

# Lasertyöstöparametrien määrittäminen muovimateriaaleille

LAHDEN  
AMMATTIKORKEAKOULU  
Tekniikan ala  
Materiaalitekniikka  
Muovitekniikka  
Opinnäytetyö  
Syksy 2015  
Elena Holopainen

Lahden ammattikorkeakoulu  
Koulutusohjelma

HOLOPAINEN, ELENA:

Lasertyöstöparametrien  
määrittäminen muovimateriaaleille

Muovitekniikan opinnäytetyö, 42 sivua, 15 liitesivua

Syksy 2015

TIIVISTELMÄ

---

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutustua lasertyöstömenetelmiin ja määrittää eri muovimateriaaleille ihanteelliset työstöparametrit leikkausta ja merkitsemistä varten. Työ tehtiin Lahden ammattikorkeakoulun tekniikan alan toimeksiantona ja työn kokeellinen osuus tehtiin tekniikan alan puulaboratoriossa.

Teoriaosuudessa käydään läpi eri lasertyypit ja lasertyöstömenetelmät sekä kuvaillaan käytettyjen muovien ominaisuuksia. Käytetyt muovilaadut ovat tavallisimpia lasertyöstöön soveltuvia muovilaatuja.

Kokeellisessa osuudessa kerrotaan tarkemmin käytetyistä laitteistoista ja ohjelmistoista. Kokeet tehtiin säätämällä laitteiston tehoa ja nopeutta. Tuloksista on nähtävissä, että lasertyöstön soveltuvuus eri materiaaleille oli tapauskohtaista. Useimpia muovilaatuja oli vaikeaa tai jopa mahdotonta leikata laserilla, ja merkkauSJälkikin oli useimmilla materiaaleilla kohtalaisen heikko.

Opinnäytetyön tuloksien avulla laserlaitteiston tulevat käyttäjät voivat helposti ja nopeasti tutustua laitteiston toimintaan ja suorittaa onnistuneita merkkauksia muoveihin.

Asiasanat: laser, lasertyöstö, lasermerkkauS, laserleikkaus

Lahti University of Applied Sciences  
Degree Programme in Plastics Engineering

HOLOPAINEN, ELENA:                      Determining laser processing  
parameters for plastic materials

Bachelor's Thesis in Plastics Engineering 42 pages, 15 pages of  
appendices

Autumn 2015

ABSTRACT

---

The purpose of this thesis was to explore various types of laser processing methods and specify ideal processing parameters for laser cutting and laser marking for plastics. The thesis was commissioned by the Faculty of Technology of Lahti University of Applied Sciences.

The theoretical part of the thesis describes various types of lasers and laser processing methods. The theoretical part also describes the materials used in the experiments. These materials are commonly used in laser processing.

The main focus of the thesis was on the empirical part. In this part, the equipment and software used in the tests are described. The tests were conducted by adjusting the power and speed of the laser. The test results clearly indicate that laser processing is challenging to perform on most plastic materials.

Key words: laser, laser marking, laser cutting

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	TEORIAA LASERISTA	2
2.1	Laservalo ja sen syntyminen	2
2.2	Laserin ominaisuudet	4
3	LASERTYYPIT	7
3.1	Kiinteän aineen laserit	7
3.2	Kaasulaserit	9
3.3	Puolijohdelaserit	11
3.4	Muita lasereita	12
4	LASERTYÖSTÖMENETELMÄT	13
4.1	Laserleikkaus	13
4.2	Lasermerkkaus	15
4.3	Laserhitsaus	18
5	LASERTYÖSTÖN PARAMETRIT	21
5.1	Materiaaliparametrit	21
5.2	Prosessiparametrit	23
5.3	Laserparametrit	24
6	KÄYTETYT MATERIAALIT	26
6.1	Polymetyylimetakrylaatti	26
6.2	Polykarbonaatti	27
6.3	Polyeteenitereftalaatti	28
6.4	Polyeteeni	28
6.5	Polypropeeni	29
6.6	Polyasetaali	30
6.7	Polyvinyylikloridi	30
7	TESTAUS	32
7.1	Laitteisto	32
7.2	Parametrien suunnittelu	33
7.3	Testikuvat	34
8	TULOKSET	35
9	YHTEENVETO	41

LÄHTEET

43

LIITTEET

46

# 1 JOHDANTO

Ensimmäinen laserlaitteisto kehitettiin jo 1960-luvulla, minkä jälkeen laserin käyttö teollisuudessa erilaisissa työstö sovelluksissa on kasvattanut huomattavasti suosiotaan. Laserin avulla eri materiaaleja pystytäänkin esimerkiksi leikkaamaan ja merkitsemään nopeasti ja edullisesti.

Tämä opinnäytetyö tehtiin Lahden ammatikorkeakoulun tekniikan alan toimeksiantona. Työn tavoitteena oli määrittää eri muovimateriaaleille soveltuvat työstöparametrit, joiden avulla tutkittavia materiaaleja voitaisiin leikata ja merkitä. Työhön valikoitiin lähinnä yleisesti lasertyöstöön soveltuvia muovilaatuja, joita tässä työssä onkin seitsemän erilaista.

Teoriaosuudessa kerrotaan yleisesti laserista ja laservalon syntymismekanismista, eri lasertyypeistä sekä lasertyöstömenetelmistä. Lisäksi käytettyjen materiaalien ominaisuuksista on kerrottu tarkemmin. Tutkivassa osuudessa on kuvailtu käytetyt laitteistot ja ohjelmistot sekä kerrottu tarkemmin työn etenemisestä. Parametreina käytettiin laserin tehon ja nopeuden välistä suhdetta. Testauksessa käytettäviä merkittäviä kuvioitakin oli työhön otettu useampi, jotta tulevat laserlaitteiston käyttäjät voisivat paremmin tutustua eri mahdollisuuksiin, eli mitkä parametrit sopivat millaiseenkin työhön. Työn tuloksia on tarkoitus hyödyntää uusien käyttäjien kouluttamisessa.

## 2 TEORIAA LASERISTA

Laser tarkoittaa valon vahvistamista stimuloitun säteilyn emissiolla, ja se muodostuu sanoista Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Jo vuonna 1916 Einstein esitti periaatteen laserin toiminnasta, mutta vasta vuonna 1960 Maiman sai luotua ensimmäisen toimivan näkyvää valoa lähettävän laser-laitteiston. (Peltonen, Perkiö ja Vierinen 2012, 379.) Kuitenkin vasta 80-luvun loppupuolella laserin käyttö teollisuudessa alkoi yleistymään ja 90-luvulle mentäessä uusien lasertyyppien ja sovellusten kehittäminen kasvoi huimasti (Kujanpää, Salminen, Vihinen 2005, 14).

Kaikki laserit ovat optisia vahvistimia, jotka muodostuvat kolmesta komponentista. Näitä ovat laseroiva väliaine, kaksi peiliä sekä pumppausenergia. Väliaine on laserissa se osa, jonka avulla lasersäde voi syntyä, ja sen olomuoto voi olla esimerkiksi kiinteä tai kaasumainen. Peilien käyttö mahdollistaa puolestaan varsinaisen laseroinnin. Peileistä toisen tulee aina olla osittain läpäisevä, jolloin osa säteestä pääsee ulos, lopun säteestä heijastuessa takaisin. Tämä toteutetaan käyttämällä peilejä, joissa keskellä on säteen läpi päästävä reikä, tai vaihtoehtoisesti peiliä, joka on pienempi kuin säteen poikkileikkaus. Pumppausenergiaa käytetään virittämään elektronit korkeammalle tasolle. Vaadittava energia tuodaan laseriin joko sähköisesti tai käyttämällä kaari- tai salamalamppuja. (Kujanpää ym. 2005, 33 & 53.)

Laseria käytetään hyväksi eri työstömenetelmissä, joista yleisimmät ovat laserleikkaus, -hitsaus, -merkkäus ja -poraus. Laseria käytetään hyväksi myös monissa muissa sovelluksissa, joista tulen kertomaan myöhemmin tarkemmin.

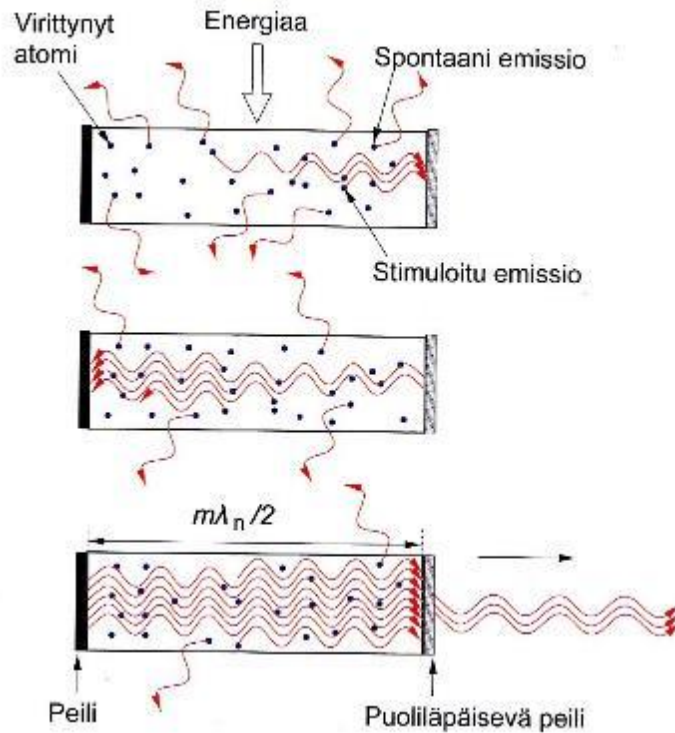
### 2.1 Laservalo ja sen syntyminen

Normaalissa huoneen lämpötilassa atomissa olevat elektronit ovat tietyöllä energiatasolla. Tällöin elektronit ovat niin sanotussa perustilassa. Kun materiaaliin tuodaan energiaa, atomissa olevat elektronit alkavat poistua

normaalilta perustasoltaan kohti korkeampaa energiatasoa. Kyseistä tapahtumaa kutsutaan virittäytymiseksi. Elektronit ovat virittäytyneessä tilassa kuitenkin hyvin epästabiileja, jonka vuoksi ne pyrkivät takaisin perustilaansa. Palatessaan alempaan tilaan, elektroni vapauttaa energiaa fotonin muodossa. Energia poistuu tällöin atomista sähkömagneettisena säteilynä, jolla on tietty aallonpituus. Kun syntyneet fotonit kohtaavat virittäytyneessä tilassa olevan atomin, aiheuttaa se virittyneen tilan purkautumisen, joka synnyttää vuorostaan toisen samalaisen fotonin. Atomien jatkaessa matkaa, muodostan aina yhä uusia fotoneja, valon energia vahvistuu. Kyseisellä tavalla muodostuneilla fotoneilla on kaikilla sama suunta ja vaihe. (Kujanpää ym. 2005, 34.)

Varsinainen laserointi tapahtuu resonaattorissa, joka muodostuu kahdesta peilistä sekä laseroivasta väliaineesta (KUVIO 1). Lasersäde muodostuu näiden kahden peilin väliin. Valon liikkuminen edestakaisin peilien välillä voimistaa stimuloitua emissiota. Toinen peileistä on osittain heijastava peili, jonka ansiosta osa säteestä pääsee ulos. (Kujanpää ym. 2005, 34.) Lisäksi, jotta eri aikaan stimuloitun emission ansiosta syntyneet fotonit olisivat saman vaiheisia, tulee peilien välimatkan oltava synnyttävän laservalon aallonpituuden puolikkaan monikerta eli  $l = m \frac{\lambda_n}{2}$ . Tällöin resonanssiehto on voimassa. Kaavassa  $l$  on resonaattorin pituus,  $m$  on kokonaisluku ja  $\lambda_n$  vastaa aallonpituutta laseraineessa. (Peltonen ym. 2012, 380–381.)





KUVIO 1. *Laserin toimintaperiaate.* (Peltonen ym. 2012, 381.)

## 2.2 Laserin ominaisuudet

Laservalo on sähkömagneettista säteilyä samoin kuin näkyvä valo. Näkyvästä valosta eroten laserilla on kuitenkin ominaisuuksia, jotka tekevät siitä erityisen. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi valon yhdensuuntaisuus, yksivärisyys sekä samanvaiheisuus (Kujanpää ym. 2005, 35). Yhdensuuntaisuuden vuoksi lasersäde voidaankin fokusoida erittäin tarkasti tiheeseen kohtaan kappaleen pintaa (Peltonen ym. 2012, 381).

Laservalon yhdensuuntaisuus tarkoittaa sitä, että säde ei laajene matkan funktiona kovinkaan paljon. Yhdensuuntaisuus saadaan toteutettua peilien avulla, jotka ovat suorassa ja yhdensuuntaisia. Säteen yksivärisyys puolestaan johtuu siitä, että siinä esiintyy vain yhdeltä taajuudelta tulevaa valoa. (Peltonen ym. 2012, 381.) Säteen väri riippuu käytettävästä väliaineesta ja aallonpituudesta. Laserissa käytettävät aallonpituudet vaihtelevatkin yleisesti välillä 0,1-10  $\mu\text{m}$ . (Kujanpää ym. 2005, 35.) Laservalon samanvaiheisuus tarkoittaa sitä, että sen valoallot ovat

toisiinsa nähden samassa suhteessa. Kyseistä ilmiötä kutsutaan inferenssi ilmiöksi. Se on siis tilanne, jossa lähes kaikki laserista tulevat valoaalot ovat koherentteja keskenään, minkä vuoksi samassa kohdassa kohtaavat aaltoliikkeen huiput tai samansuuntaiset poikkeamat vahvistavat toisiaan. Kyseinen ilmiö vaikuttaa myös lasersäteen voimakkuuteen. (Mikä laser on? 2003, 3-4.)

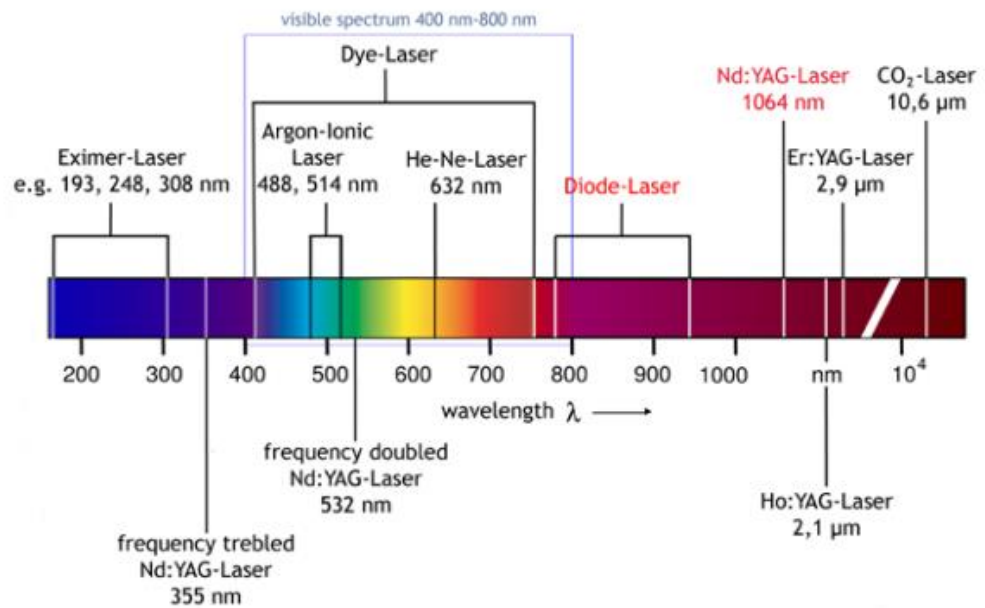
Lasersäteelle on myös ominaista, että sillä on tietty tehojakauma, eli sen intensiteetti ei ole tasainen säteen poikkileikkauksessa. Moodia eli tehojakamaa kuvataan TEM-luvulla. TEM-luku (Transverse Electric Mode) kuvaa alaindekseillä säteessä olevien tehohuippujen määrää ja symmetrisyyttä. Esimerkiksi TEM<sub>00</sub>- moodilla on paras tehotiheys. TEM<sub>00</sub>- moodissa teho on keskittynyt säteen keskelle, jolloin sen avulla saadaan aikaiseksi erittäin hyvä fokusoitavuus. Kyseinen moodi onkin ideaalinen leikkaus- ja poraussovelluksissa, mutta usein suuritehoisten lasereiden kanssa joudutaan kuitenkin käyttämään TEM<sub>10</sub>-moodia. TEM<sub>10</sub>-moodissa teho on jakautunut tasaisemmin, jolloin laserin ulostuloikkuna ei kuumene liikaa. Lisäksi on olemassa mm. TEM<sub>01</sub>-moodi, joka on renkaan muotoisesti muodostunut, ja sitä kutsutaankin usein donut-moodiksi. Kyseistä moodia käytetään lähinnä hitsauksessa ja pintakäsittelyissä. Moodin muodolla on erittäin suuri vaikutus juuri CO<sub>2</sub>-lasereita käytettäessä. Muissa lasereissa sen vaikutus ei välttämättä ole niin suuri, rakenteellisuudesta johtuen. (Kujanpää ym. 2005, 36–37)

Polarisaatiolla on myös erittäin suuri vaikutus lasertyöstössä. Vaikka lasersäteelle on ominaista, että sen aallonsäteet ovat samassa vaiheessa keskenään, esiintyy sillä myös polarisaatiota. Polarisaatio tarkoittaa tilannetta, jossa lasersäteen sähkö- ja magneettikentät eivät ole tasaisesti yhtä suuria joka suuntaan. Laservalo onkin yleensä korostunut johonkin suuntaan. Tästä ominaisuudesta johtuen lasersädettä joudutaan usein muokkaamaan ympyräpolarisoiduksi tai taso- eli lineaaripolarisoiduksi säteeksi. Tasopolarisaatiossa sähkö- ja magneettikentät laitetaan värähtelemään tietyn suuntaisesti. Tasopolarisaatiolla onkin suuri vaikutus leikkauksessa. Ympyräpolarisaatiossa lasersäde on puolestaan symmetrinen jokaiseen suuntaan. Polarisaatiotaso kiertää tällöin 360°

aallonpituuden matkalla säteen ympäri. Ympäripolarisaatiota hyödynnetään usein kun työstöjäljen tulee olla samanlaista jokaiseen suuntaan. (Kujanpää ym. 2005, 37–38.)

### 3 LASERTYYPIT

Laserit voidaan jakaa kiinteään aineen, kaasumaisiin sekä nestemäisiin lasereihin sen perusteella mikä on niissä käytettävä väliaine. Lisäksi laserit voidaan jakaa eri kategorioihin sen perusteella miten ne lähettävät valoa. Laserit voivat siis toimia jatkuvatehoisina sekä pulssimaisesti. Eri lasereilla pystytään lähettämään eri aallonpituuksilla olevaa valoa (KUVIO 2), minkä vuoksi lasereille löytyy huomattava kirjo eri käyttösovelluksia.



KUVIO 2. Eri lasertyyppien lähettämät aallonpituudet. (Evonik Industries 2015.)

#### 3.1 Kiinteän aineen laserit

##### Rubiinikidelaser

Malmanin kehittämä ensimmäinen laser oli rubiinikidelaser. Menetelmässä käytettävä rubiinikide valmistetaan keinotekoisesti ja se koostuu  $Al_2O_3$ :sta (alumiinioksidi), johon on lisäksi sekoitettu noin 0,01-0,5 %  $Cr_2O_3$ :a (kromioksidi). Toiminnassa käytetään hyödyksi vihreää valoa, jonka aallonpituus on n. 550 nm ja sinistä valoa jonka aallonpituus on n. 400 nm. Kyseisillä aallonpituuksilla saadaan aikaiseksi kromiatomien

virittäytyminen. Laserista ulos saatavan valon aallonpituus puolestaan tyypillisesti 694,3 nm. (Peltonen ym. 2012, 384–385.)

Rubiinikidelaserin haittoina on sen huono hyötysuhde, joka on n. 0,1-1 %. Tästä johtuen laser on melko tehoton, ja se vaatii hyvän ilma- tai vesijäähdytyksen. Kyseinen laser on yleensä pulssitettu ja yhden pulssin kesto on n.1 ms. Yhden pulssin energia taso on noin taas 100 joulea. Rubiinikidelaseria käytetään lähinnä interferometreissä ja holografiassa. (Peltonen ym. 2012, 385.)

#### Neondinium-YAG-laser

Neondinium-YAG eli Nd:YAG-laserit ovat yleisimpiä käytössä olevia kiinteän aineen lasereita. Nd:YAG-lasereissa n. 1 %  $Y^{3+}$ -ioneista (yttrium-ioni) on korvattu  $Nd^{3+}$ -ioneilla (neodyymi-ioni), jotka on lisätty  $Y_3Al_5O_{12}$ :iin (yttrium-alumiini-granaatti). (Kujanpää ym. 2005, 58; Peltonen ym. 2012, 385.) Kyseisen lasertyyppin etuina ovat kiteen hyvät optiset ja mekaaniset ominaisuudet sekä hyvä lämmönjohtokyky. (Peltonen ym. 2012, 385.)

Nd-YAG-laserit voidaan jakaa toimintaperiaatteensa mukaan eri ryhmiin joita ovat mm. jatkuvatoimiset, pulssattavat ja diodipumpatut Nd-YAG-laserit (Kujanpää ym. 2005, 58). Nd-YAG-laserilla pystytään lähettämään säteilyä, jonka maksimi aallonpituus on noin 1060 nm, mutta se voi olla joissain sovelluksissa pienempikin. Sen keskimääräinen teho on useita satoja watteja, mutta hetkellisesti se voi saavuttaa jopa 100 kW:n tai jopa 100 MW:n tehon riippuen pulssin kestosta. (Peltonen ym. 2012, 385–386.) Suurempi teho saadaan aikaseksi liittämällä useampi kide sarjaan. Kyseisten lasereiden hyötysuhde vaihtelee välillä 3-10 % (Kujanpää ym. 2005, 54 & 60).

Hyötysuhteensa sekä suuremman tehonsa vuoksi Nd-YAG-laserit ovatkin ylivoimaisesti parempia verrattuna rubiinikidelasereihin. Nämä tekijät mahdollistavatkin niiden laajemmat käyttö mahdollisuudet. Niitä käytetäänkin mm. kappaleiden laserhitsauksessa ja –leikkauksessa sekä lääketieteessä laserkirurgiassa (Peltonen ym. 2012, 386).

## 3.2 Kaasulaserit

### Helium-neon-laser

Helium-neon-laserissa eli HeNe-laserissa käytetään heliumia ja neonkaasua matalassa paineessa. Heliumin ja neonkaasun suhde vaihtelee suhteessa 5:1 tai 10:1. Sekoitussuhdetta muuttamalla voidaan vaikuttaa laserin lähettämän valon aallonpituuteen. 5:1 suhdetta käyttäen valon aallon pituus on 632,8 nm, kun taas sekoitussuhdetta 10:1 käyttämällä valon aallonpituus on 1152 nm. Näistä yleisempi on pienempää valon aallonpituutta hyödyntävä laser. (Peltonen ym. 2012, 386.)

Laserin etuina on sen edullisuus, kestävyys ja helppokäyttöisyys. HeNe-laserin huonona puolena on kuitenkin sen alhainen hyötysuhde, joka on n. 0,01-0,1 %, eli samaa luokkaa kuin rubiinikidelaserilla. Kyseistä laseria käytetäänkin yleensä sovelluksissa, jossa suurta tehoa ei vaadita. Laserista saatava teho vaihtelee välillä 0,5-10 mW. Lisäksi HeNe-laserin toiminta on jatkuvatoimista. (Peltonen ym. 2012, 386–387.)

### Argon- ja kryptonlaserit

Argon- ja kryptonlasereiden toiminta perustuu argon- ja kryptonatomien ionisoimiseen korkean jännitteen avulla, minkä jälkeen syntyneet ionit ( $Ar^+$ ,  $Ar^{2+}$ ,  $Kr^+$  tai  $Kr^{2+}$ ) viritetään korkeammalle energiatasolle. Kyseisien lasereiden etuna voidaan pitää sen mahdollistamaa tapaa lähettää eri aallonpituuksilla olevaa valoa. (Peltonen ym. 2012, 387.) Näin ollen laserin säteen väriä voidaan vaihdella. Kyseisen ilmiön vuoksi lasereita käytetäänkin usein laservalonäytöksissä (Peltonen ym. 2012, 387). Haittoina on kuitenkin laserin erittäin huono hyötysuhde, joka onkin vain noin 0,001 – 0,01 % (Peltonen ym. 2012, 387).

Huonon hyötysuhteen vuoksi argon- ja kryptonlaserit tarvitsevat tehokasta jäähdystystä. On kuitenkin huomattava, että erittäin huonosta hyötysuhteesta huolimatta, laserin teho voi olla jopa 20 W. (Peltonen ym. 2012, 387.)

### Hiilidioksidilaser

Hiilidioksidilaser eli CO<sub>2</sub>-laser on tehokkain kaasulaser, ja se voidaan jakaa eri tyyppihin sen perusteella, miten energia tuodaan kaasuun (Peltonen ym. 2012, 387). Kyseisiä lasertyyppejä ovat suljettu resonaattori laser, hidas- ja pitkä pitkittäisvirtaus laser, poikittaisvirtauslaser, diffuusiojäähdytetty laser sekä TEA-laser (Kujanpää ym. 2005, 55).

CO<sub>2</sub>-laserissa käytetään hiilidioksidin lisäksi typpeä ja heliumia. Laserissa typen tehtävänä on toimia niin sanottuna herättäjänä, eli se auttaa sähköisen energian siirtämistä CO<sub>2</sub>-molekyylisiin. Helium toimii puolestaan tehokkaana jäähdyttäjänä. Kaasuseoksen suhteet vaihtelevat tapauskohtaisesti, mutta tyypillisin seos koostuu 60 – 85 % heliumista, 13–35 % typestä ja 1-9 % hiilidioksidista. (Kujanpää ym. 2005, 54–55.)

CO<sub>2</sub>-laserilla laserin tehot riippuvat sen rakenteesta, mutta yleisesti ne vaihtelevat 10 W–100 kW:n välillä (Peltonen ym. 2012, 388). Laserin hyötysuhde puolestaan vaihtelee välillä 5 - 20 % ja sen synnyttämän valon aallonpituus on 10600 nm tai 9600 nm (Kujanpää ym. 2005, 54). Hiilidioksidilaserilla voidaan lisäksi aikaansaada jatkuva tai pulssimainen lasersäde (Peltonen ym. 2012, 388). Tämän vuoksi CO<sub>2</sub>-laser onkin hyvin monipuolinen, ja sillä onkin hyvin laajat käyttömahdollisuudet teollisuudessa. Sitä käytetään kuitenkin tyypillisimmin metalliteollisuudessa hitsauksessa, leikkurina sekä reikien työstössä (Peltonen ym. 2012, 388).

### Excimer-laser

Excimer-laserin toiminta perustuu epästabiliin kaasuyhdisteiden käyttöön. Laserin kaasuyhdiste muodostuu pienestä määrästä jalokaasua (esim. argon (Ar), krypton (Kr) tai ksenoli (Xe)) ja halogeenista (esim. fluori (F), kloori (Cl) tai bromi (Br)). Lisäksi kaasuyhdisteessä käytetään heliumia tai neon-kaasua. (Peltonen ym. 2012, 393.) Tyypillisin excimer-laserissa käytettävä kaasuyhdiste on KrF-yhdiste eli kryptonin ja fluorin välinen yhdiste, missä on mukana neon-kaasu. (Kujanpää ym. 2005, 69). Muita

mahdollisia kaasuyhdisteitä ovat mm. ArF, KrCl, XeCl sekä XeF (Peltonen ym. 2012, 392).

Excimer-laserilla pystytään lähettämään erittäin lyhytaaltoista ultraviolettista valoa. Sen lähettämän valon aallonpituudet riippuvat käytettävästä kaasuyhdisteestä. (Peltonen ym. 2012, 392). Excimer-laserit ovat tyypiltään pulssilasereita ja niiden maksimiteho vaihtelee välillä 100 - 200 W. Nykyisin kyseisiä lasereita käytetään lähinnä puolijohdepiirien valmistuksessa, mutta Peltonen, Perkiö ja Vierinen arvioivat, että tulevaisuudessa lasereiden käyttö kasvattaa suosiotaan korkean teknologian sovelluksissa sekä lääketieteessä. (Peltonen ym. 2012, 393.)

### 3.3 Puolijohdelaserit

Puolijohdelasereista puhuttaessa tarkoitetaan usein niin sanottuja diodilasereita. Puolijohdelasereita on paria eri tyyppiä riippuen niissä käytettävästä väliaineesta. (Kujanpää ym. 2005, 54.) Puolijohdelasereiden toiminta perustuu kuitenkin yleisesti hohtodiodien käyttöön. Hohtodiodit valmistetaan yleensä galliumarsenidiasta (GaAs) tai galliumfomfidista (GaP) tai näiden kahden diodin yhdistelmästä. (Peltonen ym. 2012, 389.)

Puolijohdelasereille on tyypillistä niiden pieni koko. Niiden pituus on n. 500  $\mu\text{m}$  ja paksuus 10  $\mu\text{m}$ . Laserista saadun valon aallonpituus riippuu käytetystä väliaineesta. Esimerkiksi GaAs-laserilla lähetetyn aallon pituus on n. 904 nm kun taas GaAlAs-lasereiden lähettämä aallon pituus vaihtelee välillä 750 - 904 nm. Nykyisin on hyvin tyypillistä käyttää puolijohdelasereita, jolla on usempi kerros. Tekniikkaa hyödyntäen saadaan laserista tehokkaampi, ja huoneenlämmössä toimiessaan ne voivat lähettää jatkuvaa lasersädettä. (Peltonen ym. 2012, 390–391.) Kaikista diodilasereista yleisin diodilaser tyyppi on GaAs-laserit. Niiden yleisin käyttösovelluskohde ovat CD-soittimet (Peltonen ym. 2012, 391.)



### 3.4 Muita lasereita

Muihin lasertyyppeihin voidaan lukea esimerkiksi kuitulaser. Kuitulaserin toimintaperiaate perustuu siihen, että laser synnytetään suoraan optisen kuidun sisällä. Laserkuidun sisällä oleva väliaine toimii laseroivana osana, kun siihen pumpataan diodilaserin valoa. Itse kuitu toimii tässä tapauksessa resonaattorina. Kuitulaserin avulla synnytetty lasersäde on erittäin pieni, ja sen säteenlaatu on erittäin hyvä. Tehot vaihtelevat tyypillisesti 10–20 kW:in välillä. (Kujanpää ym. 2005, 68.)

## 4 LASERTYÖSTÖMENETELMÄT

Laseria hyödynnetään hyvin monessa eri työstömenetelmässä niin teollisuudessa kuin muilla aloilla. Tyypillisimmät sovelluskohteet ovat kappaleiden leikkaaminen ja merkkaaminen sekä hitsaus. Laseria käytetään kuitenkin yhä enemmän myös erilaisissa kappaleiden pintakäsittelyissä, poraamisessa sekä prototyyppien valmistuksessa.

### 4.1 Laserleikkaus

Laserleikkaus on eniten tunnettu ja käytetty laserin sovellusala teollisuudessa. Muihin leikkausmenetelmiin verrattuna laserleikkaus on nopea ja tästä johtuen edullinen menetelmä, jolla saadaan aikaiseksi ohut leikko. Suurena etuna pidetään myös vähäistä lämmönvaikutusta kappaleeseen. (Kujanpää ym. 2005, 142.) Tästä on hyötyä esimerkiksi muoveja leikatessa, jolloin kappaleiden ominaisuudet eivät muutu lämmön vuoksi. Prosessina laserleikkaus on termistä, eli materiaali sulaa tai höyrystyy lasersäteen siihen osuessa (Kujanpää ym. 2005, 133).

Laserleikkaus voidaan jaotella eri menetelmiin sen perusteella miten leikkautuminen tapahtuu. Eri menetelmiä ovat siis sulattava laserleikkaus, polttoleikkaus sekä höyrystä laserleikkaus. Kyseisiä menetelmiä on myös mahdollista yhdistellä joissain määrin, jolloin kustannukset usein alenevat (Kujanpää ym. 2005, 136).

#### Sulattava laserleikkaus

Sulattavassa laserleikkauksessa käytetään hyväksi korkeassa paineessa olevaa inerttiä kaasua. Käytetty kaasu on tyypillisesti argonia tai typpeä, ja se voidaan paineistaa jopa 20 bar asti. (Kujanpää ym. 2005, 135.)

Prosessi perustuu täysin lasersäteestä saatavaan tehoon, joka aiheuttaa materiaalin sulamisen. Käytetty laser on tämän vuoksi todella tehokas, ja se onkin usein huomattavasti tehokkaampi kuin esimerkiksi polttoleikkauksessa käytettävä lasertyyppi. (Rofin 2015a.)

Sulattavassa laserleikkauksessa voidaan käyttää sekä kiinteänaineen lasereita sekä CO<sub>2</sub>-lasereita. CO<sub>2</sub>-laserit ovat kuitenkin yleisemmin käytettyjä kun leikataan paksuja kappaleita. Sulattavaa laserleikkausta voidaan hyödyntää aina 15 mm ainepaksuuksiin asti. Tällä leikkausmenetelmällä leikataan tyypillisimmin alumiinia sekä vahvasti seostettuja teräksiä. (Rofin 2015a.)

#### Polttoleikkaus

Polttoleikkauksessa käytetään happea leikkaavana kaasuna. Tässä menetelmässä leikkautuminen tapahtuu lisäenergian avulla. Kyseinen lisäenergia saadaan materiaalin eksotermisestä reaktiosta. Tarvittava reaktio saadaankin prosessissa aikaiseksi lämmittämällä materiaali syttymislämpötilan yläpuolelle. (Rofin 2015a.)

Kuten sulattavassa laserleikkauksessa, polttoleikkaus voidaan suorittaa käyttämällä kiinteän aineen lasereita sekä CO<sub>2</sub>-lasereita. Myös kyseisessä menetelmässä CO<sub>2</sub>-laserin käyttö on suositeltavaa paksuilla kappaleilla. Tällä menetelmällä pystytään kuitenkin leikkaamaan jopa 25 mm:n paksuisia kappaleita, jotka ovat tyypillisimmin valmistettu matalaseoksisista teräksistä. (Rofin 2015a.)

#### Höyrystävä laserleikkaus

Höyrystävä laserleikkaus perustuu materiaalin sulamiseen sen absorboidessa energiaa lasersäteestä. Sulamisen yhteydessä materiaali alkaa myös osittain höyrystymään. Menetelmässä käytetään apuna kaasuvirtausta, joka puhaltaa syntyneen höyryn pois kappaleesta. (Kujanpää ym. 2005, 135; Rofin 2015a.) Prosessi vaatii huomattavaa energiaa, minkä vuoksi leikkausnopeus jää verraten hyvin alhaiseksi. Höyrystävä laserleikkaus onkin menetelmistä hitain. (Rofin 2015a.)

Höyrystävässä laserleikkauksessa työstettävien kappaleiden ainepaksuudet ovat erittäin ohuita. Tämä johtuu siitä, että kerralla päästään vain noin 10 mikronin työstösyvyyteen. Kappaleet eivät näin ollen ylitä usein 1 mm paksuutta, sillä käsittely joudutaan toistamaan useamman kerran. (Rofin 2015a.)

Menetelmän etuina voidaan kuitenkin pitää sen soveltuvuutta useille eri materiaaleille. CO<sub>2</sub>-lasereita käytettäessä leikkaus voidaan suorittaa esimerkiksi muoveille sekä keraameille. Kiinteän aineen lasereita käytettäessä voidaan leikata puolestaan joitakin metalleja sekä timantteja (Rofin 2015a).

## 4.2 Lasermerkkkaus

Laseria käytetään hyödyksi hyvin erilaisten ja eri materiaaleista tehtyjen kappaleiden merkitsemiseen. Lasermerkkauksen etuina on sen nopeus, mahdollisuus toteuttaa työstö ilman kosketusta sekä sen avulla saatava kestävä ja selkeä merkki kappaleessa (Kujanpää ym. 2005, 206).

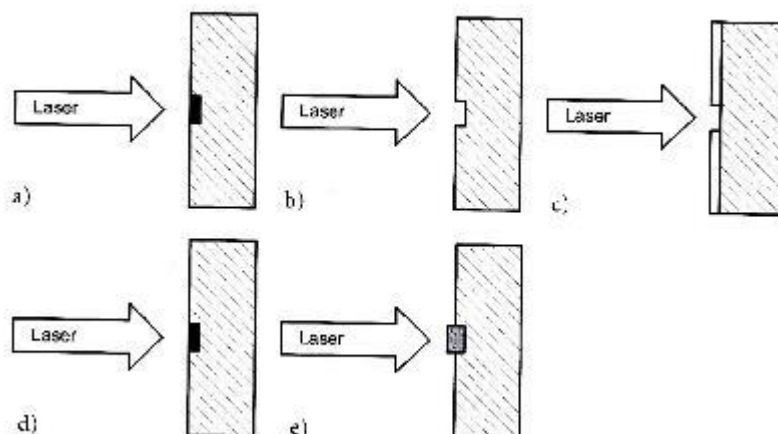
Merkintä voidaan suorittaa käyttämällä eri tekniikoita. Näistä nykyisin yleisimmin teollisuudessa käytetty tapa on vektorimerkkauksen avulla tehty merkintä (Rofin 2015b). Vektorimerkkauksessa lasersäde ohjataan haluttuun kohtaan käyttämällä apuna kahta nopeasti liikkuvaa peiliä, joita ohjallaan tietokoneen avulla. Kyseisessä menetelmässä tarvittavaa tietokoneohjelmistoa voidaan käyttää tavallisessa pöytäkoneessa. (Kujanpää ym. 2005, 206.)

Muita merkkaustekniikoita ovat taas maskimerkkkaus ja pistematriisimerkkkaus. Maskimerkkauksessa lasersäteen ja työstettävän kappaleen välissä on säteen kulun estävä maski. Lasersäde pyyhkäistään yli kappaleen, ja merkintä muodostuu niihin kohtiin, joissa maskia ei ole. Menetelmä on nopea, mutta erittäin joustamaton.

Pistematriisimerkkauksessa apuna käytetään puolestaan optista järjestelmää, jota liikutellaan koko ajan. Kootut pulssimaiset lasersäteet pyyhkäisevät pinnan, samalla kun optinen järjestelmä liikkuu toiseen suuntaan. (Kujanpää ym. 2005, 207–208.)

Lasermerkintä menetelmät voidaan jakaa pääpiirteittäin neljään eri menetelmään (KUVIO 3). Näitä ovat kaivertaminen, pinnan poistaminen, lämpökäsittely sekä värin muutos. Voidaankin siis todeta, että jaottelu

perustuu tapaan miten materiaali käyttäytyy tai poistuu kappaleen pinnalta laser säteen vaikutuksesta johtuen.



KUVIO 3. Lasermerkkäusmenetelmät: a) päästövärjäys eli lämpökäsittely b) laserkaiverrus c) pinnan poistaminen d) värin muutos e) vaahdotus. (Kujanpää ym. 2005, 210.)

#### Kaivertaminen

Kaivertaminen perustuu ablaation hyödyntämiseen, eli laser aiheuttaa materiaalissa sulamista tai höyrystymistä (Rofin 2015b). Kaiverruksessa käytetään suurella teholla toimivia lyhyitä pulssimaisia lasereita. Lämpötila muodostuu tällöin erittäin korkeaksi, jolloin materiaali höyrystyy ja pinnalle muodostuu syvä jälki. Jäljen näkyvyyttä voidaan myös lisätä hyödyntämällä värillisiä oksideja. Menetelmän etuina voidaan pitää sen nopeutta ja soveltuvuutta lähes kaikille materiaaleille. (Korn 2012; Kujanpää ym. 2005, 210.)

#### Pinnan poistaminen

Kuten kaiverruksessa lasersäde höyrystää kappaleen pintakerroksen pois. Menetelmä eroaa kaiverruksesta kuitenkin siten, että poistetun aineen alta paljastuu erivärinen materiaali. Menetelmä kehitettiin niin sanottuihin yö ja päivä – merkkauksiin, jossa alta paljastuu erivärinen muovi. Nykyisin sitä hyödynnetään kuitenkin usein myös poistamaan peiteväri läpinäkyvistä kappaleista. Muovien lisäksi kyseistä merkkäusmenetelmää käytetään

usein anodisoitujen alumiinikappaleiden sekä muiden pinnoitettujen metallien merkkaukseen. (Rofin 2015b, Kujanpää ym. 2005, 210.)

### Lämpökäsittely

Lämpökäsittelystä puhuttaessa tarkoitetaan päästövärjäystä. Käsittely suoritetaan kohdistamalla lasersäde kappaleen pinnalle. Kyseinen kohta pinnasta kuumennetaan lähelle materiaalin sulamispistettä, johon muodostuu tällöin oksidikerros. Merkin väri riippuu käytetystä materiaalista sekä lämpötilasta (Korn 2012; Kujanpää ym. 2005, 209.)

Käsittely voidaan suorittaa useimmille metalleille sekä titaanille. Menetelmää hyödynnetään kuitenkin eritoten ruostumattomien terästen merkkauksessa. (Korn 2012; Rofin 2015b.) Ainoa vaatimus käsittelylle on, että materiaali muuttaa väriään sen hapettuessa. Menetelmän hyötyinä voidaan pitää sen aiheuttaman tunkeman vähyyttä, eli kappaleen pinta ei juurikaan käsittelyssä vaurioidu. Menetelmän haittapuolena on sen hitaus, sillä se perustuu lämmönjohtumiseen. (Kujanpää ym. 2005, 209.)

### Väriin muutos

Väriin muutos perustuu muovissa olevan pigmentin muutokseen, kun siihen kohdistetaan lasersäde. Pigmentti reagoi näin ollen tuodun säteen energiaan ja muuttaa materiaalin optisia ominaisuuksia eli väriä. (Kujanpää ym. 2005, 210.)

Riippuen käytetystä muovista on syntynyt merkki joko tumma tai vaalea. Tummat jäljet syntyvät hiiltymisen johdosta (Rofin 2015b). Vaaleiden muovien merkkauksessa voidaan käyttää apuna hiilimustaa. Hiukkaset korostavat syntynyttä jälkeä. Tummillle muoveille saadaan puolestaan vaalea erottuva jälki hyödyntäen vaahdottomista. Joillekin muovilaaduille on tyypillistä, että laser saa aikaan pinnan kuplimista, saaden aikaan vaalean erottuvan jäljen. Usein tällä menetelmällä pintaan muodostuu kuplimisen johdosta kohokuvio. (Korn, 2012.)

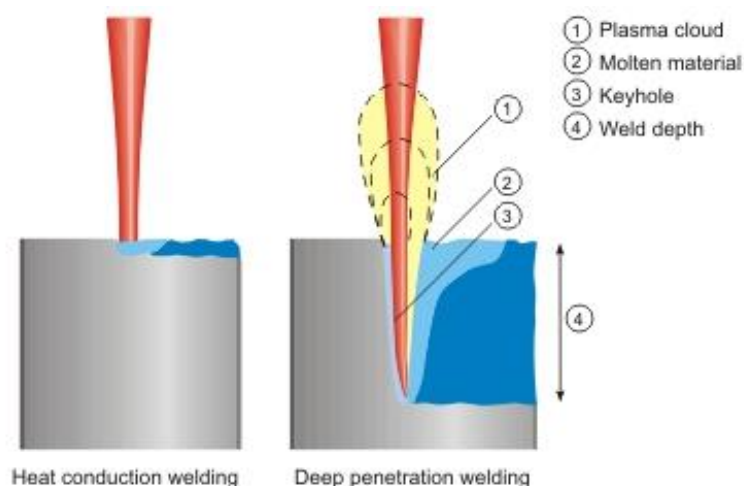
### 4.3 Laserhitsaus

Laserhitsauksen etuina ovat sen suuri hitsausnopeus, sen synnyttämä syvä ja kapea hitsi sekä prosessin joustavuus (Kujanpää ym. 2005, 157). Laserhitsausta hyödynnetään hyvin paljon varsinkin autoteollisuudessa, jossa nopeus ja hitsien erinomainen laatu on erittäin tärkeää. Laserhitsauslaitteisto pystytäänkin liittämään osaksi robottia, jolloin hitsin laatu on aina tasaista. Kyseisellä menetelmällä voidaankin korvata osa ihmisen tekemistä hitsauksista.

Laseria käytetään usein teräksisten ja alumiinisten kappaleiden hitsauksessa, mutta se soveltuu periaatteessa kaikille materiaaleille, joita on mahdollista hitsata perinteisillä hitsausmenetelmillä (Rofin 2015c). Näin ollen esimerkiksi muovien hitsaaminen laserilla onnistuu hyvin. Laserhitsaukseen soveltuukin suuri ryhmä muovimateriaaleja. Näitä ovat esimerkiksi kaikki kestumuovit, lujitetut sekä lämmönkestävät muovit (Muovimuotoilu 2015a).

VTT onkin viime vuosien aikana kehittänyt yhdessä Lappeenrannan teknillisen yliopiston kanssa uuden mullistavan laserhitsaus menetelmän, joka on kehitetty juuri muovisten osien hitsaamista varten. Menetelmän sanotaan olevan nykyisiä laserhitsaus menetelmiä jopa 10 kertaa nopeampi. Lisäksi menetelmä nähdään erittäin kilpailukykyisenä muille liitosmenetelmille, joita ovat esimerkiksi liimaus sekä ultraäänihitsaus. (Jansson 2014.)

Laserhitsaus menetelmät voidaan jakaa syvätunkeumahitsaukseen sekä sulattavaan laserhitsaukseen. Lisäksi laserhitsaus voidaan suorittaa yhdistämällä se kaarihitsaukseen, jolloin puhutaan niin sanotusta hybridihitsauksesta (Kujanpää ym. 2005, 163). Seuraavassa kuvassa (KUVIO 4) on kuvattuna miten syvätunkeumahitsaus ja sulattava laserhitsaus eroavat toisistaan.



KUVIO 4. Syvätunkeumahitsaus sekä sulattava laserhitsaus. (Rofin 2015c.)

#### Syvätunkeumahitsaus

Syvätunkeumahitsaus, eli toisin tunnettuna avaimenreikähitsaus, perustuu tilanteeseen, jossa höyry etenee materiaalin sisällä kapillaarisesti. Hitsaus aloitetaan fokusoimalla säde kappaleen pinnalle, minkä jälkeen säde kuumentaa materiaalin pinnan lähelle höyrystymislämpötilaa. Tämä tapahtuma synnyttää kappaleen pintaan reiän, johon viitataan usein avaimenreikänä. Varsinainen hitsi syntyy kun lasersädettä kuljetetaan kappaleen pintaa pitkin. (Kujanpää ym. 2005, 158–159; Rofin 2015c.)

Nykyisin syvätunkeumahitsauksella saadaan jopa 25 mm:n syvyyteen ulottuva hitsisauma. Näin syvän hitsin luomiseen tarvitaan kuitenkin erittäin tehokas laser. Lisäksi näin syvä hitsi onnistuu lähinnä vain teräksillä (Rofin 2015c.)

#### Sulattava laserhitsaus

Sulattavaa laserhitsausta käytetään usein, kun käytössä olevan laserin teho ei ole tarpeeksi voimakas syvätunkeumahitsausta varten. Kyseinen menetelmä muistuttaa hyvin paljon kaarihitsausta. (Kujanpää ym. 2005, 159.) Hitsaus suoritetaan sulattamalla yhteen liitettävien kappaleiden pinnat paikallisesti. Muodostunut sula muodostaa jäähtyessään ehyen,



mutta leveään hitsisauman. Kyseisellä menetelmällä ei saada tyypillisesti yli 2 mm syviä hitsisaumoja. (Rofin 2015c.)

Muovien laserhitsaus perustuukin juuri sulattavaan laserhitsaukseen. Muoveja hitsatessa on kuitenkin tärkeää huomioida materiaalien yhteensopivuus sekä niiden optiset ominaisuudet. Esimerkiksi kirkkaiden ja läpinäkyvien muovilaatujen yhteen hitsaaminen on hankalampaa kuin luonnostaan tummien laatujen (Evonik Industries 2015). Kappaleessa 5 käsitellenkin tarkemmin kyseiseen ilmiöön vaikuttavia tekijöitä.

## 5 LASERTYÖSTÖN PARAMETRIT

### 5.1 Materiaaliparametrit

Materiaaliparametreihin kuuluvat materiaalin fysikaaliset sekä optiset ominaisuudet. Fysikaalisiin ominaisuuksiin kuuluvat esimerkiksi kappaleen paksuus, pinnanlaatu sekä materiaalin lämpöominaisuudet. Optisilla ominaisuuksilla kuvataan taas valon ja materiaalin vuorovaikutusta. Muoveja työstettäessä onkin erittäin tärkeää kiinnittää huomioita juuri optisiin ominaisuuksiin, jotta voidaan määrittellä soveltuuko materiaali ollenkaan työstettäväksi laserilla. Muilla ominaisuuksilla, kuten esimerkiksi kappaleen paksuudella, onkin taas suurempi vaikutus muita parametreja määriteltäessä.

Valo voi siis kappaleen kohdatessaan heijastua, absorboitua tai transmissioitua (Dow Corning 2012). Kappaleen sisällä valo voi lisäksi siroutua, joka on niin sanotusti materiaalin sisällä tapahtuvaa heijastumista (Järvelä & Lehtonen 2006, 9).

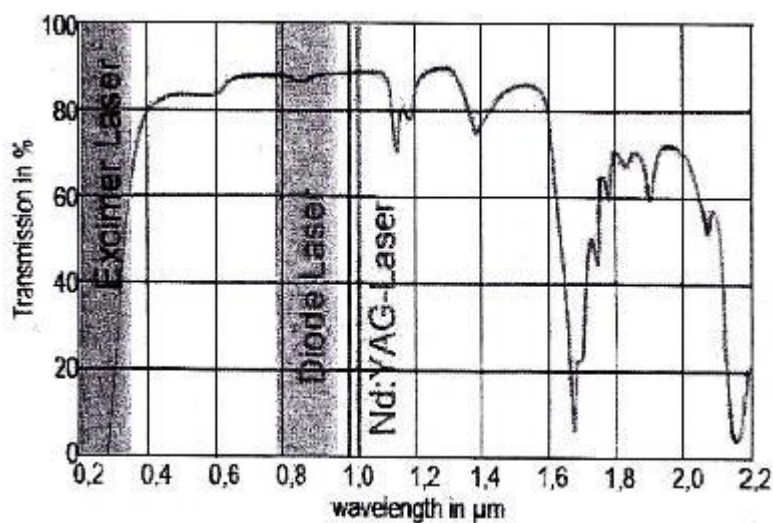
Heijastumisessa valon säde ei läpäise kappaleen pintaa, vaan se nimensä mukaisesti heijastuu takaisin ympäristöön. Kaikki materiaalit heijastavat osan valosta takaisin, mutta erittäin suurta heijastuminen on läpinäkymättömillä kappaleilla. Esimerkiksi metalleilla heijastuminen osuus voi olla jopa 90 % säteilystä. (Järvelä & Lehtonen 2006, 9.)

Transmissio kuvaa valon läpäisevyyttä materiaalissa. Transmissiossa valonsäde ei vaikuta materiaalin fysikaalisiin ominaisuuksiin (Dow Corning 2012). Transmission suuruutta kuvataan yleisesti transmissiokertoimeilla, ja se ilmoitetaan prosentuaalisena osuutena siitä, kuinka paljon valoa läpäisee kappaleen. Muoveilla transmission suuruus riippuu yleisesti kiteisyysasteesta sekä siitä, onko kyseessä kerta- vai kestopuovi. Osittain kiteisillä ja useampifaasisilla kestopuoveilla tapahtuu valon siroamista faasirajoilla, joka johtuu faasien taitekerroin eroista. (Järvelä, Lindberg & Törmälä 1992, 245–246.) Tämän vuoksi osittain kiteisillä puoveilla transmissiokerroin on pienempi kuin amorfisilla puoveilla.

Lisäksi materiaalin läpinäkyvyydellä on hyvin suuri merkitys siihen, kuinka hyvin valo läpäisee materiaalin. Täysin läpinäkymättömillä kappaleilla ei esimerkiksi tapahdu laisinkaan transmissiota (Järvelä & Lehtonen 2006, 9).

Toisin kuin transmissiossa, absorptiossa valonsäde aiheuttaa materiaalin fysikaalisten ominaisuuksien muuttumista. Absorptio onkin valossa olevan energian siirtymistä materiaaliin aiheuttaen tällöin materiaalin sulamista, lämpenemistä tai höyrystymistä (Järvelä & Lehtonen 2006, 9). Valon absorboituminen kappaleeseen onkin lasertyöstön tärkein optinen ominaisuus. Jotta materiaalia voidaan leikata, tai sen pintaan muodostaa kuviota, on materiaalin absorboitava ainakin osa säteen energiasta.

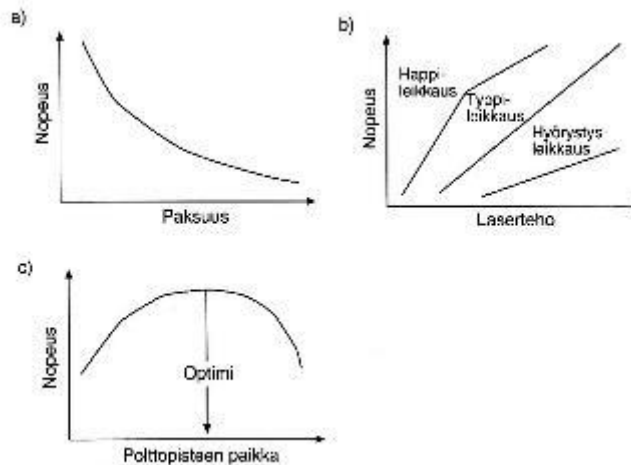
Muoveihin joudutaan kuitenkin hyvin usein lisäämään absorptiokykyä lisääviä aineita, eli niin sanottuja absorbeja (Järvelä & Lehtonen 2006, 38). Absorptio onkin riippuvainen materiaalin kyvystä reagoida tietyllä valon aallonpituudella tulevaan valoon. Muovimateriaalit eivät esimerkiksi absorboi näkyvän valon aallonpituutta ollenkaan. UV-säteilyalueen ja infrapunasäteilyn aallonpituuksia muovit absorboivat tapauskohtaisesti. Kuviossa 5 on kuitenkin esiteltynä yleisellä tasolla muovien transmissiota, eli valon läpäisevyyttä eri aallonpituuksilla.



KUVIO 5. Muovien absorptiospektri suhteutettuna eri lasertyyppien aallonpituuksiin. (Järvelä & Lehtonen 2006.)

## 5.2 Prosessiparametrit

Prosessiparametreja ovat mm. leikkausnopeus, polttopisteen paikka, suuttimen koko ja etäisyys (Kujanpää ym. 2005, 137). Kuvassa 6 (KUVIO 6) on esiteltyä tärkeimpien prosessi-, materiaali- sekä laserparametrien riippuvuuksia toisiinsa nähden.

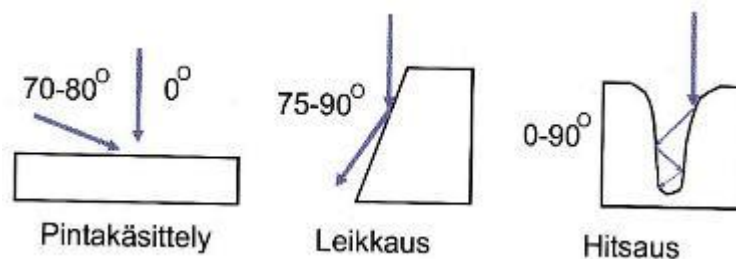


KUVIO 6. Laserleikkauksen parametrien riippuvuudet toisiinsa nähden. (Kujanpää ym. 2005)

Leikkausnopeus on yleensä vain 80–90 % maksimistaan (Kujanpää ym. 2005, 137). Kuten kuvasta 7 kuitenkin nähdään, joudutaan leikkausnopeutta usein pienentämään, mikäli leikattava kappale on erittäin paksu. Lisäksi leikkaustyyppi vaikuttaa nopeuteen. Esimerkiksi akryyliä leikattaessa joudutaan usein käyttämään pienempää leikkausnopeutta, tehon ollessa kuitenkin erittäin suuri. On kuitenkin huomattava, että esimerkiksi sulattavaan leikkaukseen perustuvassa leikkauksessa leikkausnopeuden ei tule olla liian alhainen, sillä muuten kappaleeseen muodostuu pursetta ja happileikkauksessa puolestaan palamista (Kujanpää ym. 2005, 137).

Polttopisteen paikalla on myös lasertyöstössä erittäin suuri merkitys. Polttopisteen paikka määritetään yleensä materiaaliakohtaisesti sekä kappaleen paksuuden mukaan. Esimerkiksi sulattavaan leikkaukseen perustuvassa leikkauksessa polttopisteen paikka asetetaan usein levyn alareunalle tai nopeuden kasvaessa lähemmäs levyn puolta väliä.

(Kujanpää ym. 2005, 137.) Polttopisteen paikan lisäksi on tärkeää huomioida, missä kulmassa lasersäde kohtaa kappaleen. Kyseinen kohdistuskulma riippuukin kappaleen paksuudesta sekä leikkausnopeudesta. (Kujanpää ym. 2005, 48.) Kohdistuskulmille voidaan kuitenkin määrittää rajat, jotka riippuvat kappaleen fyysisten ominaisuuksien lisäksi siitä, mitä työstöä käytetään. Eri työstömenetelmille onkin esitettyä seuraavassa kuvassa (KUVIO 7.) mahdollisia säteen kohdistuskulmia.



KUVIO 7. Lasersäteen kohdistuskulmat lasertyöstössä (Kujanpää ym. 2005, 49).

### 5.3 Laserparametrit

Laserparametreihin lukeutuvat mm. laserteho, aallonpituus, moodi, polarisaatio, säteen halkaisija, pulssin kesto ja taajuus (Kujanpää ym. 2005, 137) Näistä tärkeimpinä voidaan pitää lasertehoa ja säteen halkaisijaa sekä pulssin kestoja. Näihin ominaisuuksiin on helpointa vaikuttaa, ja lisäksi käytettävällä teholla on suora yhteys käytettävään leikkausnopeuteen.

Kuten aiemmin esitin, laserteholla ja nopeudella on suora yhteys toisiinsa. Tyypillisesti tehoa kasvatettaessa joudutaan nopeutta siis pienentämään. Jos nopeus kasvatetaan liian suureksi, ei materiaalissa välttämättä tapahdu kunnollista leikkautumista, ja tällöin voi samalla tapahtua materiaalin ylikuumentumista (Kujanpää ym. 2005, 138-139). Ylikuumentumista välttääkseen voidaan tehoa pulssittaa. Säteen pulssittaminen onkin suositeltavaa, kun työstettävän kappaleen

lämmöntuonti on kriittinen tai kappale on erittäin helposti vaurioituva (Kujanpää ym. 2005, 139.)

Polttopisteen halkaisijalla, syvyysterävyydellä ja sijainnilla on myös erittäin tärkeä osuus onnistuneen lasertyöstön kannalta. Voidaankin esittää, että polttopisteen halkaisija on suoraan verrannollinen fokusoivan linssin polttoväliin, kun taas syvyysterävyys on suoraan verrannollinen polttovälin toiseen potenssiin. Lyhyellä polttovälillä saadaankin pieni fokuspiste ja suuri tehotiheys. Polttopisteen halkaisija onkin kääntäen verrannollinen tehotiheyteen. Pientä polttopistettä käytettäessä saadaan tällöin kapea leikko, mutta tässä ongelmaksi muodostuvat polttovälin pienuus, ja tästä aiheutuvat fokusointilinssin tahraantumiset. On myös huomioitava, että pienellä polttopisteellä on pieni syvyysterävyys. Syvyysterävyyden avulla määritelläänkin polttopisteen toleranssi lasersäteen optisen akselin suunnassa. On kuitenkin huomattava, että suuritehoisille lasereille on ominaista, että ne muodostavat suuren polttopisteen. (Kujanpää ym. 2005, 140.) Näin ollen suuritehoisilla lasereilla on hankalampi muodostaa erittäin ohutta leikkaa.

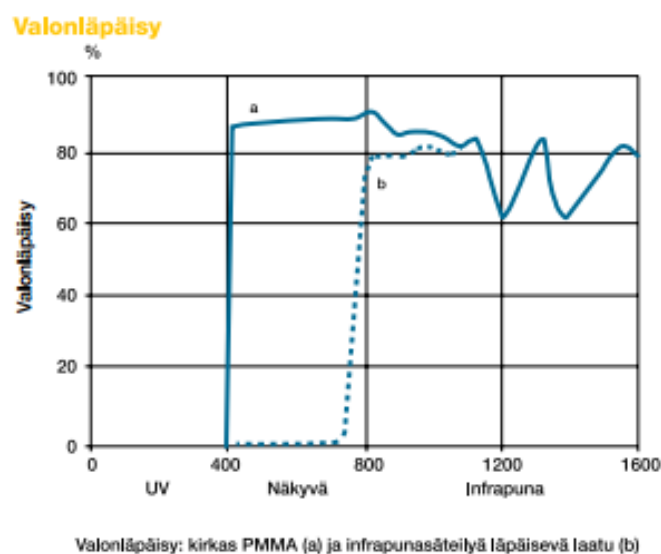
## 6 KÄYTETYT MATERIAALIT

Kaikki työssä käytetyt muovilevyt olivat lahjoituksena saatuja tai koulun varastosta löytyviä hukkapaloja. Tämän vuoksi kaikista materiaaleista ei voida esittää täydellisiä kuvauksia, vaan materiaaleja kuvaillaan yleisellä tasolla. Tämä tulee huomioida myös tuloksia tarkasteltaessa.

### 6.1 Polymetyylimetakrylaatti

Polymetyylimetakrylaatti (PMMA) on amorfinen, kova ja lasinkirkas tekninen muovi. PMMA:ta kutsutaan usein myös akryyliksi, mutta kuluttajat tunnistavat sen usein myös pleksinä tai plexiglassina. Plexiglas onkin yksi ensimmäisistä PMMA:n kauppanimistä. (Vink 2015a.)

Optiset ominaisuudet PMMA:lla ovat loistavat, ja sen UV-kesto on erittäin hyvä. Tämä johtuu siitä, että PMMA ei absorboi juuri laisinkaan UV-säteilyä. PMMA transmissioikin UV-valoa täysin 300 nm:iin asti ja infrapuna alueella infrapunasäteilyä 2800 nm:iin asti. (Valuatlas 2015a.) Seuraavassa kuvassa (KUVIO 8) onkin esiteltynä tarkemmin PMMA:n transmissiota. PMMA:n käyttö onkin hyvän UV-kestonsa vuoksi hyvin suosittua ulkokäytössä (Valuatlas 2015a). Lisäksi PMMA:ta käytetään useissa sovelluksissa lasin korvikkeena.



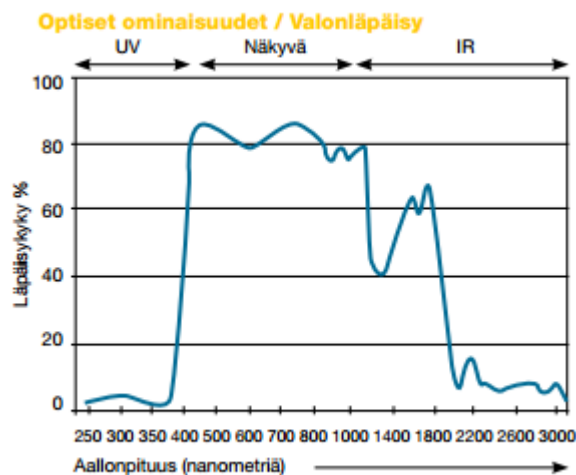
KUVIO 8. Polymetyylimetakrylaatin transmissiokäyrät. (Vink 2015a.)

Materiaalina PMMA on jäykkä, kova ja näin ollen hauras materiaali. Lisäksi se on taipuvainen jännityssäröilylle (Muovimuotoilu 2015b).

PMMA-levyjä voidaan valmistaa sekä valamalla että suulakepuristamalla. Suulakepuristettujen levyjen hinta on yleensä hieman alhaisempi valettuihin verrattuna. Käytössäni olleet ohuemmat levyt ovat valettuja, kun taas paksumpi PMMA-XT on suulakepuristettu. Percpex silk opal 040, 3 mm paksun levyn valonläpäisyn ilmoitetaan olevan lisäksi 51 %. (Vink 2015b.)

## 6.2 Polykarbonaatti

Kuten PMMA, polykarbonaatti (PC) on amorfinen, läpinäkyvä kirkas muovi. Toisin kuin PMMA:lla sen UV-kesto on kuitenkin erittäin huono, jonka vuoksi se ei sovellu kohteisiin, jossa se altistuu UV-säteilylle. (Muovimuotoilu 2015b.) PC transmissioi noin 88 % näkyvästä valosta, mutta UV-säteilyä se ei päästä ollenkaan lävitseen vaan absorboi kaiken kyseisellä aallonpituudella tulevan säteilyn (KUVIO 9). Infrapuna-alueelle mentäessä se päästää osan valosta lävitseen. (Vink 2015c.)



KUVIO 9. Polykarbonaatin transmissiokäyrä. (Vink 2015c.)

Polykarbonaatti on jäykkä, kova ja sitkeä materiaali, ja sillä on PMMA:han verrattuna huomattavasti parempi iskulujuus. Se on kuitenkin myös hyvin



herkkä jännityssäröilylle sekä naarmuuntumiselle. (Muovimuotoilu 2015b; Vink 2015c.)

### 6.3 Polyeteenitereftalaatti

Polyeteenitereftalaatti (PET) on termoplastisiin polyestereihin kuuluva lineaarinen polyalkyylitereftalaatti (Vink 2015d). Polyeteenitereftalaattia saadaan sekä amorfisena että osittain kiteisenä laatuna. Näistä kuitenkin amorfisen laadun käyttö on yleisempää. (Muovimuotoilu 2015b.) Amorfisia laatuja käytetäänkin paljon juomapulloissa sekä piirtoheitinkalvoissa. Kiteisiä laatuja käytetään taas paljon kohteissa, jotka vaativat kuormituskestävyyttä sekä pientä kitkaa eli esimerkiksi hammaspyörissä (Vink 2015d).

Amorfiset PET-A tai PET-G ovat lasinkirkkaita, iskunkestäviä hyvän pinnanlaadun omaavia muoveja. Osittain kiteinen PET-C tai PETP on puolestaan väriltään valkoinen, ja sen parhaimpiin ominaisuuksiin kuuluu sen erittäin korkea lämpötilan kesto sekä suuri jäykkyys. PET-C kestääkin jopa + 224 °C, kun taas amorfiset laadut kestävät tyypillisesti vain + 65 °C lämpötiloja. Amorfisilla laaduilla valonläpäisevyys vastaa huomattavan paljon akryylia, joka on noin 90 %. (Muovimuotoilu 2015b; Vink 2015d.) Osakiteisillä laaduilla valonläpäisevyys on luonnollisesti pienempää.

### 6.4 Polyeteeni

Polyeteeni (PE) kuuluu polypropeenin kanssa polyolefiineihin. Olefiinit ovat lineaarisia tai haaroittuneita hiilivetyjä, joissa on vähintään yksi kaksoissidos (Tammela 1990, 17). Polyeteeni on osittain kiteinen, vettä kevyempi muovi, joka on pinnaltaan vahamainen ja liukas. Sillä on rajoitettu lämmönkesto, mutta kemiallisesti se on hyvin kestävä. (Muovimuotoilu 2015c.)

Polyeteenin mekaaniset ja termiset ominaisuudet riippuvat hyvin vahvasti mm. tiheydestä, moolimassasta ja – jakaumasta, kiteytymisasteesta ja valmistustavasta (Tammela 1990, 19 & 27; Valuatlas 2015b). Polyeteenit

voidaankin jaotella yleisesti tiheydensä ja muiden ominaisuuksien perusteella seuraaviin luokkiin:

- pientiheyspolyeteeni (LDPE)
- keskitiheyspolyeteeni (MDPE)
- suurtiheyspolyeteeni (HDPE)
- lineaarinen pientiheyspolyeteeni (LLDPE)
- hyvin pienen tiheydenpolyeteeni (VLDPE)
- silloittuva polyeteeni (PEX)
- suurtiheys silloittuva polyeteeni (HDXLPE)
- korkean molekyylipainonpolyeteeni (HMWPE)
- erittäin korkean molekyylipainonpolyeteeni (UHMWPE)

(Valuatlas 2015b.)

PE500 (PE-HMW) on elintarviketeollisuudessa paljon käytetty polyeteeni laatu, joka on lujempi, kulutuksen kestävämpi, mittatarkempi sekä paremmin työstettävissä kuin PE300 (PE-HD) (Vink 2015 e).

## 6.5 Polypropeeni

Kuten polyeteeni, polypropeeni (PP) on vettä kevyempi muovi. Se vastaa ominaisuuksiltaan hyvin paljon PE-HD:ta, mutta sen lämmönkesto on polyeteeniä hieman korkeampi, eikä ole pinnaltaan niin liukas (Valuatlas 2015c; Järvinen 2008, 40). PP pehmenee jo kuitenkin 55 - 68 °C:ssa, mikä tulee materiaalia työstettäessä ottaa huomioon (Muovimuotoilu 2015c). Lisäksi PP on jäykkä materiaali, jolla on hyvä kulumisenkestävyys ja kemiallinen kesto (Valuatlas 2015c).

Polypropeenista on saatavilla eri laatuja, joita ovat niin sanotut homopolymeerit, blokkipolymeerit sekä satunnais- eli randomkopolymeerit. Homopolymeeri on käytetyin muoto, ja se koostuu yhdestä monomeerista. (Järvinen 2008, 41.) PP:n homopolymeeri eli PP-H ei läpäise ollenkaan näkyvää valoa suuren kiteisyysasteensa vuoksi, mutta PP-random laadut

ovat puolestaan läpinäkyviä ja kirkkaita laatuja, jotka päästävät osan valosta lävitseen (Vink 2015e; Järvinen 2008, 41).

## 6.6 Polyasetaaali

Polyasetaaali (POM) on erittäin kiteinen kestmuovi (kiteisyysaste jopa 75–85%), jonka perusmonomeerina on formaldehydi. Se luokitellaan teknisiin muoveihin kuuluvaksi, ja se on valkoinen, sitkeä ja jäykkä muovi, jolla on kohtuullinen kemiallinen kestävyys (Valuatlas 2015d).

Polyasetaaalia saadaan sekä homopolymeerinä (POM-H) että kopolymeerinä (POM-C). Laatuojen erot ovat hyvin pieniä, mutta POM-H on laaduista kiteisempi ja näin ollen se on kovempi ja jäykempi. (Vink 2015f.) Laserilla POM:ia työstettäessä tulee huomioida materiaalin syttyvyys. POM onkin helposti syttyvä materiaali, ja se palaa lähes näkymättömällä liekillä (Vink 2015f). Palaessaan materiaalilla on erittäin pistävä haju, joka johtuu sen sisältämästä formaldehydistä.

## 6.7 Polyvinyylidikloridi

Polyvinyylidikloridi eli PVC on vanhin kestmuovi, jonka käyttö on polyeteenin jälkeen edelleen suurinta (Järvinen 2008, 48). Se valmistus perustuu eteenin ja kloorin polymeroimiseen, ja siitä on saatavilla useita eri laatuja (Vink 2015g). Polyvinyylidikloridi laatuja ovatkin esimerkiksi kova PVC (PVC-U), pehmitetty PVC (PVC-P) ja kloorattu PVC (PVC-C) (Muovimuotoilu 2015c).

PVC:n ominaisuudet riippuvat vahvasti käytetystä laadusta. PVC on luonnostaan kirkas materiaali, mutta usein siihen lisättyjen lisäaineiden vuoksi se on väriltään sinertävä (Vink 2015g). PVC:lle onkin tyypillistä, että se tarvitsee aina lisäaineistusta, jotta sitä voitaisiin työstää. Tyypillisimpiä lisäaineita ovat erilaiset stabilisaattorit ja pehmittimet. (Järvinen 2008, 48–49.) Sinertävästä väristä huolimatta PVC:n valonläpäisykyky on noin 90 %. PVC on lisäksi erittäin jäykkä materiaali, jolla on rajoitettu lämmönkesto

(Vink 2015g). Jo 100 °C:ssa materiaali alkaa hajoamaan termisesti, muodostaen vaarallista kloorivetyhappoa (HCl).

## 7 TESTAUS

### 7.1 Laitteisto

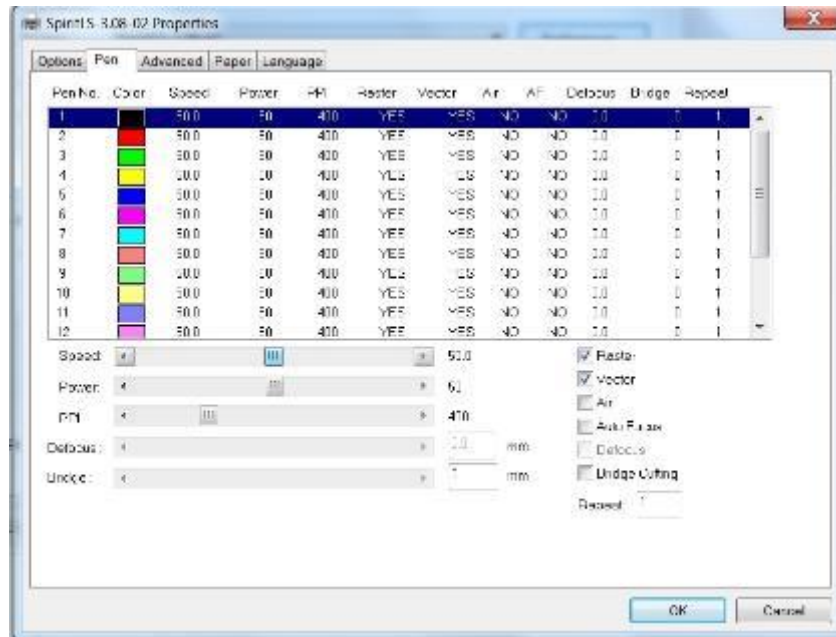
Työ suoritettiin käyttämällä Lahden ammattikorkeakoulun puulaboratoriossa sijaitsevaa GCC:n Spirit LS CO<sub>2</sub>-laseria. Taulukossa 1 on esiteltynä kyseisen laitteen tärkeimmät ominaisuudet. Työn tarkoituksena oli määrittää sopivat työstöparametrit eri muovilaaduille, sillä näitä ei ole vielä määritelty.

TAULUKKO 1. *Spirit LS tärkeimmät ominaisuudet. (Spirit LS Usermanual.)*

Product	Laser Engraver
Model	Spirit LS
Model Number	SLS - 40C
Wavelength	10,57 ~ 10,63 μm
Power	CO2 40W
Input	100 ~ 240V, 50 ~ 60Hz, Max 12A
Cooling	Air Cool
Work area	640 x 460 mm
Max part. Size (doors closed)	800 x 570 x 165mm

CorelDRAW oli työssä käytetty ohjelmisto, jolla laseria ohjailtiin. CorelDRAW – ohjelmiston avulla määritetään haluttu kuvio tai kuva joka kappaleeseen halutaan merkitä. Merkittävä kuvio voidaan piirtää ohjelman avulla valmiiksi, tai siihen voidaan liittää valmis kuva. Ohjelmisto toimii tavallisella tietokoneella, minkä vuoksi sen käyttö on erittäin helppoa ja kätevää. CorelDRAW:lla voidaan varsin kätevästi muodostaa eri kuvioita, mutta tekstin merkkaukseen se soveltuu erityisen hyvin. CorelDRAW:ssa on valmiina useita eri fontteja valittavana ja tekstiä voidaan tämän lisäksi muokata vielä erityylyiseksi.

CorelDRAW:ssa käytössä on valittavana useita niin sanottuja kyniä, joiden avulla merkkaukset tai leikkaus tehdään (KUVIO 10). Kyseisessä koneessa on kuitenkin toiminnassa vain musta ja turkoosi. Laser suorittaa ensimmäisenä mustalla värillä piirretyn kuvion, minkä vuoksi merkkaukset kannattaa tehdä mustalla ja leikkaus puolestaan turkoosilla värillä.



KUVIO 10. CoreIDRAW kynien värit ja parametrien säätö.

## 7.2 Parametrien suunnittelu

Lasermerkklauslaitteella tärkeimmät säädettävät parametrit ovat nopeus ja teho, mutta myös DPI:tä (dots-per-inch) ja PPI:tä (pulses-per-inch) muuttamalla pystytään vaikuttamaan lopputulokseen. DPI kuvaa resoluutiota, eli pikseleiden tai pisteiden määrää, tuuman säteellä, ja PPI kertoo, kuinka useasti laser pulssittaa sädettä yhden tuuman matkalla. PPI toimii, kun kyseessä on lineaarinen linja. Mitä suurempi PPI on, sen syvemälle materiaaliin laserin säde tunkeutuu yhden pulssin aikana saaden näin aikaan siistimmän leikkausjäljen. (Spirit LS Usermanual.)

Nopeus ja teho ilmoitetaan prosentteina 0-100 %. Nopeuden ja tehon suhdetta muuttamalla saadaankin näkyvin ero lopputuloksessa. Työssäni keskityinkin lähinnä näiden parametrien välisen suhteiden määrittämiseen. Koska kyseiset parametrit ovat kuitenkin 1 % välein säädettävissä, tuli testattavien parametrien suhteiden määrää rajata. Työ olisi voitu toteuttaa usealla eri tavalla, esimerkiksi testaamalla jokaisen 10 %:n väliset suhteet, tai niin, että joko teho tai nopeus olisi aina vakio. Päädyin kuitenkin testaamaan kolmella eri vakioteholla säädellen aina nopeutta.

Seuraavassa taulukossa (TAULUKKO 2) onkin esimerkki siitä miten parametreja testasin.

TAULUKKO 2. PMMA:n testiajosuunnitelma.

Teho (P)	Nopeus (S)
100	100
100	90
100	80
100	70
100	60
100	50
80	100
80	90
80	80
80	70
80	60
80	50
50	100
50	90
50	80
50	70
50	60
50	50

### 7.3 Testikuvat

Valitsin kokeiltavaksi useita eri testikuvia, jolloin pystyin varmistumaan, mitkä olisivat ne täydelliset parametrit eri materiaaleille. Tätä varten käytin CoreIDRAW-ohjelmistosta löytyviä valmiita kuvioita, jotka löytyvät kohdasta Artistic Media Tool sekä oikeata valokuvaa (KUVIO 11).



KUVIO 11. Lasermerkkauksessa käytetyt testikuviot.

## 8 TULOKSET

Seuraavassa on esiteltyä saamiani tuloksia. Taulukkoon 3 ja 4 on listattuna työstöarvojen suositukset eri materiaaleille, ja liitteenä (LIITE 1-7) on kappaleista tarkemmat kuvat. Tuloksia tarkasteltaessa tulee kuitenkin huomioida se, että kyseiset arvot ovat vain suosituksia ja perustuvat omiin näkemyksiini. Tuloksien analysoimiseen vaikuttaa myös se, että kaikista materiaaleista ei ole ollut saatavilla tarkempaa tietoa, minkä vuoksi analyysit ovat vain pintapuolisia.

**TAULUKKO 3. Lasermerkkauksen suositellut parametrit eri muovimateriaaleille.**

Materiaali	Paksuus (mm)	Teho (P) (%)	Nopeus (S) (%)	Väri	Erytishuomiot
PMMA	3	100 / 80	100 / 80	Valkoinen	Soveltu valokuvan merkkaukseen.
PMMA (O)	3	100 / 80 / 50	100 / 90 / 80 / 70	Valkoinen	Ei sovellu valokuvan merkkaukseen.
PMMA-XT	5	100 / 80	100 / 80 / 50	valkoinen	Ei sovellu valokuvan merkkaukseen.
PC	3	100 / 80 / 50	70 / 60	Ruskea/Kultainen	Kuviointi peilikuvana, käännä kappale.
PC	5	100 / 80	50	Ruskea/Kultainen	Kuviointi peilikuvana, käännä kappale.
PET	1	20	10	Kellertävä	-
PET	0,08	20	100 / 80 / 60	Valkoinen	Teippaa kalvo kiinni.
PP-C	2	100 / 80	50	-	-
PP	3	100	50	-	-
PE-HMW	8	80	30 / 20	-	-
PE	20	100 / 80	50 / 40 / 20 / 10	-	S 50 ja 40 kuviointiin, S 20 ja 10 kirjoitukseen.
PVC	6	30	60	Ruskea	Kirjoitus onnistuu muillakin arvoilla.
POM-C	1,5	100	100 / 80	-	-

**TAULUKKO 4. Laserleikkauksen suositellut parametrit eri muovimateriaaleille.**

Materiaali	Paksuus (mm)	Teho (P) (%)	Nopeus (S) (%)	Erytishuomiot
PMMA	3	100	2	Saattaa esiintyä pientä valkoista jälkeä.
PMMA (O)	3	100	2	-
PMMA-XT	5	100	1	-
PC	3	100	1	Ruskea jälki.
PC	5	-	-	Ruskea jälki.
PET	1	80	50	Kellertävä jälki.
PET	0,08	30	100	Teippaa kalvo kiinni pöytään.
PP-C	2	-	-	-
PP	3	-	-	-
PE-HMW	8	-	-	-
PE	20	-	-	-
PVC	6	-	-	Ei saa leikata, vaarallisen HCl muodostuminen.
POM-C	1,5	100	2	Leikkauksen yhteydessä esiintyy liekki.



## Polymetyylimetakrylaatti

Polymetyylimetakrylaatti on yksi parhaiten lasertyöstöön soveltuvista materiaaleista. Merkkauanjälki on erittäin siisti, hyvin luettavissa ja väritykseltään valkoinen. Leikkausjälki on moitteeton, mutta leikkautuminen vaatii erittäin hitaan nopeuden. Materiaaliin pystytään merkitsemään hyvin monimutkaisiakin kuvioita, ja kirkkaaseen levyyn pystytään merkitsemään esimerkiksi oikeita valokuvia. Ristisilloitetun PMMA:n yhteydessä soveltuvien kuvioiden määrä on kuitenkin rajallisempi. Tämä johtuu materiaalin värityksestä ja materiaalin orientoitumisesta.

Merkkauuskuvioita suunniteltaessa on myös hyvä huomioida, että valokuva on paremmin luettavissa, kun kappale on käännettynä sileä puoli ylöspäin (KUVIO 12). Valokuva olisi näin ollen hyvä asettaa peilikuvana ohjelmistoon. Merkkauanjälki on oikealta puolelta erittäin rakeinen ja hieman suttuinen.



KUVIO 12. Valokuva PMMA-levyssä. Oikealla puolella kuvaa levy oikein päin, vasemmalla puolella levy on kuvattuna toiselta puolelta.

## Polykarbonaatti

Polykarbonaatti soveltuu lasertyöstöön loistavasti. Materiaali on helposti merkattavissa, ja merkkajälki onkin hyvin erottuva ja väritykseltään ruskea tai kullanruskea. Materiaalia pystytään leikkaamaan helposti, kun käytetään suurta tehoa ja hidasta nopeutta, mutta leikkausjälki ei ole siisti (KUVIO 13). Tämä johtuu materiaalin hiiltymisestä. Materiaaliin pystytään merkitsemään monimutkaisiakin kuvioita, ja kuten PMMA:lla, myös valokuvan merkitseminen onnistuu helposti.



KUVIO 13. Laserleikattu polykarbonaatti kappale.

Polykarbonaatilla merkkaukuvien suunniteluun kannattaa kiinnittää erityisesti huomiota. Toisin kuin PMMA:lla, PC:llä merkkajälki on paremmin luettavissa kaikilla kuvioilla, kun kappale käännetään sileä puoli ylöspäin. Näin ollen kaikki kuviot olisi hyvä tehdä peilikuvana.

## Polyeteenitereftalaatti

Polyeteenitereftalaatti soveltuu lasertyöstöön kohtalaisesti. Materiaalia on haastava merkata, ja se soveltuukin parhaiten yksinkertaisten kuvioden merkkaukseen. Työstöarvot ovat suhteellisen pieniä, sillä ohut kalvo ei kestä suuria tehoja. Liian pienillä arvoilla ei kuviointia kuitenkaan näy, tai se jää vajaaksi. Muita huomioitavia asioita PET:in työstämisessä ovat ohuen kalvon vaatimat erikoisjärjestelyt. Ohutta kalvoa työstettäessä tulee sen alle asettaa paksumpi levy, sillä työstöpöydän korkeus ei riitä tarvittavan työstöetäisyyden aikaansaamiseksi. Tähän tarkoitukseen

kannattaa käyttää esimerkiksi puista levyä. Kalvo olisi lisäksi hyvä teipata kiinni, sillä se käpristyy työstön aikana.

Levyssä merkkajälki on kellertävä, kun taas kalvossa jälki on valkoinen. Leikkaus onnistuu hyvin, mutta levyä leikatessa tulee huomioida, että kappaleen reuna jää kellertäväksi

### Polypropeeni

Polypropeeni soveltuu lasertyöstöön erikoistapauksissa. Merkkajälki on kohtuullisen syvä, erottuva, ja väritykseltään se vastaa levyn väriä, mutta jälki on usein epäsiisti. Materiaali on erittäin herkkä lämmölle, minkä vuoksi kuvioinnin ympärillä esiintyy usein pursetta (KUVIO 14). Näin ollen materiaaliin pystytäänkin merkitsemään vain yksinkertaisia kuvioita. Ohuen PP-levyn leikkaaminen onnistuu suurilla tehoilla ja erittäin hitailla nopeuksilla, mutta leikkausjälki ei ole siisti, sillä reunat jäävät koholle.



KUVIO 14. Polypropeenikappaleissa esiintyvää pursetta kuvioinnissa ja reunoilla.

### Polyeteeni

Kuten PP, polyeteeni soveltuu lasertyöstöön vain erikoistapauksissa. Sen käytettävyys on kuitenkin polypropeeniakin pienempi, sillä siihen on erittäin hankala saada siistiä ja luettavaa jälkeä, eikä sitä voida leikata. Merkkajälkien tulisi olla mahdollisimman yksinkertaiset.

Polyeteeni ei muuta väritystään laserin vaikutuksesta ja merkkausjäljen syvyys riippuu hyvin vahvasti käytetyistä tehoista ja nopeuksista. Yleisesti ottaen jälki on kohomaista ja vaaleaa. Merkkausjäljen aikaansaamiseksi joudutaan käyttämään suuria tehoja ja kohtuulisen hitaita nopeuksia. Muihin materiaaleihin verrattuna käytetyt tehon ja nopeuden suhteet ovatkin huomattavasti suuremmat.

#### Polyasetaaali

Polyasetaaali soveltuu lasertyöstöön hyvin. Merkkausjälki on siisti ja syvä, mutta erottuvuus taustasta on heikko. Tämä johtuu siitä, että materiaali ei muuta väriään laserin vaikutuksesta, vaan laser vain poistaa materiaalia levyn pinnalta. Leikkausjälki on erittäin siisti. Leikkauksen yhteydessä on kuitenkin huolehdittava riittävästä tuuletuksesta, sillä materiaali käyryää vahvasti leikkauksen yhteydessä. POM ei soveltune valokuvien merkkaamiseen merkkausjälkensä vuoksi.

#### Polyvinyylikloridi

Polyvinyylikloridi soveltuu lasertyöstöön kohtalaisesti. Lasermerkkaus onnistuu hyvin, mutta leikkausta ei kyseiselle materiaalille saa suorittaa. Leikkauksen yhteydessä lämmöt nousevat nimittäin sen verran korkeiksi, että materiaali alkaisi termisesti hajoamaan muodostaen vaarallista kloorivetyhappoa. Merkkausjälki on hyvin erottuva ja väritykseltään rusehtava. Jälki on kohtalaisen syvää jo pienillä tehoilla. PVC:tä työstettäessä on huolehdittava erittäin tehokkaasta tuuletuksesta.

#### Johtopäätökset

Lasertyöstö soveltuu hyvin laajalle kirjolle eri muovimateriaaleja. Lasermerkkaus ja -leikkaus soveltuvatkin useimmille valtamuoveille ja osalle teknisistä muoveista, mutta materiaalit käyttäytyvät työstön aikana eri tavoin. Muovien rakenteet ja lähtöaineet eroavat toisistaan hyvin paljon, mikä vaikuttaa suoraan niiden lämmönkeston sekä säteilevän valon absorptiokykyyn. Kyseiset seikat ovatkin lasertyöstön onnistumisen kannalta kriittiset tekijät. Materiaalin tuleekin absorboida edes osa

säteilevästä valosäteestä, jotta lasertyöstö onnistuisi. Lisäksi mitä enemmän materiaali absorboi itseensä valoa, sitä enemmän materiaalin fysikaaliset ominaisuudet muuttuvat. Tämä näkyy esimerkiksi polykarbonaatilla. PC absorboi jopa 60 % CO<sub>2</sub>-laserin lähettämästä valosta (KUVIO 9). Suuri absorptio muuttaa polykarbonaatin fysikaalisia ominaisuuksia, mikä näkyy materiaalin hiiltymisenä. Polyeteeni puolestaan ei absorboi juuri ollenkaan kyseistä valon aallonpituutta itseensä, minkä vuoksi merkkäminen on haastavampaa. PE:n rajoittunut lämmönkesto tekee lisäksi merkkämisestä haastavaa. Suuria tehoja käytettäessä polyeteeni nimittäin sulaa eikä merkkäustuloksesta tule siisti.

Lasertyöstössä voidaan kuitenkin huomioida muutama tekijä, jotka pätevät yleisesti kaikille materiaaleille. Esimerkiksi siisti ja syvä jälki saadaan käyttämällä suuria tehoja ja kohtalaisia nopeuksia. Huomattavaa oli myös, että pienillä nopeuden muutoksilla ei ole juurikaan vaikutusta materiaalin käyttäytymisessä tehon pysyessä vakiona. Vain suurilla nopeuden muutoksilla on merkitystä merkkäustuloksessa. Suuret nopeudet aiheuttivat yleisesti vajautta kuvioinnissa. Lisäksi kaikilla materiaaleilla merkkäusjäljen luettavuuteen vaikuttaa hyvin vahvasti se, missä valaistuksessa ja kulmassa kappaleita tarkastellaan. Varsinkin materiaaleilla, joilla merkkäustulos on yleisesti heikompa, kyseinen ilmiö korostui. Useimpien kappaleiden merkkäuksen luettavuus olikin parempaa, kun niitä ei tarkastella suoraan edestäpäin, vaan kappaleiden ollessa pienessä kenossa. PC:llä ja PMMA:lla oli lisäksi huomattavaa, että merkkäusjälki on paremmin luettavissa, kun kappale on ylösalaisin, sileä pinta ylöspäin.

Tuloksien perusteella voidaankin todeta, että parhaimmat materiaalit lasertyöstöön ovat PMMA, PC ja PVC. PET ja POM soveltuvat myös hyvin lasertyöstöön, mutta PE ja PP soveltuvat vain erikoistapauksissa. Polyeteeniin ja polypropeeniin tulisikin mielellään lisätä absorbeja, jotka lisäävät niiden kykyä absorboida kyseistä valon aallonpituutta. Myös POM:iin tulisikin mielellään lisätä värillisiä pigmenttejä, jotka reagoisivat lasersäteen kanssa, muodostaen erottuvamman merkkäusjäljen.

## 9 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli tutustua eri lasertyöstömenetelmiin ja etsiä CO<sub>2</sub>-laserille sopivat työstöarvot leikkausta ja merkkausta varten, muovimateriaaleja työstettäessä. Lasertyöstö on menetelmänä nopea ja edullinen, mutta se soveltuu vain tietyille materiaaleille luonnostaan.

Lasertyöstössä tapahtuu transmissiota, absorptiota sekä heijastumista. Näistä kuitenkin vain materiaalin kyvyllä absorboida laserin lähettämää valon aallonpituutta on oleellisesti merkitystä onnistuneen lasertyöstön kannalta. Useimmat muovimateriaalit absorboivat CO<sub>2</sub>-laserin lähettämää valon aallonpituutta heikosti. Heikon absorptio kyvyn lisäksi materiaalien muut ominaisuudet, kuten lämmönkesto, vaikuttavat huomattavasti lopputulokseen.

Yksi merkittävä havainto materiaalien soveltuvuudesta lasertyöstöön oli, että hyvin harvat materiaaleista soveltuivat sekä laserleikkaukseen että leikkaukseen. Useimmat testeissä käyttämistäni materiaaleista eivät soveltuneet leikattavaksi. Tämä johtui joko materiaalin huonosta lämmönkestosta, esimerkkinä polyeteeni, tai huonosta leikkauksen laadusta (PC). Merkkkaus taas soveltui useammalle materiaalille, ja merkkauks jälkeä voisikin parantaa käyttämällä erikoismateriaaleja. Tutkittavista materiaaleista vain PMMA olikin ainoa, joka soveltui täydellisesti sekä leikkaukseen että merkkaukseen. Muilla materiaaleilla tämä oli hyvin tapauskohtaista. Voidaan kuitenkin esittää, että materiaaleista PMMA, PC, PVC ja PET soveltuvat parhaiten merkkaukseen, kun leikkaukseen soveltuvia materiaaleja ovat puolestaan PMMA, PET ja POM.

Koen työn onnistuneeksi erinäisistä ongelmista huolimatta. Suurimmaksi ongelmaksi muodostui tutkittavien materiaalien vähyys. Olisi ollut mielekkäämpää ja tulosten kannalta parempi, jos tutkittavia materiaaleja olisi ollut helpommin saatavilla. Lisäksi juuri erikoismateriaalien tutkiminen työssäni olisi ollut mielenkiintoista, jotta ero tavallisen ja lasertyöstöön soveltuvan polyeteenin välillä olisi tullut selkeästi esille. Tutkimusteni

perusteella tulevat laserilaitteiston käyttäjät voivat kuitenkin paremmin tutustua laitteeseen, sillä sopivien parametrien löytäminen ei tällöin ole niin hakuammuntaa.

## LÄHTEET

### **Painetut lähteet:**

Järvelä, P. & Lehtonen, J. Muovien lasertyöstö ja siinä käytettävät materiaalit. Raportti / Tampereen teknillinen yliopisto, Muovi- ja elastomeeritekniikka 08/06, s. 9 & 38–39. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto

Järvelä, P., Lindberg, J.J, Törmälä, P. 1992. Polymeeritiede ja muovitekniologia. Osa II. 5. painos. Helsinki: Otatieto Oy.

Järvinen, P. 2008, Uusi muovitieto. Muovifakta Oy.

Kujanpää, V., Salminen, A., Vihinen, J. 2005. Lasertyöstö. Helsinki: Teknologiainfo Teknova.

Peltonen, H., Perkiö, J., Vierinen, K. 2012. Insinöörin (AMK) Fysiikka osa II. 8. painos. Lahti: Lahden Teho-Opetus Oy.

Tammela, V. 1990, Polymeeritiede ja muovitekniologia: Osa III. Espoo: Otatieto.

### **Elektroniset lähteet:**

Dow corning 2012, Optical properties, Defenitions and Measurements [viitattu 25.3.2015] Saatavissa:

<https://www.dowcorning.com/content/publishedlit/11-2092.pdf>

Evonic Industries 2015, Polymers & Lasers; laser application center [viitattu 29.3.2015] Saatavissa:

<http://www.vestamid.com/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Product/VESTA MID/en/brochures/Polymer%20and%20Laser.pdf>

Jansson, A. 2014, VTT nopeutti ja tehosti muovien laserhitsausta, VTT [viitattu 16.3.2015] Saatavissa:

<http://www2.vtt.fi/uutta/2006/20051222.jsp>



Korn, D. 2012. Laser Marking Basics. Modern Machine Shop 3/2012, 28 & 30. [viitattu 14.3.2015] Saatavissa:

<http://search.proquest.com.aineistot.lamk.fi/docview/928449245/fulltextPDF/468F427FA2EA4EDEPQ/1?accountid=16407>

Muovimuotoilu 2015a, Muut hitsausmenetelmät [viitattu 16.3.2015]

Saatavissa: <http://www.muovimuotoilu.fi/content/view/134/120/>

Muovimuotoilu 2015b, Tekniset muovit [viitattu 29.3.2015] Saatavissa:

<http://www.muovimuotoilu.fi/content/view/33/62/>

Muovimuotoilu 2015c, Valtamuovit [viitattu 9.6.2015] Saatavissa:

<http://www.muovimuotoilu.fi/content/view/32/63/>

Rofin 2015a, Cutting Processes [viitattu 15.3.2015] Saatavissa:

[http://www.rofin.com/en/applications/laser\\_cutting/cutting\\_processes/](http://www.rofin.com/en/applications/laser_cutting/cutting_processes/)

Rofin 2015b, Laser Marking Methods [viitattu 15.3.2015] Saatavissa:

[http://www.rofin.com/en/applications/laser\\_marking/laser\\_marking\\_methods/](http://www.rofin.com/en/applications/laser_marking/laser_marking_methods/)

Rofin 2015c, Welding Methods [viitattu 16.3.2015] Saatavissa:

[http://www.rofin.com/en/applications/laser\\_welding/welding\\_methods/](http://www.rofin.com/en/applications/laser_welding/welding_methods/)

Valuatlas 2015a, Polymetyylimetakrylaatti (PMMA) [viitattu 29.3.2015]

Saatavissa: [http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics\\_PMMA\\_FI.pdf](http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PMMA_FI.pdf)

Valuatlas 2015b, Polyeteeni (PE) [viitattu 26.4.2015] Saatavissa:

[http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics\\_PE\\_FI.pdf](http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PE_FI.pdf)

Valuatlas 2015c, Polypropeeni (PP) [viitattu 26.4.2015] Saatavissa:

[http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics\\_PP\\_FI.pdf](http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PP_FI.pdf)

Valuatlas 2015d, Polyasetaali (POM) [viitattu 26.4.2015] Saatavissa:

[http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics\\_POM\\_FI.pdf](http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_POM_FI.pdf)

Vink 2015a, PMMA Tekniset tiedot [viitattu 29.3.2015] Saatavissa:

[http://www.tuotteet.vink.fi/media/tuotteet/pmma/vink\\_pmma\\_esite\\_a4\\_web.pdf](http://www.tuotteet.vink.fi/media/tuotteet/pmma/vink_pmma_esite_a4_web.pdf)

Vink 2015b, PMMA Akryylit [viitattu 21.10.2015] Saatavissa:

<http://www.tuotteet.vink.fi/media/tuoteluettelon-sivut/pmma-tuotesivut.pdf>

Vink 2015c, PC Tekniset tiedot [viitattu 29.3.2015] Saatavissa:

[http://www.tuotteet.vink.fi/media/tuotteet/pc/vink\\_pc\\_esite\\_a4\\_web.pdf](http://www.tuotteet.vink.fi/media/tuotteet/pc/vink_pc_esite_a4_web.pdf)

Vink 2015d, PET Tekniset tiedot [viitattu 29.3.2015] Saatavissa:

[http://www.tuotteet.vink.fi/media/tuotteet/petp/vink\\_petp\\_esite\\_a4\\_web.pdf](http://www.tuotteet.vink.fi/media/tuotteet/petp/vink_petp_esite_a4_web.pdf)

Vink 2015e, PE [viitattu 21.10.2015] Saatavissa:

<http://www.tuotteet.vink.fi/tuotteet/pe.html#materiaali=PE>

Vink 2015f, PP Tekniset tiedot [viitattu 26.4.2015] Saatavissa:

[http://www.tuotteet.vink.fi/media/tuotteet/pp/vink\\_pp\\_esite\\_a4\\_web.pdf](http://www.tuotteet.vink.fi/media/tuotteet/pp/vink_pp_esite_a4_web.pdf)

Vink 2015g, POM Tekniset tiedot [viitattu 26.4.2015] Saatavissa:

[http://www.tuotteet.vink.fi/media/tuotteet/pom/vink\\_pom\\_esite\\_a4\\_web-2.pdf](http://www.tuotteet.vink.fi/media/tuotteet/pom/vink_pom_esite_a4_web-2.pdf)

Vink 2015h, PVC Tekniset tiedot [viitattu 9.6.2015] Saatavissa:

[http://www.tuotteet.vink.fi/media/tuotteet/pvc/vink\\_pvc\\_esite\\_a4\\_web.pdf](http://www.tuotteet.vink.fi/media/tuotteet/pvc/vink_pvc_esite_a4_web.pdf)

### **Julkaisemattomat lähteet**

Sprit LS Usermanual 2015

## LIITTEET

LIITE 1. Polymetyylimetakrylaatin (PMMA) testitulokset

LIITE 2. Polykarbonaatin (PC) testitulokset

LIITE 3. Polyeteeniterftalaatin (PTFE) testitulokset

LIITE 4. Polyeteenin (PE) testitulokset

LIITE 5. Polypropeenin (PP) testitulokset

LIITE 6. Polyasetalin (POM) testitulokset

LIITE 7. Polyvinyylikloridin (PVC) testitulokset

LIITE 1. Polymetyylimetakrylaatin (PMMA) testitulokset.



PMMA 3 mm: P100S100 (kpl 1), P100S80 (kpl 3), P100S50 (kpl 4).



PMMA 3 mm: P80S100 (kpl 2), P80S80 (kpl 5), P80S50 (kpl 6).



PMMA 3 mm: P50S100 (kpl 7), P50S80 (kpl 8), P50S50 (kpl 9).



PMMA 3 mm (opaali): P100S100 (kpl 1), P100S90 (kpl 2), P100S80 (kpl 3).



PMMA 3 mm (opaali): P100S70 (kpl 4), P100S60 (kpl 5), P100S50 (kpl 6).



PMMA 3 mm (opaali): P80S100 (kpl 7), P80S90 (kpl 8), P80S80 (kpl 9).



PMMA 3 mm (opaali): P80S70 (kpl 10), P80S60 (kpl 11), P80S50 (kpl 12).

LIITE 1. (Osa 2.)



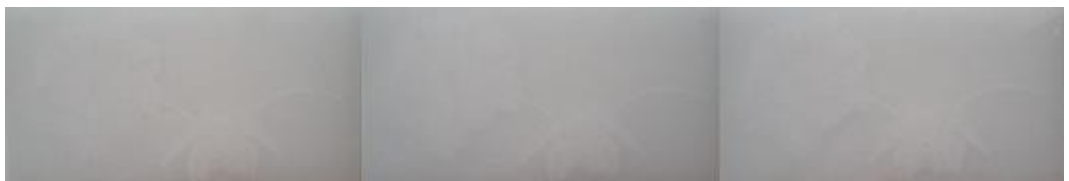
PMMA 3 mm (opaali): P50S100 (kpl 13), P50S90 (kpl 14), P50S80 (kpl 15).



PMMA 3 mm (opaali): P50S70 (kpl 16), P50S60 (kpl 17), P50S50 (kpl 18).



PMMA-XT 5 mm: P100S100 (kpl 1), P100S80 (kpl 2), P100S50 (kpl 3), P80S100 (kpl 4).



PMMA 3 mm (opaali): P100S100 (kpl 1), P100S80 (kpl 2), P100S50 (kpl 3).



PMMA 3 mm (opaali): P100S100.

LIITE 1. (Osa 3.)



PMMA 3 mm: P100S100 (kpl 1).



PMMA 3mm: P100S80 (kpl 2).



PMMA 3mm: P100S50 (kpl 3).

LIITE 2. Polykarbonaatin (PC) testitulokset.



PC 3 mm: P100S100 (kpl 1), P100S90 (kpl 2).



PC 3 mm: P100S80 (kpl 3), P100S70 (kpl 4).



PC 3 mm: P100S60 (kpl 5), P100S50 (kpl 6).



PC 3 mm: P80S100 (kpl 7), P80S90 (kpl 8).



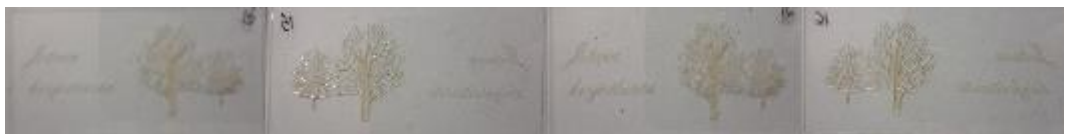
PC 3 mm: P80S80 (kpl 9), P80S70 (kpl 10).



PC 3 mm: P80S60 (kpl 11), P80S50 (kpl 12).



PC 3 mm: P50S100 (kpl 13), P50S90 (kpl 14).



PC 3 mm: P50S80 (kpl 15), P50S70 (kpl 16).

LIITE 2. (Osa 2.)



PC 3 mm: P50S60 (kpl 17), P50S50 (kpl 18).



PC 5 mm: P100S100 (kpl 1), P100S90 (kpl 10).



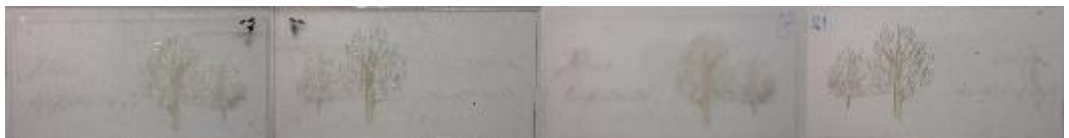
PC 5 mm: P100S80 (kpl 2), P100S50 (kpl 3).



PC 5 mm: P80S100 (kpl 4), P80S90 (kpl 11).



PC 5 mm: P80S80 (kpl 5), P80S50 (kpl 6).



PC 5 mm: P50S100 (kpl 7), P50S90 (kpl 12).



PC 5 mm: P50S80 (kpl 8), P50S50 (kpl 9).



LIITE 2. (Osa 3.)



PC 3 mm: P100S100 (kpl 1).

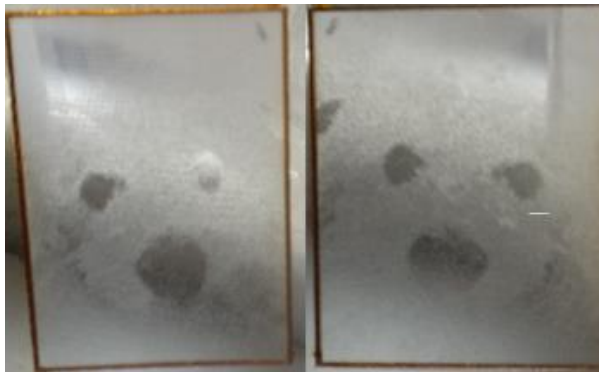


PC 3 mm: P100S80 (kpl 2).

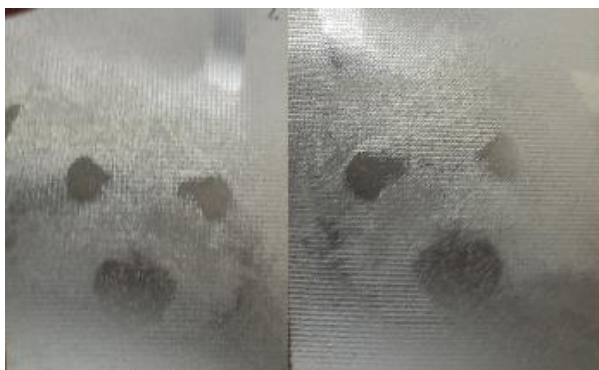


PC 3 mm: P100S50 (kpl 3).

LIITE 2. (Osa 4.)



PC 3 mm: P100S100 (kpl 1).



PC 3 mm: P100S80 (kpl 2).



PC 3 mm: P100S50 (kpl 3).

LIITE 3. Polyeteeniterftalaatin (PTFE) testitulokset.



PTFE 0,08 mm: P20S100 (kpl 7), P20S90 (kpl 15), P20S80 (kpl 8).



PTFE 0,08 mm: P20S70 (kpl 16), P20S60 (kpl 17), P20S50 (kpl 18),



PTFE 0,08 mm: P15S100 (kpl 4), P15S90 (kpl 12), P15S80 (kpl 5).



PTFE 0,08 mm: P15S70 (kpl 13), P15S60 (kpl 14), P15S50 (kpl 6).



PTFE 0,08 mm: P10S100 (kpl 1), P10S90 (kpl 9), P10S80 (kpl 2).



PTFE 0,08 mm: P10S70 (kpl 10), P10S60 (kpl 11), P10S50 (kpl 3).



PTFE 1 mm: P20S50 (kpl 7), P20S40 (kpl 12), P20S30 (kpl 8).

LIITE 3. (Osa 2.)



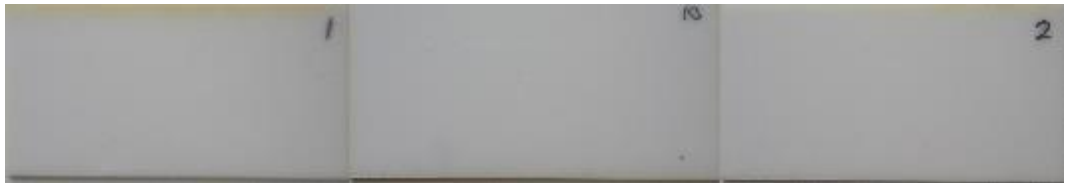
PTFE 1 mm: P20S20 (kpl 15), P20S10 (kpl 9).



PTFE 1 mm: P15S50 (kpl 4), P15S40 (kpl 11), P15S30 (kpl 5).



PTFE 1 mm: P15S20 (kpl 14), P15S10 (kpl 6).



PTFE 1 mm: P10S50 (kpl 1), P10S40 (kpl 10), P10S30 (kpl 2).



PTFE 1 mm: P10S20 (kpl 13), P10S10 (kpl 3).



PTFE 0,08 mm: P20S70 (kpl 1), P20S60 (kpl 2), P20S50 (kpl 3).

LIITE 4. Polyeteenin (PE) testitulokset.



PE-HMW 8 mm: P100S100 (kpl 1), P100S80 (kpl 2), P100S50 (kpl 3).



PE-HMW 8 mm: P100S40 (kpl 9), P100S30 (kpl 8), P100S20 (kpl 10).



PE-HMW 8 mm: P80S100 (kpl 4), P80S80 (kpl 5), P80S50 (kpl 6).



PE-HMW 8 mm: P80S40 (kpl 13), P80S30 (kpl 11), P80S20 (kpl 12).



PE-HMW 8 mm: P90S40 (kpl 14), P90S20 (kpl 15), P50S100 (kpl 7).



PE 20 mm: P100S60 (kpl 1), P100S50 (kpl 2), P100S40 (kpl 3).



PE 20 mm: P100S30 (kpl 4), P100S20 (kpl 5), P100S10 (kpl 6).

LIITE 4. (Osa 2.)



PE 8 mm: P80S60 (kpl 7), P80S50 (kpl 8), P80S40 (kpl 9).



PE 8 mm: P80S30 (kpl 10), P80S20 (kpl 11), P80S10 (kpl 12).



PE 8 mm: P60S60 (kpl 15), P60S50 (kpl 16), P60S40 (kpl 17).



PE 8 mm: P60S30 (kpl 18), P60S20 (kpl 19), P60S10 (kpl 20).



PE 8 mm: P50S60 (kpl 13), P50S10 (kpl 14).



LIITE 5. Polypropeenin (PP) testitulokset.



PP 2 mm: P100S100 (kpl 3), P100S80 (kpl 8), P100S50 (kpl 9).



PP 2 mm: P80N100 (kpl1), P80S80 (kpl 4), P80S50 (kpl 7).



PP 2 mm: P50S100 (kpl 2), P50S80 (kpl 5), P50S50 (kpl 6).



PP 3 mm: P100S100 (kpl1), P100S90 (kpl 2), P100S80 (kpl 3).



PP 3 mm: P100S70 (kpl 4), P100S60 (kpl 5), P100S50 (kpl 6).

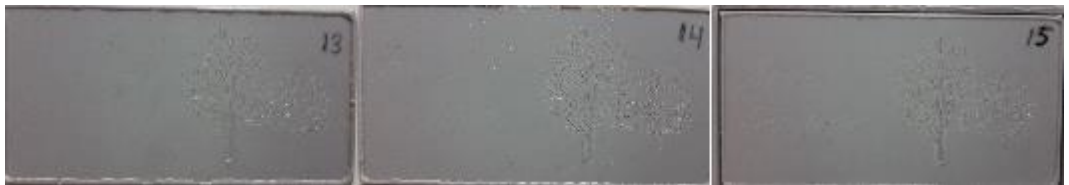
LIITE 5. (Osa 2.)



PP 3 mm: P80S100 (kpl 7), P80S90 (kpl 8), P80S80 (kpl 9).



PP 3 mm: P80S70 (kpl 10), P80S60 (kpl 11), P80S50 (kpl 12).



PP 3 mm: P50S100 (kpl 13), P50S90 (kpl 14), P50S80 (kpl 15).



PP 3 mm: P50S70 (kpl 16), P50S60 (kpl 17), P50S50 (kpl 18).



PP 3 mm: P100S50 (vasen), P50S50 (oikea).



LIITE 6. Polyasetaalin (POM) testitulokset.



POM-C 1, 5 mm: P100S100 (kpl 1), P100S80 (kpl 2), P100S50 (kpl 3).



POM-C 1, 5 mm: P80S100 (kpl 4), P80S80 (kpl 5), P80S50 (kpl 6).



POM-C 1, 5 mm: P50S100 (kpl 7), P50S80 (kpl 8), P50S50 (kpl 9).

LIITE 7. Polyvinyylidikloridin (PVC) testitulokset.



PVC 6 mm: P50S100 (kpl 6), P50S90 (kpl 5), P50S80 (kpl 4).



PVC 6 mm: P50S70 (kpl 3), P50S60 (kpl 2), P50S50 (kpl 1).



PVC 6 mm: P40S100 (kpl 13), P40S90 (kpl 14), P40S80 (kpl 15).



PVC 6 mm: P40S70 (kpl 16), P40S60 (kpl 17), P40S50 (kpl 18).



PVC 6 mm: P30S100 (kpl 7), P30S90 (kpl 8), P30S80 (kpl 9).



PVC 6 mm: P30S70 (kpl 10), P30S60 (kpl 11), P30S50 (kpl 12).