa 5. nähdään laserleikatun MDF-levyn kyljen polttojälki, kun paloprosessi on optimoitu. MDF-levyn laserleikkauksesta on dokumentoitu maininnat, että laserleikkauspolttoviivan leveys on $\pm 0,1$ mm 1-6 mm, $\pm 0,2$ mm 6-12 mm ja $\pm 0,3$ mm yli 12 mm vahvoilla MDF-levyillä. Laserleikkauksessa MDF-levylle suositellaan käytettävän 4 barin ilmanpainetta, joka pitää liekehtimisen, hiiltymisen ja palamisen levyn pinnassa minimissään. Lisäksi huomautetaan, että laserleikkauksen aloituskohtaan voi muodostua ylimääräistä palojälkeä, mutta muuten laserleikkauks jälki on todella siisti. (CutLaserCut Ltd. 2017.)



Kuvio 5. MDF-levyn laserleikkausjälki (CutLaserCut Ltd. 2017)

3 TUTKITTAVA MATERIAALI

3.1 MDF

MDF-levy on yleisesti käytetty materiaali kalusteteollisuudessa, koska se pitää sisällään kaikki puun hyvät ominaisuudet: tasa-aineinen (ei syynsuuntia), tiivis, hengittävä, helppo työstää, toimii lisälämmöneristeenä ja on hinnaltaan kilpailukykyinen. MDF valmistetaan hienojakoisesta puukuidusta. MDF:n valmistusvaatimukset on määritelty ANSI A208.2-2002- ja SFS-EN 13986+A1 -standardeissa. Taulukossa 1 esitetään MDF:n staattiset mekaaniset ominaisuudet taivutuksessa vertailtuna koviin puulajeihin. Taulukosta voidaan nähdä, että MDF on joustava materiaali esimerkiksi tammeen verrattuna. (The Centennial Edition of the classis Wood Handbook 2010,Chapter 12; Puuinfo Oy 2017; European Panel Federation 2017.)

Taulukko 1. Mekaanisten taivutusominaisuuksien vertailu puu- ja komposiittimateriaalien kesken (The Centennial Edition of the classis Wood Handbook 2010,Chapter 12)

Material	Specific gravity	Static bending properties			
		Modulus of elasticity		Modulus of rupture	
		GPa	($\times 10^6$ lb in ⁻²)	MPa	(lb in ⁻²)
Clear wood					
White oak	0.68	12.27	(1.78)	104.80	(15,200)
Red maple	0.54	11.31	(1.64)	92.39	(13,400)
Douglas-fir (Coastal)	0.48	13.44	(1.95)	85.49	(12,400)
Western white pine	0.38	10.07	(1.46)	66.88	(9,700)
Longleaf pine	0.59	13.65	(1.98)	99.97	(14,500)
Panel products					
Hardboard	0.9-1.0	3.10-5.52	(0.45-0.80)	31.02-56.54	(4,500-8,200)
Medium-density fiberboard	0.7-0.9	3.59	(0.52)	35.85	(5,200)
Particleboard	0.6-0.8	2.76-4.14	(0.40-0.60)	15.17-24.13	(2,200-3,500)
Oriented strandboard	0.5-0.8	4.41-6.28	(0.64-0.91)	21.80-34.70	(3,161-5,027)
Plywood	0.4-0.6	6.96-8.55	(1.01-1.24)	33.72-42.61	(4,890-6,180)
Structural timber products					
Glued-laminated timber	0.4-0.6	9.00-14.50	(1.30-2.10)	28.61-62.62	(4,150-9,080)
Laminated veneer lumber	0.4-0.7	8.96-19.24	(1.30-2.79)	33.78-86.18	(4,900-12,500)
Wood-nonwood composites					
Wood plastic		1.53-4.23	(0.22-0.61)	25.41-52.32	(3,684-7,585)

MDF valmistetaan hienojakoisesta puukuidusta liiman kanssa puristamalla. Valmistusmenetelmä mahdollistaa sen, että MDF:lle voidaan antaa sen ominaispiirteistä poikkeavia ominaisuuksia, joita ovat muun muassa kosteudenkestävyys ja palonkestävyys. (Puuninfo Oy 2017.)

3.2 Paloluokitus

Paloluokitus määrittelee, kuinka materiaali käyttäytyy palotilanteessa. Materiaalien paloluokitus on jaettu erilaisiin ryhmiin riippuen käyttökohteesta. Paloluokitusryhmiä ovat rakennusmateriaalit (pois lukien lattianpäällysteet), putkimaiset lämmöneristeet ja lattianpäällysteet. Työssä keskitytään tarkastelemaan MDF-levyn kestävyttä lasersäteen vaikutuksessa ja verrataan luokittelematonta levyä paloluokituksen omaavaan. (Gyproc 2017.)

3.3 Paloluokiteltu MDF

MDF-levy kuuluu rakennusmateriaaleihin paloluokitusta tarkastellessa. Tutkimuksessa käytettävä paloluokiteltu MDF on tarkalta tyypiltään B-s2-d0 ja käsittelemätön MDF D-s2-d2. Kuviossa 6 kerrotaan tyyppimerkityksen selitys, jonka myötä paloluokiteltu materiaali on tulkittuna seuraava: materiaali osallistuu paloon hyvin rajoitetusti, materiaali tuottaa savua palaessaan vähän ja palaessaan materiaali ei muodosta palavia irtokappaleita. Käsittelemätön materiaali on tulkittuna seuraava: materiaalin osallistuminen paloon on hyväksyttävää, materiaalin savuntuotto on vähäistä ja palavien pisaroiden tai osien tuotto ei täytä d0 eikä d1 vaatimuksia eli palavien pisaroiden muodostuminen on mahdollista. (Pintojen ja katteiden paloluokat, Puuninfo Oy 2012; Gyproc 2017.)

Rakennusmateriaalien paloluokitus

Rakennustarvikkeet yleensä

Rakennustarvikkeiden luokat lukuun ottamatta lattiapäällysteitä kuvataan merkinnöillä: A1, A2, B, C, D, E, F.

Savun tuotto ja palava pisarointi ilmaistaan lisämääreillä s ja d. Savun tuoton luokitus on s1, s2, s3 ja palavan pisaroinnin d0, d1, d2.

A1 = Tarvikkeet, jotka eivät osallistu lainkaan paloon (palamaton).

A2 = Tarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on erittäin rajoitettu.

B = Tarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on hyvin rajoitettu.

C = Tarvikkeet, jotka osallistuvat paloon rajoitetusti.

D = Tarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on hyväksyttävissä.

E = Tarvikkeet, joiden käyttäytyminen palossa on hyväksyttävissä.

F = Tarvikkeet, joiden käyttäytymistä ei ole määritetty.

s1 = Savuntuotto on erittäin vähäistä.

s2 = Savuntuotto on vähäistä.

s3 = Savuntuotto ei täytä s1 eikä s2 vaatimuksia.

d0 = Palavia pisaroita tai osia ei esiinny.

d1 = Palavat pisarat tai osat sammuvat nopeasti.

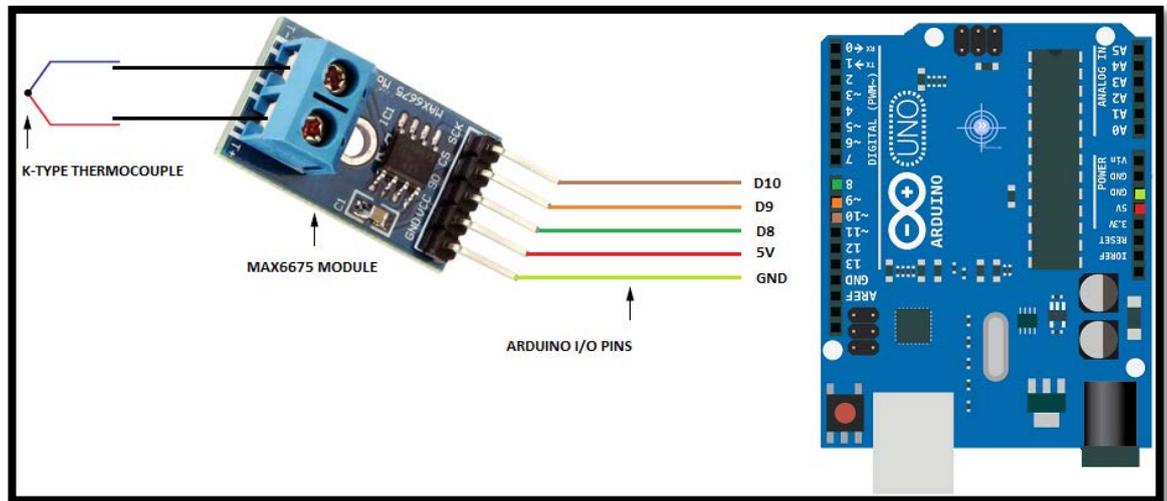
d2 = Palavien pisaroiden tai osien tuotto ei täytä d0 eikä d1 vaatimuksia.

Kuvio 6. Rakennusmateriaalien paloluokitus (Gyproc 2017)

4 LÄMPÖTILAN MITTAUSMENETELMÄ

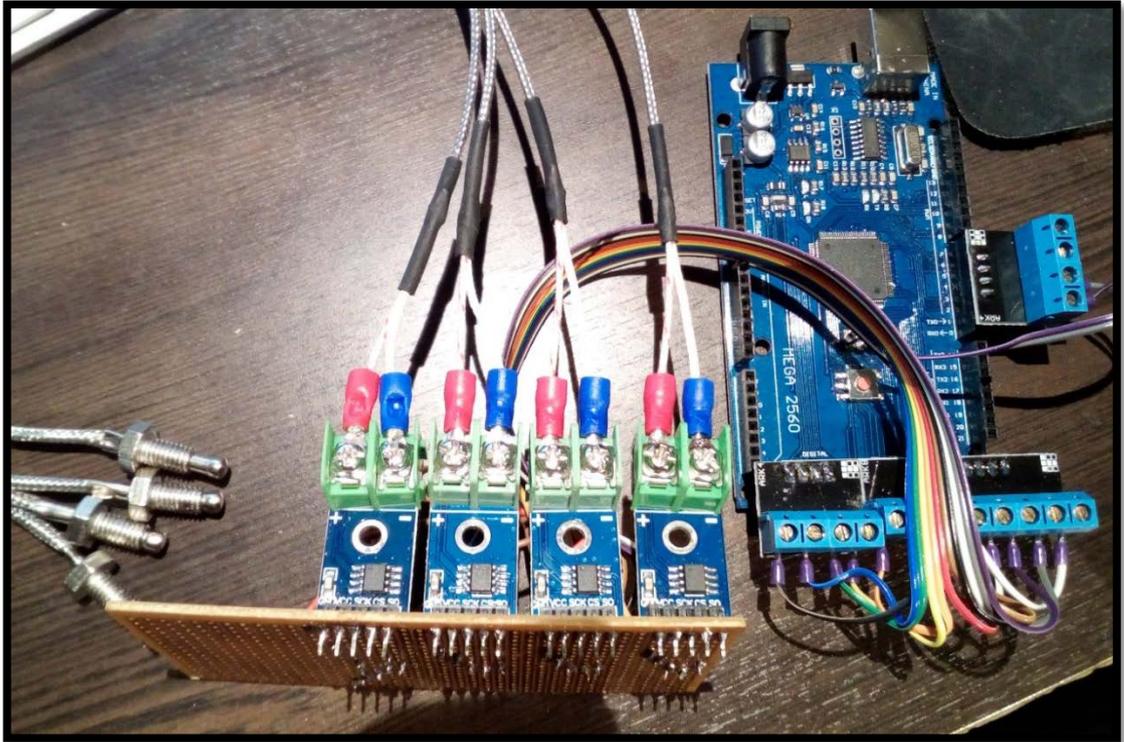
4.1 Mittausvälineistö

Lämpötilan mittausjärjestelmä on rakennettu Arduino Mega 2560-ohjelmointialustasta. Ohjelmointialustaan on liitetty MAX6675-rajapintapiiriin kautta K-tyypin termopareja, jotka kykenevät mittaamaan 0-1250 °C:een lämpötiloja. Mittausjärjestelmän mittaustarkkuus laskettuna valmistajien ilmoittamista arvoista on ± 2.5 °C (MAX6675 + K-tyypin termopari). Kuviossa 7 nähdään yksinkertaistettu periaatekuva, kuinka yksi termopari kytketään Arduino Uno-kehitysalustaan.



Kuvio 7. K-tyypin termoparin kytkentä Arduino Uno-kehitysalustaan (Hareendran 2017)

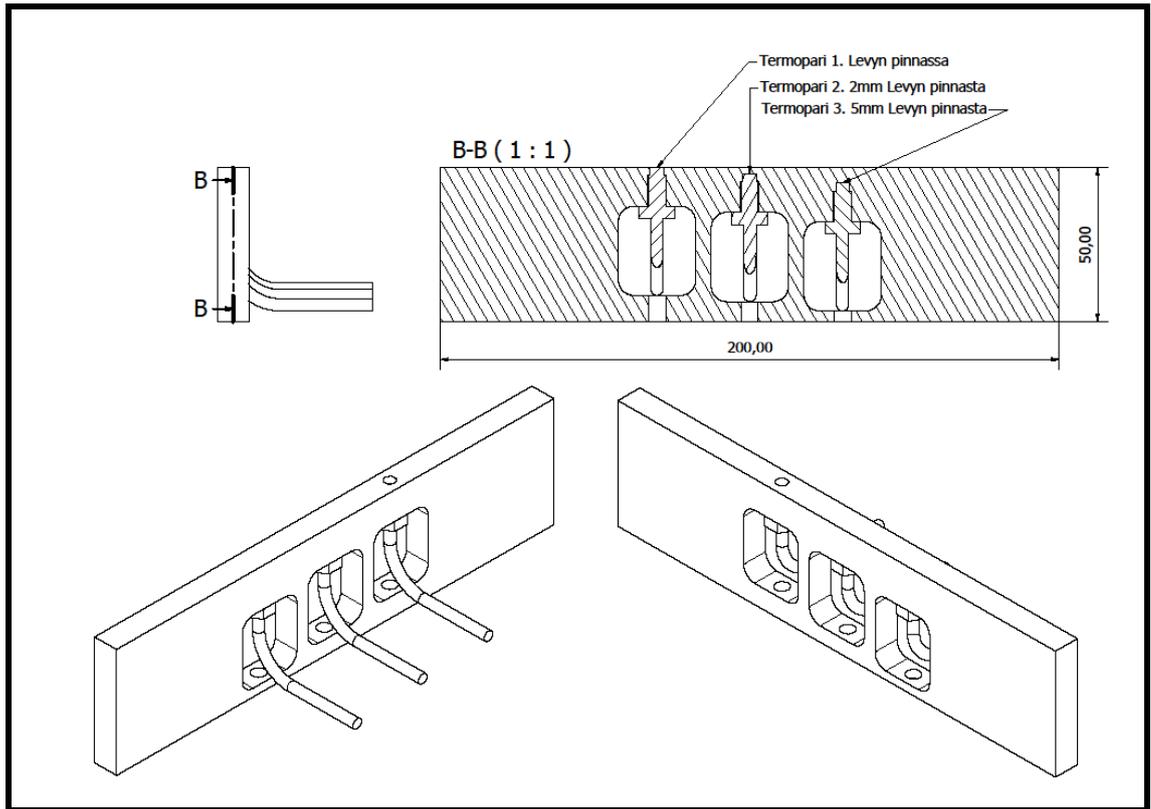
Arduino Megaa ja Unoa vertailtaessa voidaan todeta, että Uno on Mega 2560:sta huomattavasti karsitumpi versio, eli Uno sisältää samoja asioita, mutta vain vähemmän. Kuvassa 1 nähdään mittausjärjestelmän käytännön toteutustapa Mega 2560-kehitysalustalla ja 4 termoparilla.



Kuva 1. Mittausjärjestelmän anturikytkennät (Mega 2560, 4 kpl MAX6675 ja 4 kpl K-tyyppin termopareja metallivaipalla)

4.2 Mittausten suunniteltu toteutus

Kuviossa 8 on esitetty, kuinka termoparit upotetaan testattavaan materiaaliin. Liitteessä 3 on puolestaan esitetty asiaan liittyvät valmistuskuvat. Termoparin kiinnitys tapahtuu termoparin rungon M6-kierteen avulla. MDF-levyyn tehty kierre on äärimmäisen hento ja sen tarkoitus on ainoastaan pitää anturi paikoillaan ja tällöinkin kyseessä on kertakäyttöinen kiinnitystapa. Kierteen avulla anturi voidaan kiristää niin, että anturin pää on puristuksissa MDF-levyä vasten.



Kuvio 8. Testattavan materiaalin K-tyyppin termoparien sijainti kokoonpanokuvassa.

4.3 Suunnitellussa toteutuksessa kohdatut ongelmat

Laitteiston kalibrointivaiheessa huomattiin nopeasti yksi vakava ongelma. Termopareista luettavat lämpötilat olivat äärimmäisen matalat. Laserin polttaessa suoraan metallivaippaisen termoparin päähän lämpötila oli ainoastaan 141 °C, vaikka laser poltti anturia usean minuutin ajan. Kuvassa 2 nähdään metallivaippaisen termoparin kiinnitys testattavaan materiaaliin läpileikattuna. Kuvasta selviää sensorin pään kontaktin muodostuminen materiaaliin.



Kuva 2. Metallivaippainen termopari upotettuna materiaaliin.

Ongelman syyn selvittämisen ainoaksi vaihtoehdoksi jäi materiaalin poisto hiomalla metallivaippaisen termoparin päätä, kunnes termoparin pää löytyi. Hiomisen tuloksena selvisi, että termopari oli noin 4 mm:n syvyydellä suojavaipan päästä ja keskellä anturia 2,9 mm paksun metallivaipan ympäröimänä. Materiaalin poiston jälkeen kuvassa 3 nähtävä anturi näytti 588 °C, mutta tämäkään ei ole vielä uskottava todellinen lämpötila. Ongelmana oli, että termoparia ei saatu täysin esille metallivaipasta vahingoittamatta sitä. Tämän myötä päätettiin hankkia uudet termoparit, joissa ei ole metallista suojavaippaa ollenkaan.



Kuva 3. Metallivaippainen termopari, josta mekaanisesti poistettu materiaalia

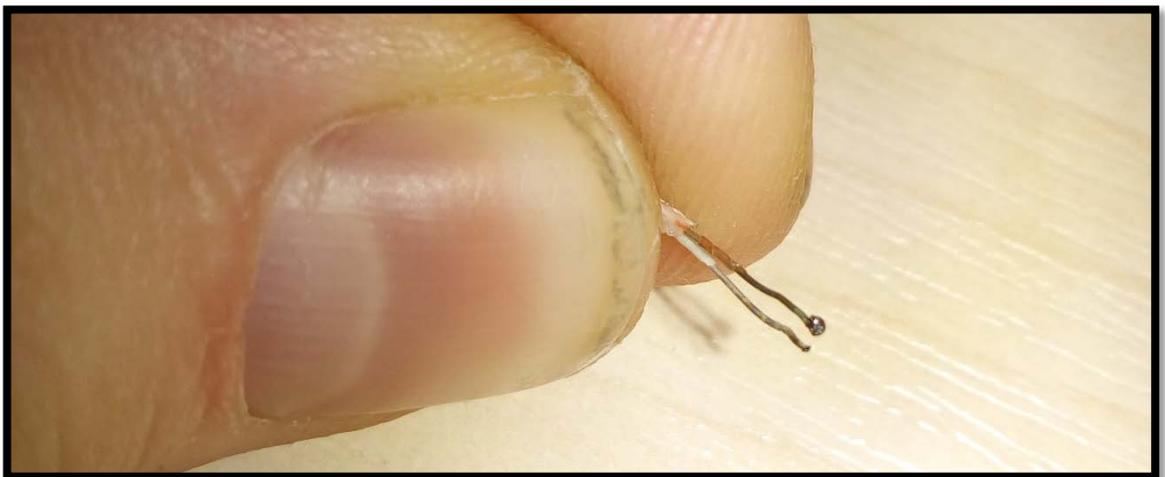
Suojaamattoman termoparin ensimmäisellä mittauskerralla rakennettu mittausjärjestelmä näytti ensimmäisessä testissä lämpötilaksi 1024 °C, joka paljastui MAX6675 rajapinnan maksimiksi. Suojaamaton K-tyyppin termopari on nähtävissä

kuvassa 4, joka valmistajan antamien arvojen mukaan toimii maksimissaan 1375 °C:een lämpötilassa.



Kuva 4. Suojaamaton termopari

Kun laseri kohdistettiin suojaamattomaan termopariin ja laserin korkeutta säätämällä haettiin optiikan tuottama ideaalipolttopiste, aiheutti tämä 10 — 15 sekunnin jälkeen termoparin rikkoutumisen. Kuvassa 5 nähdään, että termoparin toisen johtimen pää on irronnut termoparin hitsistä. Kuvassa termoparin suojaus on kuorittu, jotta johtimet olisivat paremmin nähtävissä.



Kuva 5 Rikkoutunut suojaamaton termopari

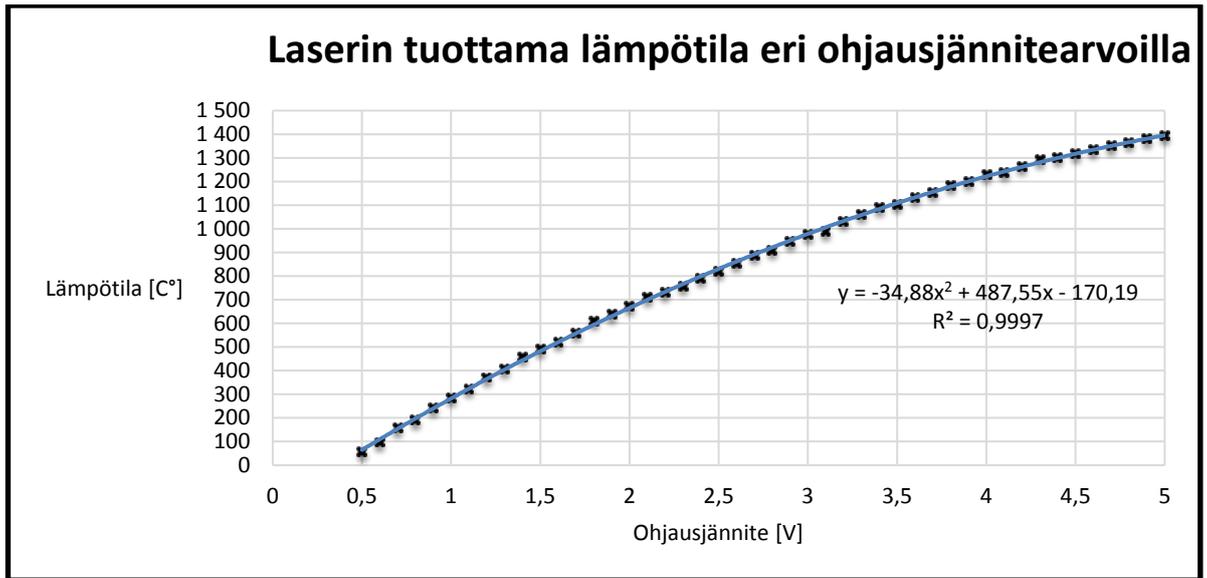
Tämän myötä selvitettiin, kuinka kuuma laserin ideaalipolttopiste on. Mittaus toistettiin toisella suojaamattomalla termoparilla, mutta tällä kertaa lämpötilaa luki Agilent U1242A -yleismittari, jossa on termoparien lukuominaisuus. Kuvassa 6 nähdään Agilent U1242A -mittarin lukema suojaamattomasta termoparista laserin ollessa optikaltaan ideaalipolttopisteessä. Lämpötila nousi noin 1395 °C:een, jonka jälkeen termopari rikkoontui noin 10 — 15 sekunnissa.



Kuva 6. Agilent U1242A:n lukema suojaamattomasta termoparista laserin ideaalipolttopisteessä

4.4 Laserin tuottaman lämpötilan mittaus

Laserin tuottaman lämpötilan mittaus suoritettiin lopulta Agilent U1242A -mittarilla ja suojaamattomalla termoparilla koko laserin ohjausjännitealueella. Kuviossa 9 on esitetty suojaamattomalla termoparilla mitattu laserin tuottama lämpötila suhteessa ohjausjännitteeseen alueella 0-5V. Kuvaajasta on jätetty 0V - 0,4V arvot pois johtuen näiden tuottamista matalista lämpötila-arvoista. Mittaukset toteutettiin ohjausjännitteen 0,1V askelin. Näissäkin mittauksissa termopari rikkoontui noin 1400 °C:ssa.



Kuvio 9. Laserin tuottama lämpötila eri ohjaujännitteen arvoilla

4.5 Lämpötilan mittauksissa havaittu ongelma

Laserin tuottaman lämpötilan mittauksen aikana todettiin, kuinka tarkasti laserin on osuttava termoparin päähän, jotta lämpötila olisi luotettavasti mitattavissa. Mikäli laser oli ideaalipolttopisteessä ja suoraan termoparin päällä, siirrettäessä laseria 0,1 mm:ä sivusuunnassa mitatut arvot muuttuivat satoja asteita. Tämän vuoksi aikaisemmin suunniteltu mittaustapa oli hylättävä. Vaihtoehtoiseksi tavaksi mittausten suorittamiseksi otettiin lasersäteen läpäisyajan mittaaminen.

5 LASERSÄTEEN LÄPÄISYAJAN TUTKIMUSMENETELMÄ

5.1 Lasersäteen läpäisyajan mittauksen suunniteltu toteutus

Läpäisyajan mittaus toteutetaan kuvaamalla polttotapahtuma videokameralla 30fps:n nopeudella. Video analysoidaan kuvan ja aikakoodin suhteen. Tästä saadaan lasersäteen läpäisy aika selville. Läpäisy aika mitataan eri säteilytyypeillä, piste- ja hajasäteilyllä. Näiden suurin ero on laserin kohdistuksessa. Pistesäteilyn tarkoitus on simuloida normaalia leikkaus- ja kaiverrustilannetta, jossa lasersäteiden ideaalipolttopiste on kohdistettu levyn pintaan. Koska lasersäteiden kohdistuskorkeus on vakio levyn pinnasta, heikkenee läpäisykyky optiikan vaikutuksesta mitä syvemmälle lasersäde tunkeutuu materiaalissa. Tämän avulla pystytään määrittämään maksimileikkaussyvyys ja se, aiheuttaako pitkäaikainen altistuminen jatkuvan paloreaktion materiaalissa.

Hajasäteilyn vaikutusta materiaaliin tutkitaan käyttämällä hyväksi optiikan kohdistusta. Hajasäteilyssä kohdistuspiste on 60 mm materiaalin yläpuolella, mikä kasvattaa polttopisteen kokoa. Teho jakaantuu suuremmalle pinta-alalle ja simuloi näin voimakasta hajasäteilyä. Leikkaus- ja kaiverrustilanteessa hajasäteily voi muodostua säteiden heijastuessa materiaalin pinnasta tai alkuperäisen polttopisteen muodostamasta säteilystä.

5.2 Lasersäteen läpäisyajan mittausvälineistö

Lasersäteiden kuvauksessa on aina mahdollista, että kamera voi vaurioitua. Tämän vuoksi videokuvauksessa päätettiin käyttää Logitech C920 -webkameraa. Tärkeintä videokuvauksessa on, että kamera pystyisi tallentamaan 30 fps:n nopeudella, mikä mahdollistaa tarpeeksi tarkan läpäisyajan analysoinnin.

Laserin läpäisyä indikaattoriksi valittiin valkoinen paperi. Paperi sijoitettiin huomattavasti materiaalin alapuolelle, minkä myötä säde oli niin hajaantunut, että paperi ei palanut lyhyessä altistumisessa, mutta antoi voimakkaan visuaalisen indikaation videoon hajottamalla lasersäteiden tuottaman valon paperin pintaan.

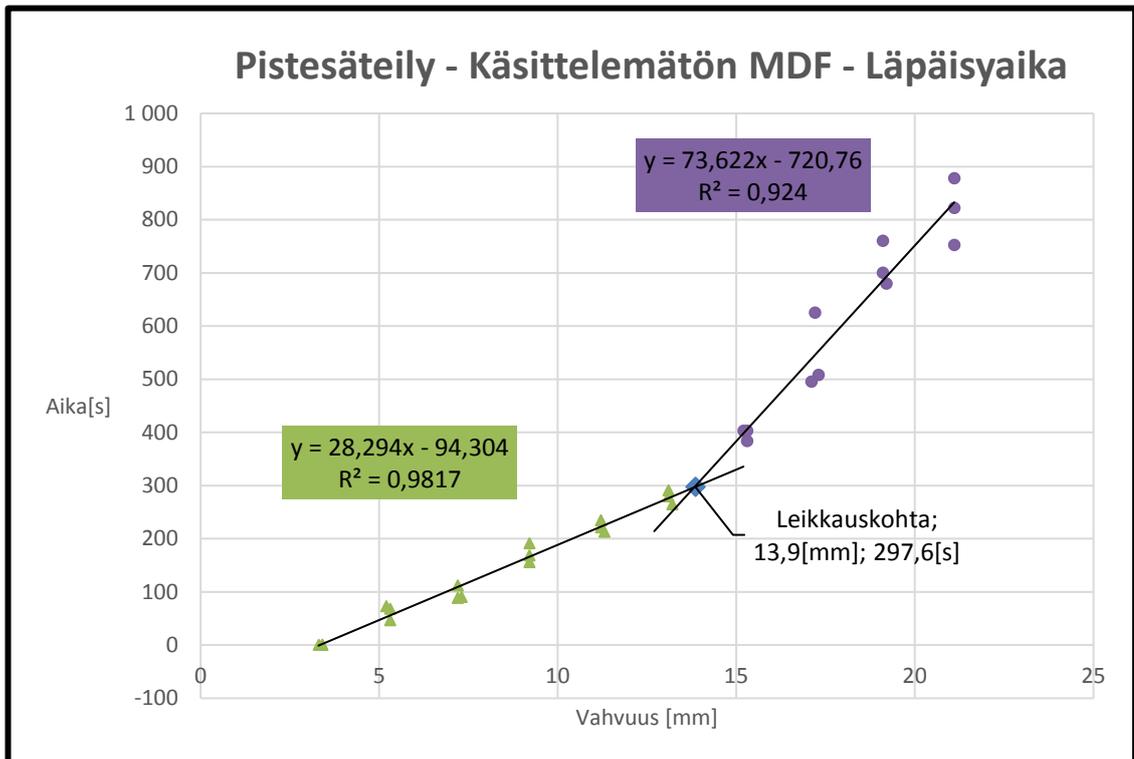
Pistesäteilyn osalta läpäisyajan mittaukset suoritetaan vahvuusalueelta 3 mm – 22 mm, josta otetaan 10 eri vahvuusarvoa tutkittavaksi. Testattavat materiaali-
vahvuudet mitataan ja dokumentoidaan testikappaleen työstön jälkeen, jotta vah-
vuustieto olisi mahdollisimman tarkka. Näin pystytään saamaan käsitys optiikan
vaikutuksesta läpäisy aikaan, suuren lämpökuorman tuomisesta kappaleeseen ja
tämän vaikutuksesta palo-ominaisuuksiin. Hajasäteilyn osalta mittaukset toteute-
taan yhdellä materiaalivahvuudella, koska tarkoitus on tutkia vain hajasäteilyn lä-
päisykykyä ja paloreaktiota.

6 LASERSÄTEEN LÄPÄISYAIKOJEN MITTAUS JA ANALYSOINTI

Läpäisyajojen mittaukset toteutettiin suunnitellusti ja ne ovat nähtävissä liitteessä 4 olevalla videolla tarkemmin esiteltynä. Tässä luvussa esiintyvät kuvat ja kuvat perustuvat näihin mittaustuloksiin ja niiden analysointiin. Kaikissa mittaustuloksissa laserin ohjausjännite on 5,0 V.

6.1 Pistesäteily – Käsitlemätön MDF

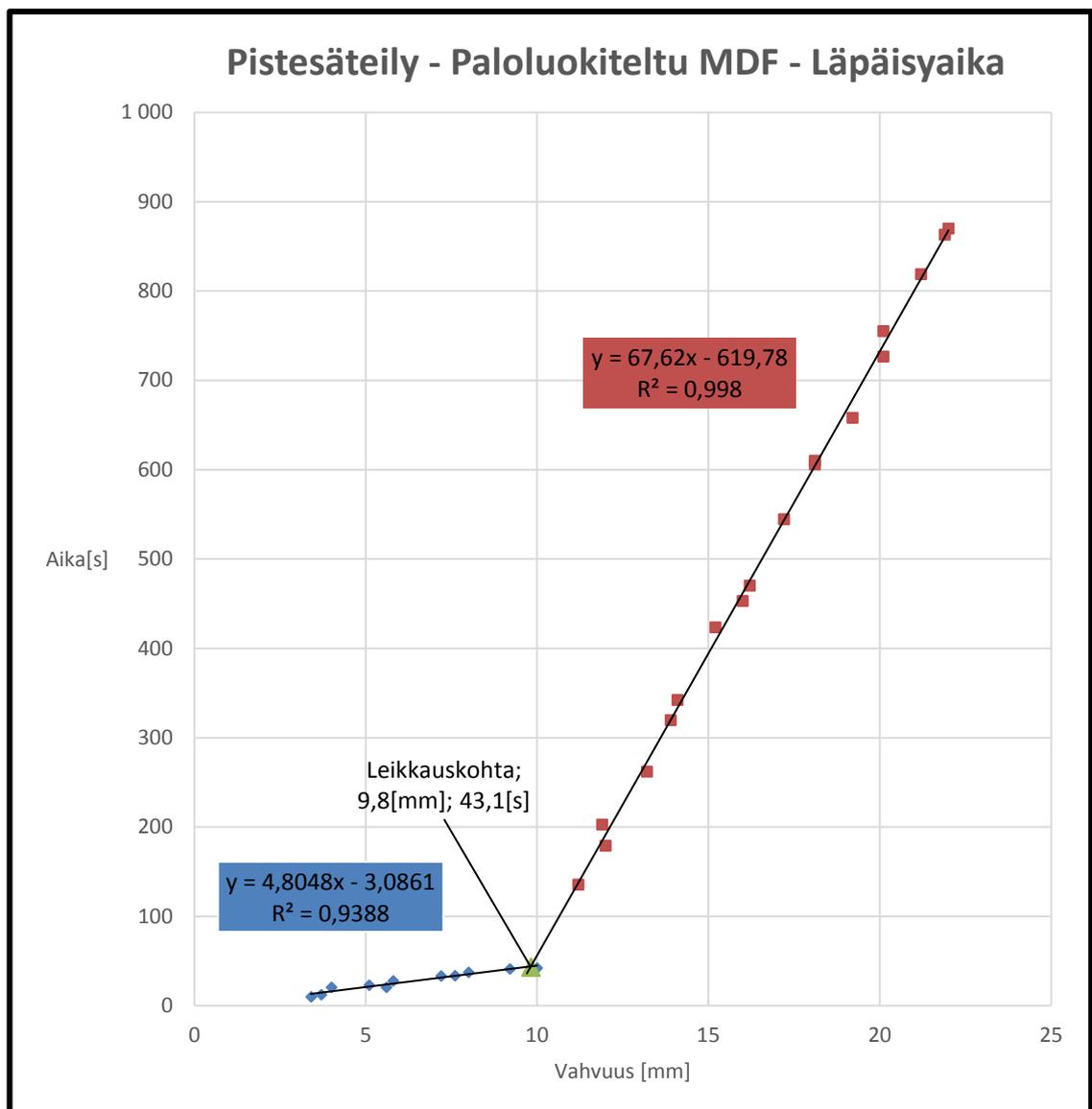
Käsitlemättömän MDF-levyn pistesäteilymittauksissa havaittiin mittauksen aikana hetkellisiä liekkejä ja irtoavia pieniä palavia kappaleita, jotka sammuiivat laserin jäähdytysilmavirran vaikutuksesta. Mittauksissa laserin sulkemisen jälkeen kappale savusi lähes joka kerta voimakkaasti, mikä oli merkki mahdollisesta kytevästä palosta. Käsitlemättömän MDF-levyn analysoinnissa havaittiin, että materiaalin käyttäytymistä kuvaa parhaiten kaksi erillistä lineaarista suoraa. Näiden suorien leikkauspiste on niin sanottu raja-arvo, jossa materiaalin käyttäytyminen muuttuu. Kuviossa 10 on esitetty nämä suorat ja laskennallinen suorien leikkauskohta. Lisäksi mittaustuloksissa esiintyi hajontaa, mikä voi johtua materiaalin koostumuksesta, joka ei ole tasainen.



Kuvio 10. Käsitlemätön MDF:n mittaustulokset: läpäisy aika

6.2 Pistesäteily – Paloluokiteltu MDF

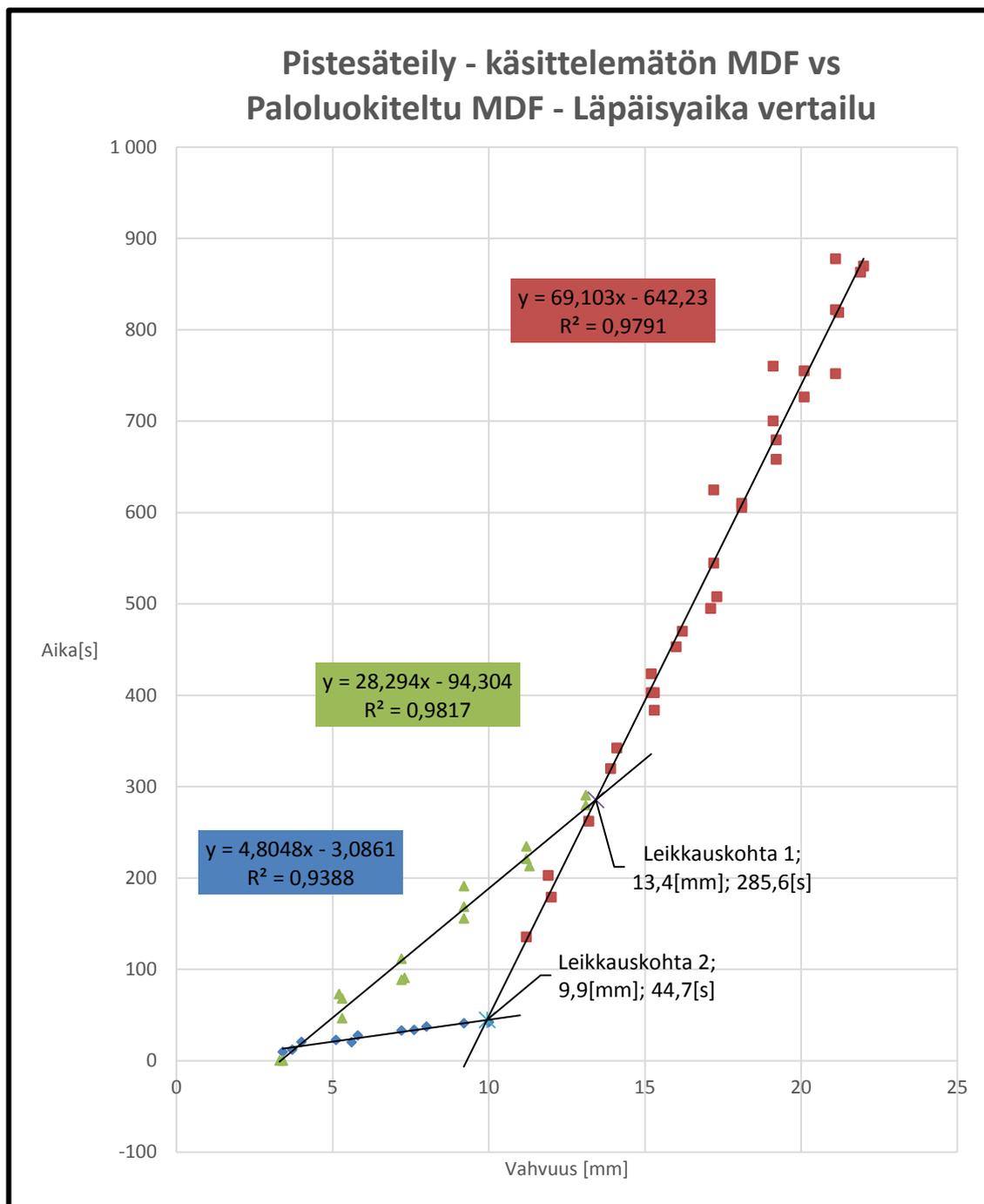
Paloluokitellun MDF-levyn pistepoltossa havaittiin, että materiaali tuotti vähän savua ja lisäksi mitään merkkejä kytevästä palosta tai irtoavista palavista kappaleista ei esiintynyt. Paloluokitellun MDF-levyn analysoinnissa havaittiin, että materiaalin käyttäytymistä kuvaa parhaiten kaksi lineaarista suoraa. Näiden suorien leikkauspiste on ns. raja-arvo jossa materiaalin käyttäytyminen muuttuu. Kuviossa 11 on esitetty nämä suorat ja laskennallinen suorien leikkauskohta. Huomioitavaa on, että paloluokitellun MDF:n läpäisyajan hajonta pistesäteilyssä oli huomattavasti pienempää verrattuna käsittelemättömään MDF:ään.



Kuvio 11. Paloluokiteltu MDF:n mittaustulokset: läpäisy aika

6.3 Pistesäteily – Käsittämätön MDF vs Paloluokiteltu MDF

Suoritettaessa tarkempaa tarkastelua materiaalien kesken voitiin todeta, että raja-arvopisteiden jälkeen materiaalit alkavat käyttäytymään lähes samalla tavalla. Kuviossa 12 on yhdistetty materiaalien mittaustulokset raja-arvojen jälkeen yhdeksi otannaksi.



Kuvio 12. Mittaustulokset yhdistettynä: pistesäteily

Materiaalin käyttäytymisen tarkempaa tutkimista varten testikappaleet halkaistiin kuvassa 7 esitetyllä tavalla. Tästä pystyttiin näkemään selvästi, että palojälki on huomattavasti kapeampi paloluokitellussa MDF-levyissä ensimmäiset 4 mittausta oikealta päin laskettuna. Raja-arvo tulee 4 ja 5 mittauksen välimaastoon paloluokitellussa ja muutos näkyy 5 mittauksessa huomattavasti leveämpänä palojälkenä. Tästä voidaan todeta, että paloprosessi voi olla laser-säteen tunkeutumisen puolesta tehokkaampi paloluokitellulla levyllä, kun palo ei lähde leviämään materiaalissa sivulle päin. Lisäksi voidaan nähdä, että käsittelemättömässä MDF:ssä hiiltyminen on voimakasta, mikä voi mahdollistaa kytevän palon.



Kuva 7. Pistesäteily testikappaleiden poikkileikkaus

6.4 Hajasäteily – Käsittelemätön MDF

Hajasäteilymittauksissa huomattiin, että polttopiste oli pitkänmallinen ellipsi, kooltaan noin 3 mm x 5 mm. Mittaukset toteutettiin yhdellä levyepaksuudella ja tätä verrattiin pistesäteilyn laskennalliseen läpäisy aikaan kuvio 12:ssa esitetyn suorran yhtälön mukaisesti kyseiselle paksuudelle.

Taulukko 2. Mittaustulokset Käsittelemätön MDF Läpäisy aika

Hajasäteily käsittelemätön MDF				
Paksuus [mm]	Minuutti	Sekunti	Frames	Yhteensä sekuntia
14,6	39	33	0	2373
14,6	36	20	0	2180
14,6	40	2	0	2402
Hajasäteilyn läpäisyajan keskiarvo [s]				2318,3
Pistesäteilyn läpäisy aika hajasäteilyn materiaali vahvuudelle [s]				366,7
Suhdeluku (Hajasäteilyn suhde pistesäteilyyn)				6,3

6.5 Hajasäteily – Paloluokiteltu MDF

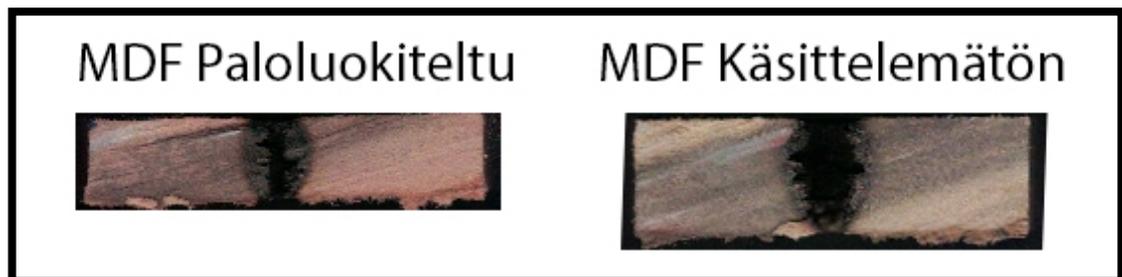
Paloluokitellun MDF-levyn mittaukset toteutettiin yhdellä levypaksuudella ja tätä verrattiin pistesäteilyn laskennalliseen läpäisy aikaan kuvio 12:a esitetyn suoran yhtälön mukaisesti kyseiselle paksuudelle.

Taulukko 3. Mittaustulokset Paloluokiteltu MDF Läpäisy aika

Hajasäteily Paloluokiteltu MDF				
Paksuus [mm]	Minuutti	Sekunti	Frames	Yhteensä sekuntia
10,2	12	53	20	773,7
10,2	14	0	2	840,1
10,2	12	31	24	751,8
Hajasäteilyn läpäisyajan keskiarvo [s]				788,5
Pistesäteilyn läpäisy aika hajasäteilyn materiaalivahvuudelle [s]				62,6
Suhdeluku (Hajasäteilyn suhde pistesäteilyyn)				12,6

6.6 Hajasäteily – Käsittämätön MDF vs Paloluokiteltu MDF

Hajasäteilyn osalta läpäisy aikoja verratessa huomataan, että paloluokitellulla läpäisy aika on yli 12 kertainen pistesäteilyyn verrattuna, kun käsittämättömällä MDF:llä se on vain hieman yli 6 kertainen. Testikappaleiden poikkileikkausta esitetään kuvassa 8. Tarkemmassa tarkastelussa voidaan havaita, että käsittämättömässä MDF-levyssä materiaali on palanut käytännössä kokonaan pois keskustasta. Tämä näkyy suurena ontelona keskellä materiaalina, kun taas paloluokitellussa se on vain osaksi hiiltynyt, mutta on silti suurimmaksi osaksi kiinteää materiaalia.



Kuva 8. Hajasäteily testikappaleiden poikkileikkaus

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Mittaukset paljastivat paljon uutta materiaalin käyttäytymisestä ja sen soveltuvuudesta aiottuun käyttöön. Mittauksien perusteella voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset. Testeissä käytetty PLH 3D 6W -laseri on kaupallisiin koneisiin verrattuna pienitehoinen. Tästä huolimatta sillä päästään äärimmäisen korkeisiin pistelämpötiloihin, jotka mahdollistavat kaiverruskäyttöä varten suuren kaiverrusmateriaalikirjon. Korkeiden lämpötilojen aikaansaaminen edellyttää, että laseri voidaan kohdistaa tarkasti pystysuunnassa.

Hajasäteilymittauksissa havaittu laseriodin säteen muodon kasvaminen pitkänmalliseksi ellipsiksi kohdistuksen myötä voi olla käyttökelpoinen suurempien pintojen kaiverruksessa. Tämä mahdollistaisi yhdellä laserikaiverrusliikkeellä suuremman pinta-alan polton, jota voitaisiin hyödyntää suurien kylttien tai kirjaimien kaiverruksessa. Parhaan hyödyn tästä saisi irti, kun työstö jaettaisiin rouhintaan ja viimeistelyyn. Rouhinnassa suuret alueet ajetaan leveällä hajasäteilyllä, minkä jälkeen suoritetaan viimeistely tarkalla pistesäteilyllä limittäin rouhinnan kanssa. Limittäisyydellä saadaan epätarkka raja poistettua rouhinnan ja viimeistelyn väliltä. Kaiverrusnopeuden hyöty rouhinnan ja viimeistelyn välillä voidaan päätellä hajasäteilyn suhdeluvun avulla, jossa pitää ottaa huomioon myös kaiverruspisteen pinta-ala. Viimeistelyssä kaiverruspisteen leveys on alle 0,1mm, kun rouhinnassa se on 5mm. Näitä arvoja käyttäen yhden rouhintavedon tekemiseen viimeistelyllä menisi 50 kaiverrusliikettä. Rouhinta voisi olla 50 kertaa hitaampi verrattuna viimeistelynopeuteen ja kaiverrusaika olisi sama. Käyttäen mittauksissa saatua suhdelukua 12,6 voidaan todeta kaiverrusaikaa kuluvan vain noin neljännes rouhinnalla siitä ajasta mitä siihen menisi viimeistelytarkkuudella.

Käsittelemätöntä MDF-levyä ei tule missään nimessä käyttää laserin runkomateriaalina äärimmäisen suuren paloriskin vuoksi. Paljaan paloluokitellun MDF-levyn käyttö runkomateriaalina ei myöskään ole mahdollista, johtuen hajasäteilyn mahdollisesta läpäisystä ja palamisesta. Palovaaran poistamiseksi voitaisiin käyttää alumiinilla laminoitua paloluokiteltua MDF-levyä laserkammion sisäpinnoilla. Alumiinikerros toimisi suojakerroksena, jota pienitehoinen laseri ei pysty läpäise-

mään. Tämä perustuu alumiinin lämmönjohtavuuteen ja valoa heijastaviin ominaisuuksiin. Alumiini ei aiheuta palovaaraa taustamateriaalin palokäsittelyn vuoksi, vaikka se lämpenisi.

Materiaalin palotarkastelusta pystyttiin havaitsemaan, että laseri ei sovellu jatkuvan paloprosessin takia paksuille puumateriaaleille. Kun leikataan laserilla paksuja puumateriaaleja, pitäisi paloprosessi pystyä pysäyttämään. Paloprosessin hallintaan yksi tapa voisi olla lasersäteen liikkeen nopeuttaminen ja tehon säätäminen niin, että laseri läpäisee vain pienen kerroksen materiaalia kerrallaan, jolloin lämpökuorma saadaan minimaaliseksi. Paloprosessin hallinta voi nostaa työstöaikoja huomattavasti, jolloin kyseinen toimenpide ei välttämättä ole kovin taloudellinen. Lisäksi levyn leikkuupinnat tulevat olemaan hiiltyneet.

Tutkimustuloksia ja niiden oikeellisuutta tarkastellessa materiaalin koostumus on yksi vaikuttavista tekijöistä, johtuen MDF-levyn koostumuksesta, joka on hienoa puusilppua. Tämän lisäksi yksi suuri ulkopuolinen tekijä on laserin jäähdytysilmavirta, mikä voi vaikuttaa paloprosessin etenemiseen huomattavasti ja lasersäteen läpäisy aikaan. Lisäksi testikappaleen asettelun ja laserin kohdistuksen mahdolliset pienet virheet aiheuttavat heittoa mittauksiin.

8 POHDINTA

Paloluokitellun MDF-levyn soveltuvuus laserin runkomateriaaliksi oli mielenkiintoinen aihe opinnäytetyöksi. Työssä laserin käyttö oli aikaa vievää mittausten puolesta ja vaativaa. Vaativuutta työhön teki työturvallisuus ja laserin kohdistuksen vaatima tarkkuus. Laserin kohdistuksen merkityksen pystyi havaitsemaan vasta lämpötilamittauksissa. Työssä kohdattiin ongelmia alkuperäisen lämpötilan mittaussuunnitelman osalta, mutta vaihtoehtoisella menetelmällä saatiin arvokasta tietoa laserin ohjausjännitteen suhteesta lämpötilaan. Tämä mahdollistaa tarkemman laserin kontrolloinnin, kun sitä käytetään materiaalin kaiverruksessa ja leikkauksessa.

Laserdiodin säteen muodon teoria kohtasi hyvin käytännössä, mikä näkyi hajasäteilymittauksissa pitkänmallisena polttopisteenä. Hajasäteilymittauksissa laser säteen läpäisykyky ylitti omat odotukset, koska hajasäteilyn ei uskottu kykenevän läpäisemään paloluokiteltua MDF-levyä.

Kokonaisuutena tutkimus onnistui ja työnantajan haluamat tavoitteet saavutettiin. Tutkimuksen avulla pystyttiin selvittämään materiaalin käyttöä ja saatiin riittävästi dataa siitä, kuinka kyseistä laseria voitaisiin hyödyntää käytännön sovelluksissa. Käytännön sovelluksina voidaan pitää kyseiselle laserille ohuiden materiaalien leikkausta ja kaiverrusta. Jatkotutkimustyö voisi olla paloprosessin hallintamenetelmistä tai vaihtoehtoisesti laserin läpäisykyvyn parantavista tekniikoista.

LÄHTEET

American Institute of Physics 2017. Who Invented the Laser. Viitattu 5.5.2017. <http://history.aip.org/exhibits/laser/sections/whoinvented.html>

CutLaserCut Ltd. 2017. MDF board. Viitattu 5.5.2017. <http://www.cutlaser-cut.com/laser-cutting-materials-laser-engraving-materials/laser-cutting-mdf-craftwood>

engraved.com.au 2017. Laser Engraving. Viitattu 5.5.2017. <http://engraved.com.au/laser-engraving/>

European Panel Federation 2017. Manufacturing of MDF. Viitattu 5.5.2017. <http://mdf-info.eu/general/manufacturing-of-mdf>

Gravotech Marking 2017. Mechanical engraving. Viitattu 5.5.2017. <http://www.gravotech.com/products-and-services/engraving-equipment-and-accessories/mechanical-engraving>

Gyproc 2017. Paloluokitusjärjestelmät. Viitattu 5.5.2017. <http://www.gyproc.fi/suunnittelu/palosisivusto/maaritelmia/paloluokitusjarjestelmat>

Hareendran, T. 2017. How to Play with Thermocouples. Viitattu 5.5.2017. <http://www.electroschematics.com/12610/how-to-play-with-thermocouples/>

Integrated Optics, UAB 2017. Laser beam. Viitattu 5.5.2017. <https://integratedoptics.com/laser-beam-collimation>

Laser Institute of America 2017. Welcome to Laser Institute of America's (LIA) Free OD Calculator!. Viitattu 5.5.2017. <https://www.lia.org/evaluator/od.php>

Lawrence Livermore National Laboratory 2017. How Lasers Work. Viitattu 5.5.2017. https://lasers.llnl.gov/education/how_lasers_work

Ocean Optics 2017. App Note: Laser Characterization Tools. Viitattu 5.5.2017. <https://oceanoptics.com/app-note-laser-characterization-tools/>

Oregon State University 2017. Definition and Properties of Laser Light. Viitattu 5.5.2017. <http://oregonstate.edu/ehs/laser/training/definition-and-properties-laser-light>

Paschotta, R. 2017. Lasers. Viitattu 5.5.2017. <https://www.rp-photonics.com/lasers.html>

Pintojen ja katteiden paloluokat, Puuinfo Oy 2012. Pintojen ja katteiden paloluokat. Viitattu 5.5.2017. <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/pintojen-ja-katteiden-paloluokat.pdf>

Puuinfo Oy 2017. Puukuitulevy. Viitattu 5.5.2017. <http://www.puuinfo.fi/puu-tieto/levytuotteet/puukuitulevy>

Säteilyturvakeskus 2017. Laserluokat. Viitattu 5.5.2017. <http://www.stuk.fi/aiheet/laserit/laserluokat>

The Centennial Edition of the classic Wood Handbook 2010. Chapter 12 .Viitattu 5.5.2017. https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr190/chapter_12.pdf

Thorlabs 2017. Certified Laser Safety Glasses. Viitattu 5.5.2017. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=762&pn=LG3B#2523

Tukes 2017. CE-merkintä. Viitattu 5.5.2017. <http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Kuluttajaturvallisuus/Kulutustavarat/CE-merkki/>

LIITTEET

Liite 1. Thorlabs lasersuoja lasien tekniset tiedot

Liite 2. Lasersuoja lasien certifiikaatti

Liite 3. Lämpötilamittauksien testikappaleen valmistuskuva

Liite 4. Materiaalin läpäisyajkojen mittausvideo

THORLABS

Laser Safety Glasses



LG3B

Description

These laser safety glasses provide CE certified and ANSI Z136 compliant laser radiation protection; these ratings are indelibly printed on the laser safety lenses to indicate the level of protection provided for specific wavelength ranges. The LG3B Laser Safety Glasses provide full optical coverage without the need for side shield protection as well as a wide field of view.

These glasses feature a Sport Style frame which closely wraps around the user's face with adjustable arm lengths and an adjustable arm joint to customize the fit of these glasses for each user. The interior dimensions of these laser goggles are 134 mm x 48 mm and have a 130 mm temple. The lenses are 68 mm x 40 mm (L x W). Each pair of laser safety glasses comes with a protective storage case, a slip on neck strap, and a cleaning cloth.

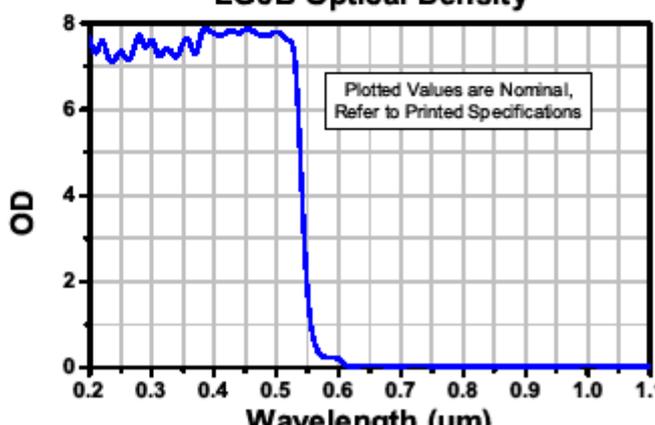
Specifications

Specification	Value
Luminous Transmittance	48%

Specification	Value
L-Rating	
180 - 315 nm	D LB7
180 - 315 nm	IR LB4
>315 - 532 nm	DIRM LB6

Graph

LG3B Optical Density



Plotted Values are Nominal,
Refer to Printed Specifications

US, Canada, & South America: +1-973-300 3000 | France: +33 (0) 970 444 844 | Europe: +49 (0) 8131-5956-0 | UK & Ireland: +44 (0)1353-654440
 Brazil: +55-16-3413 7062 | Scandinavia: +46-31-733-30-00 | Japan & Asia: +81-3-5979-8889 | China: +86 (0)21-60961722

www.thorlabs.com

August 26, 2014
TTN031266-S01, Rev A

Liite 2



Declaration of Conformity
 For CE Marked LaserShield™ Filter, Model Number ARG – LG3

Manufacturer:

NoIR Manufacturing
 Established by NoIR Laser Company, L.L.C.
 10125 Colonial Industrial Drive
 South Lyon, MI 48178, U.S.A.

Representative:

Thorlabs, Inc

NoIR Laser Company, LLC herewith declares sole responsibility that the product described below meets the requirements of the 89/686 EEC Personal Protective Equipment.

Product Name:

LaserShield

Model:

ARG

Description:

180nm-532nm OD 7+

Scale Number, (L Ratings):

**180-315 D LB7 + IR LB4
 >315-532 DIRM LB6**

in conformity with applicable regulation:

Standards:

DIN EN 207:2010-04
 Annex II of the Directive 89/686/EEC
 ANSI Z136.1 and Z87.1-2003

Notified Body Name:

DIN CERTCO GmbH

NB Number:

0196

Certificate Number:

C3426 NOIR/R1

Issued:

4.19.11

And that said product is classified Class I per rule 1 in Annex IX of the Medical Device Directive 93/42/EEC + 2007/47/EC.

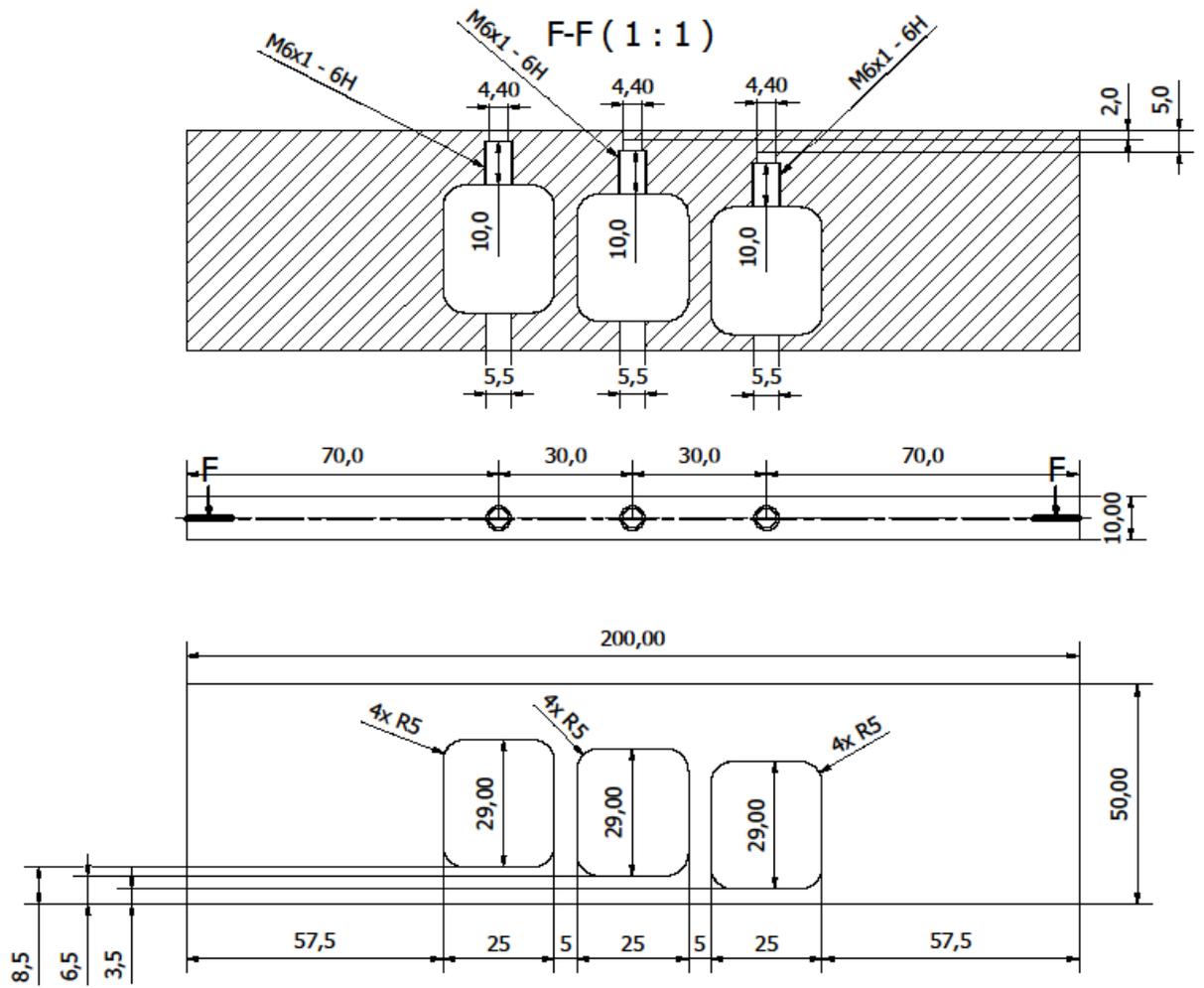
Date of Issue: 5.2.2011

Signature:

David W. Bothner
 Marketing Director

NoIR Laser Company
 Manufacturing Polycarbonate Eyewear Since 1990
 Parent Company: NoIR Medical Technologies established in 1972
 6155 Pontiac Trail * P.O. Box 159 * South Lyon, MI 48178
 800.521.9746 * 734.769.5565 * 734.769.1708 fax

Liite 3



Liite 4

Video

Kesto: 10 min 58 s

Resoluutio: 1920x1080

Nopeus: 30 fps

Audioraita: Navajo Night - Audionautix (Youtube Ad-Free Music)

Linkki: <https://youtu.be/IB0jQO6Hduc>