



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Alumiinohutlevyn leikkaamisen haasteet hiilidioksidilaserilla

Markus Knuuti

Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö

Tammikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Alumiiniohutlevyn leikkaamisen haasteet hiilidioksidilaserilla

Markus Knuuti

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö + 2021, 30 s. + 0 liitettä

Työn ohjaaja yliopistolla: Jussi Salakka

Työssäni on tavoitteena selvittää, miten alumiinin laserleikkauksen laatua voidaan parantaa. Työ lähtökohtaisesti keskittyy nimenomaisesti hiilidioksidilaserilla tapahtuvaan leikkaukseen. Tutkin eri asioiden ja parametrien vaikutusta leikkauksen jälkeen ja siihen, miten eri muutokset vaikuttavat leikkauksen jälkeen milläkin materiaalilla. Työni sisältää myös vertailua hiilidioksidi- ja kuitulaserin välillä. Eri parametrien vaikutusten selvittämisen tavoitteena on, että laser saataisiin mahdollisimman hyvin optimoitu. Arvojen optimoinnista tulee myös ymmärtää, miksi hiilidioksidilaserin soveltuvuus alumiinille on ylipäänsä huono.

Tutkin eri parametrien vaikutusta perehtymällä muiden tekemiin tutkimuksiin, sekä kirjallisuuteen. Niiden vaikutuksista leikkauksen jälkeen eri materiaaleille löytyi hyvin tietoa. Parametrien lisäksi leikkauksen jälkeen vaikuttavat polttopää sekä suutin, joiden vaikutus tulee myös ottaa huomioon.

Tutkimuksessani tuloksissa ei ollut mitään yllättävää. Avainasemassa on suhteessa toisiinsa valitut parametrit. Mitään yleismaailmallisia parametrejä ei voida määrittää, sillä laadun ja leikkauksen nopeuden välillä tasapainottelu riippuu täysin sovellutuskohteesta.

Asiasanat: laserleikkaus, alumiini, hiilidioksidilaser

SISÄLLYSLUETTELO

1 TERMISTEN LEIKKAUSMENETELMIEN ESITTELY.....	3
1.1 Johdanto	3
1.2 Historiikki ja kehitys	4
1.3 CO2-laser	5
1.4 Peilit	10
1.5 Kuitulaser	10
1.6 Polttoleikkaus	13
2 Hiilidioksidilaser ja alumiini.....	15
2.1 Alumiini haastavat ominaisuudet	15
2.2 Säädot	16
2.3 Apukaasun paineen ja suuttimen vaikutus	17
2.4 Polttopisteen ja sen sijainnin vaikutus	22
2.5 Alumiineista	24
3 MENETELMÄVERTAILU JA YHTEENVETO.....	26
3.1 Kuitu vai CO2	26
3.2 Yhteenveto	30
LÄHDELUETTELO	31

1 TERMISTEN LEIKKAUSMENETELMIEN ESITTELY

1.1 Johdanto

Kandidaatintyössäni käsittelen termisistä leikkaustavoista polttoleikkausta, CO₂-laserleikkausta ja kuitulaserleikkausta. Työn pääpaino on CO₂-laserilla tehtävässä alumiinisten ohutlevyjen leikkauksessa. Työssä tavoitteena on selvittää, miksi CO₂-laserilla on vaikeuksia leikata alumiinia, mitkä asiat heikentävät leikkujälkeä ja millä leikatun kappaleen pinnanlaatu saadaan paremmaksi.

Laserleikkaukseen, ja erityisesti alumiinin leikkaukseen aiheena päädyin siitä syystä, että se on kesätöissä ollut ongelmana. Erityisesti leikkauspinnan alaosaan muodostuva ”parta” oli ongelma. Halusin selvittää, onko syy koneen huono soveltuvuus kyseiseen materiaaliin vai millaisia muutoksia parametreihin tarvitaan. Hiilidioksidilaserit ovat kuituun verrattuna vanhaa tekniikkaa, mutta ne ovat silti nykyäänkin vielä käytettyjä. Mikäli hiilidioksidilaserilla olisi mahdollista leikata alumiinia paremmin, niitä voitaisiin käyttää pidempään, ennen kuin mahdollisesti tarvitsisi hankkia uutta kuitulaseria.

Laserleikkauksessa on monia asioita joihin koneen käyttäjä voi vaikuttaa, ja jotka vaikuttavat suoraan leikkaustulokseen. Erinäisistä koneen parametreista, joihin kuuluu laserin teho, apukaasun paine, polttopiste, polttoväli sekä leikkausnopeus. Suurin osa eri materiaalien ja materiaalivahvuuksien leikkauksesta perustuukin lähinnä parametrien muuttamiselle. Ainoat asiat leikkauksessa, johon laserleikkurin käyttäjällä ei ole mahdollista vaikuttaa, on lasersäteen heijastuvuus leikattavasta materiaalista. Tässä kuitulasereilla onkin selvä etulyöntiasema hiilidioksidilaseriin, sillä kuitulaserin aallonpituuteen on mahdollista vaikuttaa koneen valmistusvaiheessa.

Työssäni en juuri käsittele eri toimenpiteiden kustannuksia, sillä ne ovat aina tilannekohtaisia, ja jonkinlaisen johtopäätöksen vetäminen ei välttämättä päde kaikkiin sovellutuksiin, koska laserleikkuri on niin monikäyttöinen laite, jolla voidaan työstää monia materiaaleja, joko pienissä tai suurissa erissä. Laadun, työstönopeuden ja laitteen hankintahinta ovat merkittäviä kriteerejä, jotka tuleekin ottaa huomioon aina tapauskohtaisesti.

1.2 Historiikki ja kehitys

Laserleikkauksen historiassa ja sen kehittymisessä on kaksi merkittävää tapahtumaa. Merkittävimpänä on toki ensimmäisen laserin kehitys vuonna 1960. Laserin keksijänä oli Theodore Maiman, joka rakensi ensimmäisen toimivan laserin Hughesin tutkimuslaitoksella. Tämän laserin toiminta perustui rubiinisauvaan ja salamavalolamppuun. Sana LASER tulee sanoista Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Laseria edeltävä teknologia oli MASER, joka koostuu muuten samoista sanoista, mutta M viittaa sanaan Microwave. Maserin perusperiaate olikin sama kuin laserissa, mutta valon vahvistamisen sijaan kyse on mikroaalloista (ETHW 2010).

Toinen merkittävä tapahtuma on se, kun laseria käytettiin ensimmäistä kertaa materiaalin työstämiseen. Tämä tapahtui vuonna 1967, jolloin Peter Houldcroft leikkasi 1 mm paksuista terästä 300W CO₂-laserilla, apukaasuna happi. (Hilton P. A. TWI-Global 2002). On kuitenkin erikoista miksi ensimmäinen laser, jota käytettiin teolliseen sovellutukseen, toimiikin hiilidioksidilla, vaikka ensimmäisen lasersäteen luontiin käytettiin enemmän kidelaserin periaatetta muistuttavaa laitetta. Tässä kuitenkin astuu mukaan kuvioon Intialainen C. Kumar N. Patel. Patel oli intialaissyntyinen, joka sai Yhdysvalloissa vuonna 1996 ”National Medal of Science” palkinnon. Hän tutki jalokaasujen mahdollisuuksia laserin luomiseksi, ja tästä tutkimuksesta hän myös tunnustuksensa sai. Vuonna 1964 tutkimuksessa paljastui, että hiilidioksidia on mahdollista käyttää lasersäteen luomiseen (National Science&Technology Medals Foundation 2021). CO₂-laseria käytettiin ensimmäisen kerran teolliseen sovellutukseen vain kaksi vuotta sen jälkeen, kun Patel sai selville hiilidioksidin käyttömahdollisuuden laserteknologiassa.

Peter Houldcroft sai idean, että yhdistämällä kohdistettu lasersäde ja käyttämällä happea apukaasuna, voitaisiin parantaa tarkkuutta ja nopeutta polttoleikkausprosesseissa. Houldcroft oli noihin aikoihin työskentelemässä TWI:ssä (The Welding Institute). Heidän onnekseen aivan heidän toimipisteensä lähellä oli Services Electronic Research Laboratory (SERL). SERL laseria oli kehitetty sotilaskäyttö prioriteettina, mutta harkinnassa oli myös teollisuuden sovellutukset. Tämä laser oli teholtaan 300W ja jopa 10 metriä pitkä, sama, jota Houldcroft käytti testissään. Se oli hitaan pitkävirtauksen laser,

niille tunnusomaista on juuri massiivinen koko, mutta ne olivat myös ensimmäisiä suuritehoisia lasereita. Nimi tulee siitä, että resonaattoriputkessa oleva kaasu virtaa hitaasti. Kaasuseos vaihtuu putkessa 20 l/min (Kujanpää ym. 2005 s.56). Tämän jälkeen laserin kehityksessä on ollut hyvin pitkälti aina samat teemat, parempi hyötysuhde, pienimpi kone ja parempi säteenlaatu. 80-luvulla läpimurtoa lasertekniikkaan oli tuomassa optisten kuitujen kehittyminen. Ensimmäiset teolliset laserin hyödyntämiset alettiin tehdä 70- luvulla, 80- luvulla lasertyöstö tuli mukaan autotehtaisiin mm. korinvalmistukseen, pakoputkiin ja hallintalaitteiden osien valmistukseen. Todellisen läpimurron laser teki 90- luvulla konepajoissa. Vuonna 2003 myydyistä lasereista 45 % on hiilidioksidilasereita, 35 % kidelasereita ja 18 % Excimerlasereita. Diodilasereiden osuus tuolloin oli vain 2 %. Suomessa kuitenkin CO₂-lasereiden osuus oli jopa 72 %. Vuonna 2003 lasertyöstön markkinat olivat yli 4 miljardia euroa. Markkina-alueet olivat aika tasan Aasian, Euroopan ja Amerikan välillä (Kujanpää ym. 2005 s. 16–19). Vuonna 2019 lasereiden markkinat olivat 15.13 biljoonaa USD, eli n. 12,4 miljardia euroa. Vuonna 2017 myydyistä lasereista 61 % meni Aasiaan (30 % pelkästään Kiinaan), Euroopan osuus on 23 % ja Amerikan vain 16 %. Myydyt laserit olivat taas tyypiltään: 43 % kuidut, 24 % kidelaserit, 18 % Excimer laserit, 12 % Co₂-laserit ja 3 % Diodilaserit (OPTECH 2021). Kun tätä verrataan vuoteen 2003, niin selkein ero on siinä, kuinka merkittävän markkinaosuuden kuitulaserit ovat kaapanneet.

1.3 CO₂-laser

Termisiin leikkausmenetelmiin kuuluvat polttoleikkaus, plasmaleikkaus ja laserleikkaus (SFS-EN ISO 9013:2017). Tässä työssä keskitytään lähinnä laser- ja polttoleikkaukseen. Polttoleikkaus ja laserleikkaus hapella on hyvin samankaltaista, joten tästä syystä polttoleikkaus on myös hyvä mainita (ESAB 2021a).

Laserleikkaus on jaettu kahteen osaan, CO₂- ja kuitulaserleikkaukseen, vaikkakin ne kulkevat saman numerotunnuksen, 84 alla (SFS-EN ISO 4063). Seuraavaksi käydään läpi laserin toimintaa ja ominaisuuksia.

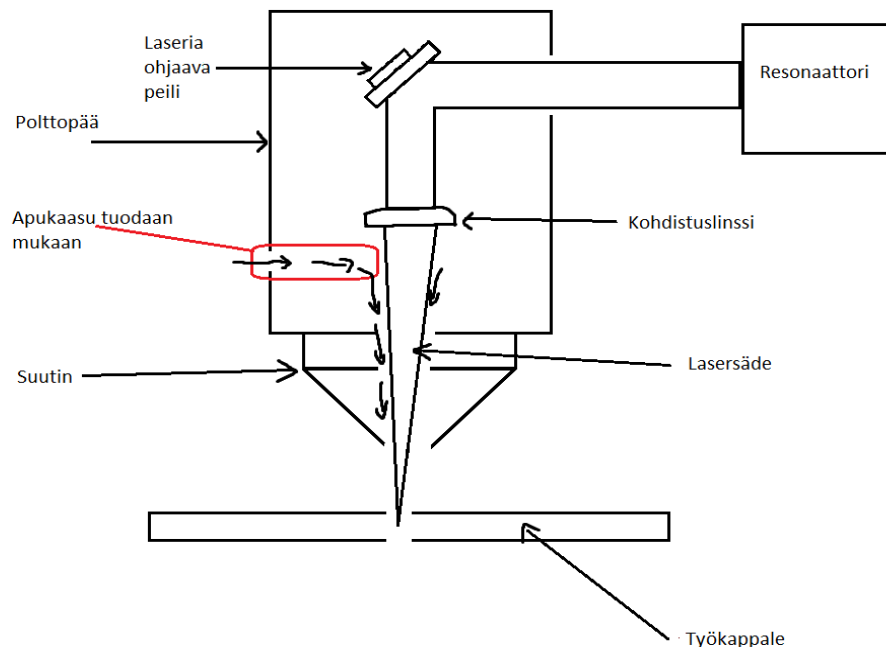
Vaikka CO₂-laserin nimestä voisi päätellä, että laserin muodostamisessa käytettävä kaasu olisi suurelta osin hiilidioksidia, niin näin ei kuitenkaan ole. Käytettävä kaasuseos on (yleensä) 78 % heliumia, 13 % typpeä ja vain 10 % hiilidioksidia. Hiilidioksidi on kyllä varsinainen laseroiva kaasu ja muut kaasut vain auttavat syntyvän säteen laadun kanssa. Heliumin virka seoksessa on jäähdyttää kaasuseosta, sillä resonaattorissa tuotetaan myös hukkalämpöä. Helium ei muutoin osallistu laserin muodostamiseen, eikä myöskään millään tavoin haittaa toimenpidettä. Typpi auttaa energian siirtymistä hiilidioksidimolekyylisiin, niiden energiatasoeron ansiosta, typen energiataso on ylempi kuin hiilidioksidin (Kujanpää ym. 2005 s. 54).



Kuva 1. Bystronicin BySprint Pro 3015 (Bystronicin luvalla)

Kuvassa 1 on Bystronicin hiilidioksidilaser. Sininen ympyrä kuvassa osoittaa putkea, jossa laseria ohjataan, polttopäälle. Kyseisellä laserleikkurilla voidaan leikata levyjä, joiden maksimimita on 3000x1500. BySprint Pro:ssa plekseihin varustetun ”kopin” sisällä on työstettävä levy. Koneen takana olevalla pöydällä tapahtuu leikattujen kappaleiden purku, sekä seuraavan työstettävän levyn paikka on siinä. Edessä aukinaisten ovien lähellä olevalla tietokoneella valitaan haluttu leikkausohjelma, sekä säädetään parametreja. Työstettävien levyjen ja kappaleiden nestaus voidaan suorittaa eri tietokoneella. Nestaus tarkoittaa sitä, miten työstettävät kappaleet leikataan levyiltä, yleensä tietokone laskee tämän automaattisesti.

Laserleikkaus on eniten käytetty toimenpide levyn leikkaukseen (Riveiro, Quintero et al. 2019). Laserleikkurissa luodaan hyvin korkeaenerginen valonsäde, joka kohdistetaan haluttuun kohtaan leikattavassa tuotteessa, tätä sädettä ohjaamalla voidaan leikata halutun muotoisia kappaleita. Laserleikkauksessa työstettävä materiaali joko sulaa tai höyrystyy leikkaukohdasta (SFS-EN ISO 9013:2017). Kaasun tehtävä leikkauksessa riippuu hieman siitä, käytetäänkö typpeä vai happea. Tyypellä ajettaessa kaasu ei osallistu itse leikkaukseen, mutta sen tehtävänä on puhaltaa sula ja kaasut pois leikkausurasta ja jäähdyttää, sekä estää oksidikerroksen muodostumista leikkuupintaan (PLP 2021) (Riveiro, Quintero et al. 2019). Kaasun toiminta jäähdytyksessä on tosin hyvin minimaalinen. On laskettu, että mikäli sulan lämpötila on 2300K, leikkausuran leveys $50\mu\text{m}$, syvyys 3 mm ja kaasun virtauksen nopeus suuttimen suuaukolla 100 m/s, jäähdytysteho on vain 2,5W kun taas laserin teho on kilowatteja (Riveiro, Quintero et al. 2019). Hapella ajettaessa laserin lämmöntuotto kasvaa, ja tästä syystä siitä voidaankin käyttää nimitystä laserpolttoleikkaus (SFS-EN ISO 9013:2017). Happea käytettäessä



Kuva 2. Havainnollistava kuva CO2-laserleikkurin polttopään sisältä (mukailten ESAB 2021).

pinnanlaatu on hyvä leikatessa niukkaseosteisia teräksiä ja leikkausnopeus on korkeampi

kuin tyypellä, mutta leikkauspintaan muodostuu oksidikerros (Riveiro, A., Quintero et al. 2010) (CEKIC, BEGIC et al. 2012). Esimerkiksi titaanin leikkaamisessa taas voidaan käyttää argonia, tämä parantaa pinnanlaatua, mutta epäpuhtaudet kaasussa heikentävät laatua merkittävästi (Riveiro, Quintero et al. 2010).

CO₂- ja kuitulaser leikkaavat kappaletta samalla periaatteella, mutta niiden eroavaisuus on siinä, miten laser luodaan ja ohjataan polttopäähän. CO₂-laserissa lasersäde luodaan resonaattorilla korkeajännitteen ja kaasuseoksen avulla. Kaasuseos on lasiputkessa, jossa molemmissa päissä on peilit, toinen peileistä on täysin heijastava ja toinen osittain heijastava. Resonaattorin luoma korkeajännite kulkee putkessa reagoiden kaasun kanssa nostamalla molekyylejä korkeammalle energiatasolle. Korkeammalla energiatasolla molekyyli ei ole vakaa ja pyrkiiikin palautumaan normaalitilaan. Normaalitilaan palatessa vapautuu fotoni, jolla on vapautuvasta molekyylistä riippuva aallonpituus. Kun fotonit törmäävät toiseen molekyyliin niin jälleen vapautuu lisää fotoneita (Kujanpää ym 2005 s.34). Valo kulkee putkessa edestakaisin, kunnes sen voimakkuus on riittävän suuri läpäistäkseen osittain heijastavan peilin. Kun valo pääsee peilin lävitse, se ohjataan täysin heijastavilla peileillä polttopäähän, jossa se kohdistetaan linssin avulla haluttuun kohtaan

(HPClaser 2021, BYSTRONIC 2021a). CO₂-laserissa tuotettu valo on infrapunavaloa aallonpituuden perusteella (ESAB 2021b).



Kuva 3. Hiilidioksidilaserin laserin muodostaminen (Bystronicin luvalla)

Kuvassa 3 olevaa laserin muodostamiseen käytettävää osaa ei näy kuvassa 1, mutta se sijaitsee koneen vasemmalla puolella, sinisen ympyrän lähellä, sillä tästä yksiköstä lasersäde lähtee eteenpäin.

Oli laser minkäläinen tahansa, niin niissä on aina kolme tiettyä komponenttia. Ensinnäkin tarvitaan väliaine, jolla laser voidaan luoda, se voi olla kiinteää, nestettä tai kaasua. Toiseksi tarvitaan kaksi peiliä, joiden välissä laser luodaan, toisen peilin pitää olla

puoliläpäisevä. Ja kolmantena tarvitaan sähkö- tai valoenergiaa, jolla nostetaan elektronien energiatasoja laseria varten (Kujanpää ym. 2005 s. 33).

1.4 Peilit

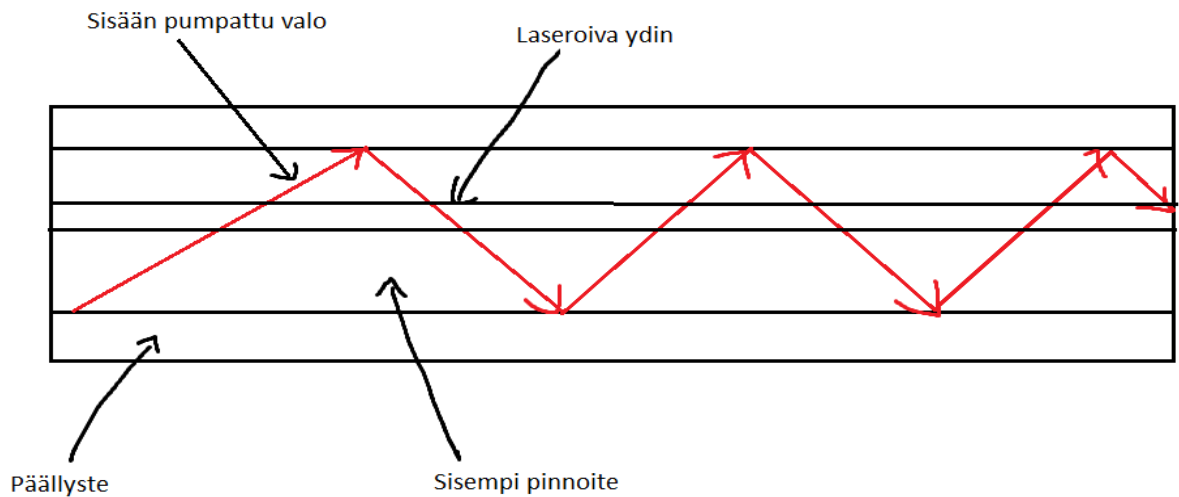
Kuten aiemmin mainittiin, hiilidioksidilaserissa säteen ohjaaminen tapahtuu peileillä. Säteen ohjaamiseksi käytetään yleensä 1–6 eri peiliä. Peilien lisäämisellä saadaan lisää vapausasteita liikkeisiin, mutta kääntöpuolena on tehohäviön kasvaminen. Kun laserleikkauskonetta suunnitellaan, niin suunnittelussa onkin hyvin vahvasti läsnä tasapainottelu tehohäviön, vapausasteiden sekä laitteen monimutkaisuuden kanssa. Laitetta suunnitellessa tulee myös ottaa huomioon peilien jäähdyttäminen, sillä suuritehoisissa systeemeissä ne lämpiävät todella paljon, ja vesijäähdytys onkin joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta pakollista (Kujanpää ym. 2005 s. 75).

Laserleikkurissa säteenohjauksessa käytettävät peilit ovat yleensä piitä tai kuparia. Peilejä voidaan myös pinnoittaa esim. molybdeenillä ja kullalla. Kuparin heijastavuus voidaan saada jopa 99 prosenttiin 10,6 μm aallonpituudella. Mikään peiliratkaisu ei tosin ole ongelmaton. Pelkän kuparin ongelmana on se, että se naarmuuntuu helposti pehmeytensä vuoksi. Toisena ongelmana on sen herkkä hapettuminen. Kullan käytössä pinnoitteena saadaan vielä lisää heijastavuutta. Molybdeenipinnoite on taas hieman päinvastainen kuparin kanssa. Se tuo merkittävän lisän kovuuteen, mutta heijastavuus on välillä 96–99 %. Kovuuden tuomana etuna se kestää huomattavasti enemmän putsauksia kuin muut peilit, ja siitä on myöskin helpompi poistaa roiskeita. Mikäli molybdeeniä ei käytetä pinnoitteena, niin on mahdollista saavuttaa jopa 99,9 % heijastavuus, mutta tällöin ongelmana on jälleen herkästi naarmuuntuva pinta (Kujanpää ym. 2005 s.75).

1.5 Kuitulaser

Kuitulaserin ero CO₂-laseriin on lasersäteen muodostuksessa sekä sen kuljetuksessa polttopäähän. Kuitulaserissa laserin muodostaminen tapahtuu diodeissa, jotka hyödyntävät plus- ja miinusvarauksellisia puolijohteita. Kun varaukset kohtaavat, niiden yhdistymisessä syntyy fotoneita, jotka pumpataan kuituun. Kuituun pumpatut fotonit kulkevat kuidussa eteenpäin. Aallonpituus riippuu siitä, millä aineella kuidun ydintä on

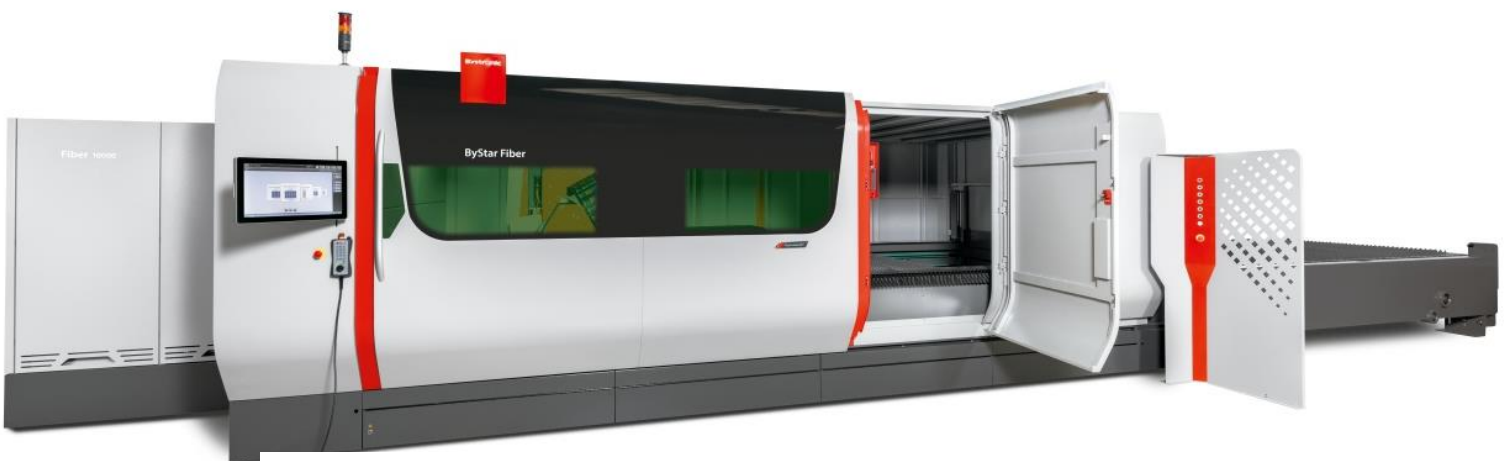
”terästetty”. Esimerkiksi seuraavilla aineilla: erbium, ytterbium, neodmium ja thylium. (LASERAX 2021) (Sakurai, Chosrowjan et al. 2016). Kuidussa valo menee peilien



Kuva 4. Kuitukaapeli havainnekuva

kautta edestakaisin, kulkien kuidun sisällä, ja lopulta tulee ulos tietyllä aallonpituudella. Tämän jälkeen valo ohjataan kuitua pitkin polttopäähän, jossa se kohdistuslinssillä keskitetään haluttuun kohtaan (LASERAX 2021).

Kuva 4 esittää poikkileikkausta kuitukaapelista. Kuitukaapelin toiminta perustuu siihen, että se heijastaa täysin laidoille osuvat säteet. Säteet kulkevat ytimessä, ja kohdatessaan sisemmän pinnoitteen ja ulomman pinnoitteen, ne heijastuvat siitä täysin jatkaen matkaa (Fiberopticshare 2021).



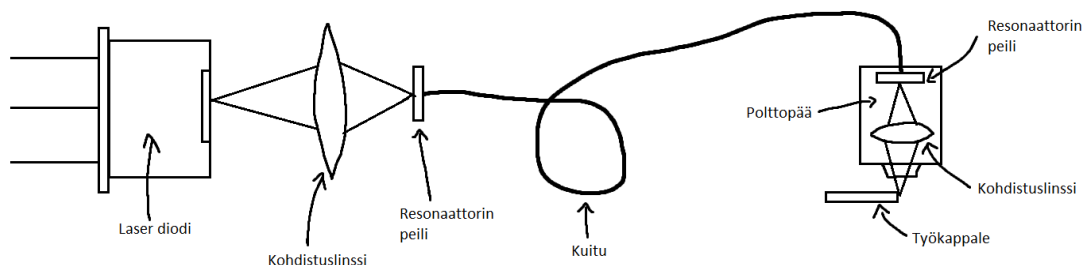
Kuva 5. ByStar Fiber (Bystronicin luvalla)

Kuvassa 5 oleva laserleikkuri on hyvin samalla periaatteella toimiva kuin esim. BySprint Pro. Ainoa ulkoinen merkittävä ero on se, että tästä puuttuu kokonaan kuvassa 3 esiintyvä laserin muodostamiseen käytettävä suuri yksikkö, eikä koneen ulkopuolella mene mitään putkea, jossa sädettä tarvitsisi ohjata. Muutoin kone toimii samalla periaatteella, työstettävä levy sisällä, purkupöytä takana, parametrien säätö tapahtuu oven vieressä olevalla tietokoneella.

Kuitu tuo myös huollettavuuden osalta merkittävää etua siinä, että huollettavaa ei ole niin paljoa kuin hiilidioksidilaserissa, jossa vuosihuolloissa putsataan säteen ohjauksessa käytettävät peilit, ja ne pitää myöskin uudelleen kohdistaa oikein.

Kuitulaserin koon etuna on se, että paremman intensiteetin ja säteenlaadun ansiosta voidaan käyttää pienempitehoista kuitua, kuin hiilidioksidilla toimivaa vastaavan tehoista (Bystronic 2021a). Kuitulaseria ei kuitenkaan tule sekoittaa kidelaseriin, jonka säde voidaan myös siirtää kuidulla polttopäähän. Ero kuitulaseriin tulee siinä, että laser luodaan kuidun ulkopuolella kiteessä, josta se ohjataan kuituun. Tämän merkittävä huono puoli on se, että kide kuumenee todella paljon, ja sen jäähdyttäminen täytyy toteuttaa vedellä. Toinen heikkous kidelaserin käytössä on pumppaukseen käytettävän lampun elinikä, mikä on vain 1000 h (Kujanpää ym. 2005 s.63).

Kuvassa 4 näkyvän laseroivan ytimeen kokoon voidaan vaikuttaa. Mikäli se tehdään pieneksi, niin se myös pienentää säteen halkaisijaa, joka on leikkauksen kannalta hyvästä, sillä se kasvattaa intensiteettiä (Kujanpää ym. 2005 s.68).

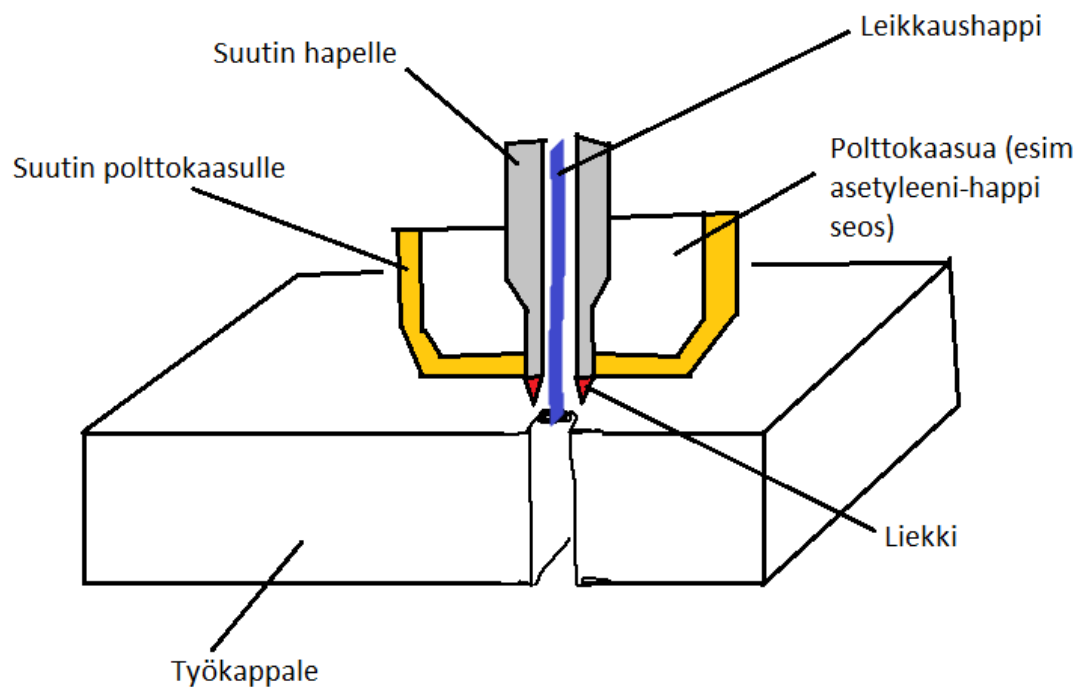


Kuva 6. Kuitulaserin toimintaperiaate (mukaillen: Kujanpää ym 2005 s.68)

Kuvassa 6 on havainnollistettu kuitulaserin toimintaa. Jos polttopäätä verrataan kuvaan 1, niin nähdään, että siinä missä CO₂ laserin polttopäässä on viimeinen lasersädettä ohjaava peili, niin kuidussa suunnilleen samalla paikalla on resonaattorin peili.

1.6 Polttoleikkaus

Polttoleikkauksessa prosessina materiaalin leikkaus tapahtuu käyttämällä polttokaasua ja leikkaushapetta (SFS-EN ISO 9013). Leikkaushapen puhtaudelle on määritelty minimiarvo, epäpuhtauksia saa olla vain 0,5 % (SFS-EN ISO 14175). Polttoleikkauksessa liekillä esikuumennetaan leikattavaa kappaletta, ja happisuihku polttaa materiaalia, sekä puhaltaa sulan pois leikkausurasta. Polttoleikkaus vaikeutuu, mikäli leikattava materiaali on seostettu (poislukien mangaani ja titaani) ja seosteisten terästen leikkaaminen vaatii erityisjärjestelyjä (SFS-EN ISO 9013). Polttoleikkausta käytetäänkin hyvin paksujen levyjen leikkaamiseen, jopa 900–1200 mm paksuisten levyjen leikkaus on mahdollista. Mikäli levyä leikataan johonkin kuvioon, niin työstettävän levyn paksuus ei juuri yli 300 mm nouse. Hyvillä säädöillä leikkauksen jälki on tasaisen suorakulmainen, toki yläreuna hieman pyöristyy lämmöntonin seurauksena. Polttoleikkauksella voidaan leikata 6 mm vahvuista materiaalia, tosin se vaatii erikoissäätöjä. Parhaimmillaan polttoleikkaus on 25 mm ja siitä ylöspäin aina 300 mm asti (ESAB 2021a).



Kuva 7. Polttoleikkauksen suuttimen poikkileikkaus (mukaillen Kjellberg 2021)

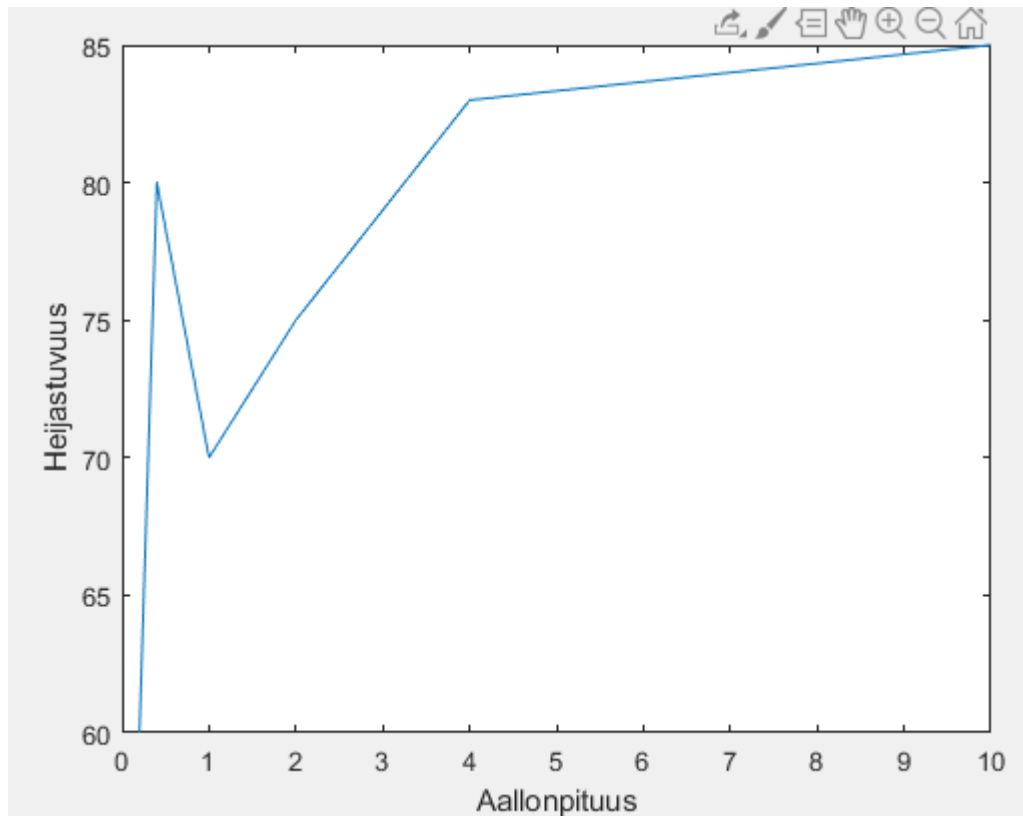
Polttoleikkauksessa on kuitenkin muutamia edellytyksiä, jotka on toteuduttava sen onnistumiseksi. Seuraavat viisi kohtaa ovat suoraan lainattu SFS-EN ISO 9013 standardista.

- Leikattavan materiaalin syttymislämpötila alhaisempi kuin sen sulamislämpötila
- Palamistuotteen ja metallioksidien sulamislämpötila on alhaisempi kuin leikattavan materiaalin sulamislämpötila
- Menetelmä tuottaa sen verran lämpöä, että materiaalin alueet leikkauksen syvyys suunnassa kuumenevat ainakin syttymislämpötilaan asti
- Lämmöntuonti leikkaurassa kuumennusliekin ja alavan materiaalin läpi on korkeampi kuin lämmön poistuminen, kun lämpö johdetaan materiaalin läpi ja ympäristöön
- leikkauskuona on sellaisessa nestemäisessä tilassa, että se voidaan poistaa leikkaurasta leikkaushapella.

2 HIILIDIOKSIDILASER JA ALUMIINI

2.1 Alumiini haastavat ominaisuudet

Alumiini laserleikkauksessa ongelmia tuottaa lähinnä kaksi seikkaa: Alumiinin lämmönjohtavuus sekä sen heijastavuus. Heijastavuus vaikeuttaa leikkausta siksi, että mikäli materiaali heijastaa laseria pois, tarvitsee tuoda suuremmalla teholla energiaa leikkaukseen. Lämmönjohtavuus taas siirtää lämpöä pois alueelta johon laserilla vaikutetaan (Janković, Madić et al. 2019). Heijastavuutta vastaan auttaa se, että laserin intensiteettiä saadaan korkeammaksi ja että aallonpituus on sellainen, että materiaali ei heijasta sitä hyvin (Leone, Genna et al. 2016). Laservalmistaja Bystronicin mukaan 4kW:n hiilidioksidilaserissa on jopa 5x alhaisempi intensiteetti kuin 2kW kuitulaserissa. Tämä johtuu polttopisteen pinta-alan merkittävästä erosta. Hiilidioksidilaserissa 4kW mallissa polttopisteen pinta-ala on 0,001963 cm² kun taas kuidulla 2kW mallissa se on 0,0002 (Frank Arteaga, Bystronic 2021). Intensiteetti saadaan kaavasta $\frac{P}{A}$ jossa P on tässä tilanteessa laserin teho ja A polttopisteen pinta-ala (Bystronic 2021b).



Kuva 8. Alumiinin heijastavuus eri aallonpituuksille. Heijastavuus on %-yksiköitä ja aallonpituus μm (L.Li et al. 2000)

Nd:YAG(ω) kuidulla aallonpituus on n. 1 μm , ja hiilidioksidilla 10 μm (Sakurai, Chosrowjan et al. 2016). Kun näitä arvoja verrataan kuvaan 4, huomataan, että kuidun ja hiilidioksidilasaerin ero absorptiossa alumiiniin on 15 %-yksikköä.

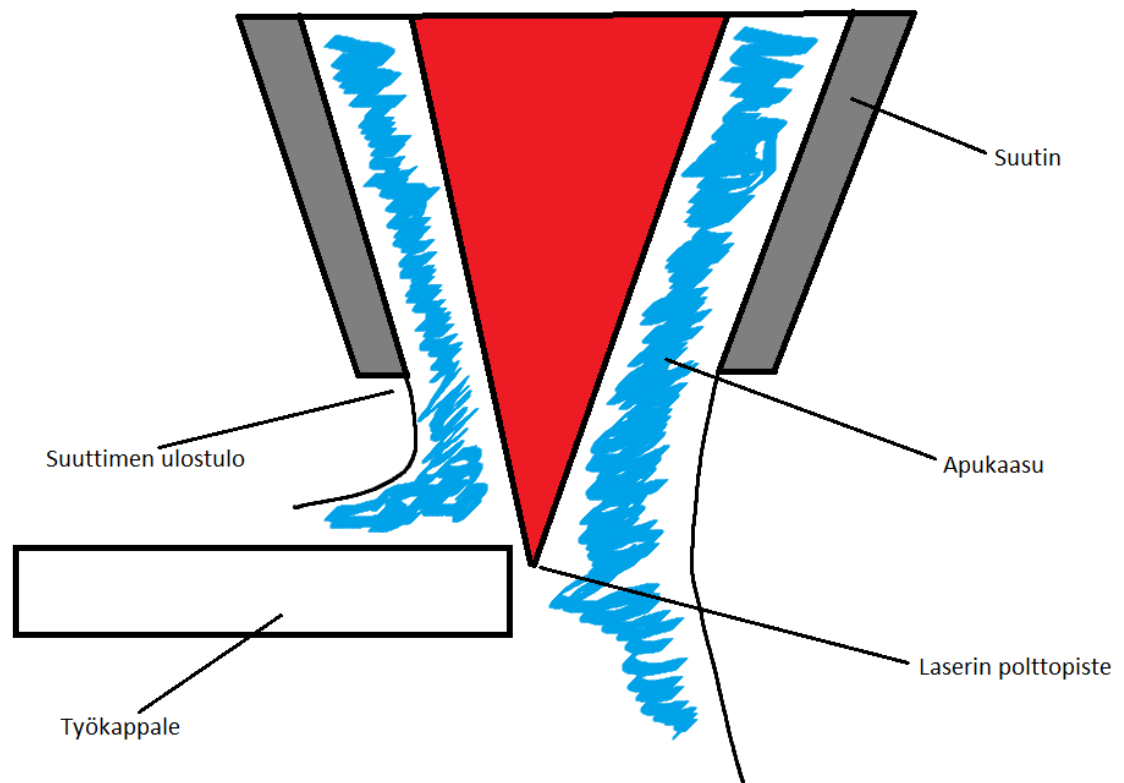
2.2 Säädot

Laserleikkuriin voidaan ohjelmoida eri parametrejä ja vaihtaa oikeaa suuttimen kokoa sekä polttopäätä kullekin materiaalille ja materiaalivahvuudelle. Säädetäviä parametrejä on mm. apukaasun paine, leikkausnopeus, laserin teho, polttopisteen sijainti. Omasta kokemuksesta ainakin Bystronicin lasereissa on valmiita ”profiileja” eri materiaaleille ja materiaalivahvuuksille. Nämä harvoin olivat sellaisinaan kovin hyviä, mutta yleensä leikkuunopeuden, polttopisteen sijainnin ja tehon säädöllä päästään hyvään lopputulokseen. Polttopään ja suuttimen koot olivat yleensä suoraan verrannollisia levyn paksuuteen. Alumiinin leikkauksen optimoinnissa keskitynkin pääasiassa apukaasun

paineeseen, leikkausnopeuteen ja tehoon. Laserin teholla ja leikkuunopeudella on suora vaikutus intensiteettiin, sekä siihen kauanko laser vaikuttaa yhteen kohtaan (Janković, Madić et al. 2019). Laatuun vaikuttavia asioita kokonaisuudessaan hiilidioksidilaserilla on: laserin teho, leikkuunopeus, leikattavan materiaalin paksuus, suuttimen muotoilu ja apukaasu.

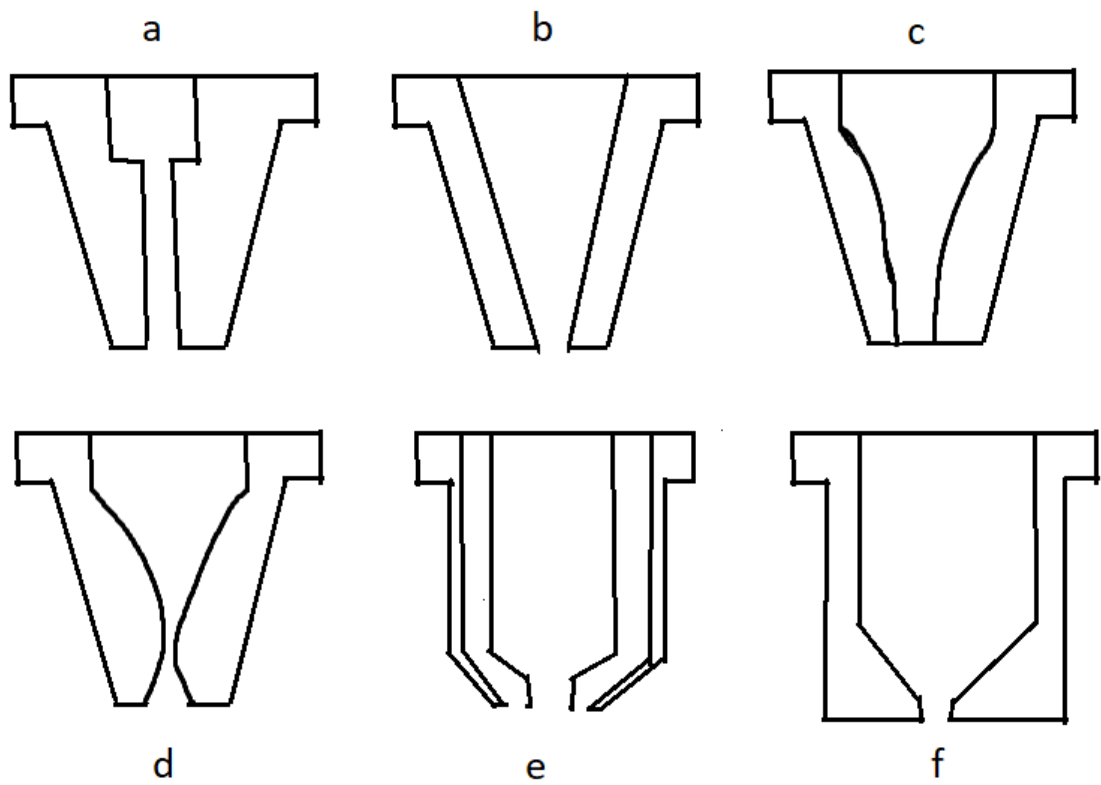
2.3 Apukaasun paineen ja suuttimen vaikutus

Laserleikkauksessa apukaasun vaikutuksia leikkuuseen on käsitelty aiemmassa kappaleessa. Apukaasun paine ja suuttimet liittyvät toisiinsa siten, että suuttimen halkaisija vaikuttaa apukaasun määrään. Pelkästään apukaasun paineen nostamisella tosin on havaittu olevan lähes suoraan negatiivisesti verrannollinen vaikutus leikkuupinnan laatuun alumiinilla. Tässä apukaasun paineen lähtötasona oli 6 bar (apukaasuna typpi), leikattavana materiaalina 3 mm 2024-T3 ja laseri 3,5kW, paineen mittaamisessa edettiin aina 10 bar asti. Paineen nousun aiheuttamalle laadun heikkenemiselle ei ole yhtä selkeää syytä. Epäilyksenä on, että kova paine aiheuttaa enemmän aerodynaamisia ongelmia ja epätasaisuutta kaasun virtauksessa urassa. (Janković, Madić et al. 2019).



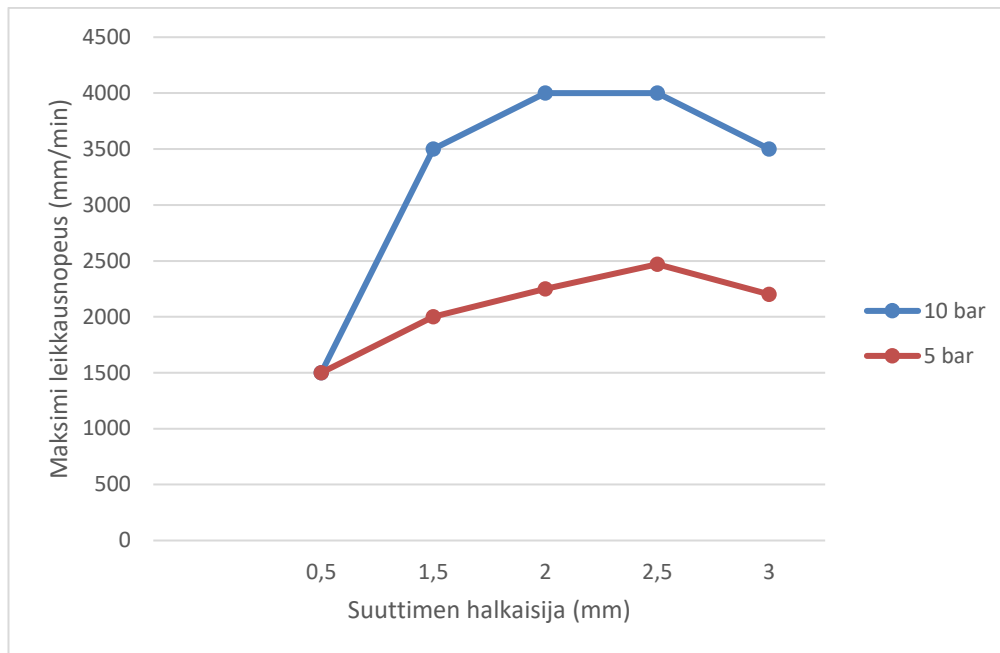
Kuva 9. Laserin suutin (Riveiro, Quintero, et al 2010)

Kuvasta 9 nähdään, että mikäli suutinta pienentää, niin aukko, josta apukaasu virtaa, myös pienenee. Lasereihin on saatavilla erimallisia suuttimia, joiden geometria vaikuttaa apukaasun virtaukseen.



Kuva 10. Erilaisia suutintyyppejä (Riveiro, Quintero, et al 2019)

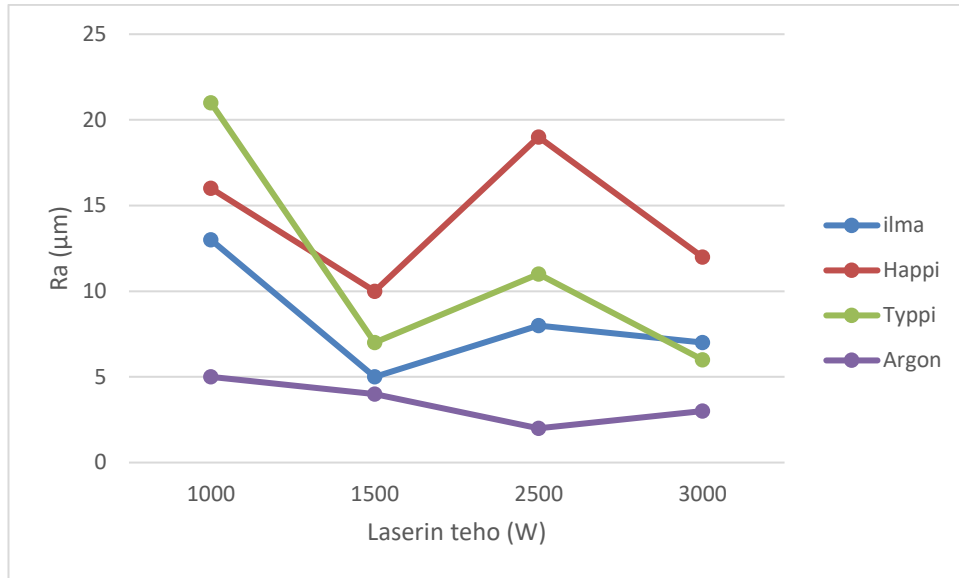
Omasta kokemuksesta kuvassa 10 oleva suutin b on yleisin. Sitä käytettiin niin hapella, kuin työlläkin leikatessa, oli kyseessä sitten alumiini, haponkestävä, kylmävalssattu tai tavallinen rakenneteräs.



Kuva 11. Leikkausnopeuden riippuvuus suuttimen halkaisijasta leikattaessa alumiini-kupari seosta. Levyn paksuus 3 mm, suuttimena kartiomallinen (kuva 6, suutin b) ja apukaasuna argon (Mukaiillen Riveiro, Quintero 2019)

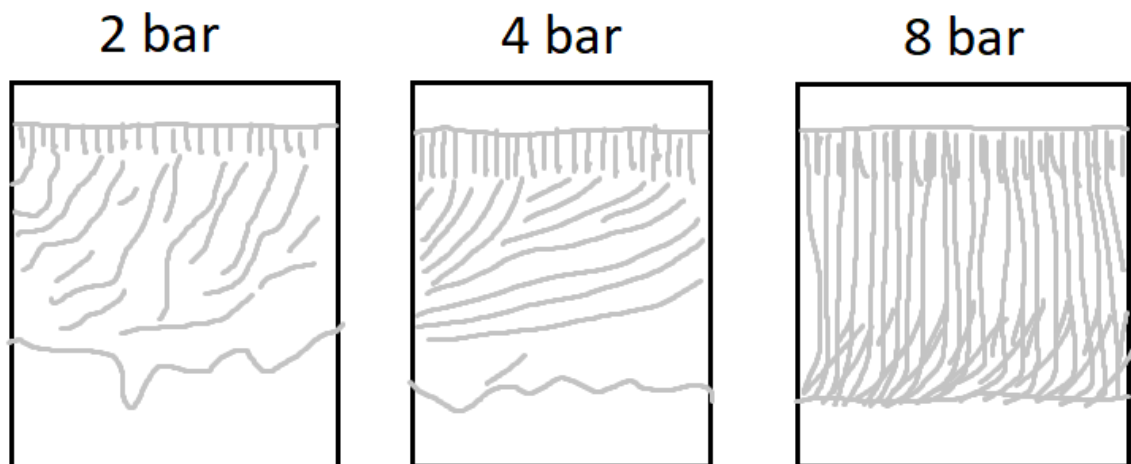
Kuvasta 11 nähdään, että kyseisessä tilanteessa optimaalinen suuttimen koko on 2–2,5 mm. Erityisen merkittävä ero on 10bar paineella, kun taas 5 bar:lla ei ole juuri eroa, käyttääkö 2 vai 3 millistä suutinta.

Apukaasun vaikutuksesta leikkausjälkeen alumiini-kupari seoksilla on tehty tutkimusta. Siinä tutkittiin Argonin, typen, hapen ja ilman (77–80 % typpeä ja 20–23 % happea) vaikutusta leikkauksen jälkeen. Näistä argonilla saatiin paras leikkaustulos, kun käytettävä laser oli teholta 3,5kW. Leikattava materiaali oli 2024-T3 3 mm vahvuinen. Suuttimena käytettiin ”De Laval” tyylistä (vastaa kuvassa 6 olevaa d-suutinta) jonka suuaukon halkaisija on 2 mm. Apukaasun paine oli 8 bar.



Kuva 12. Apukaasujen vaikutus pinnanlaatuun (mukailen Riveiro, Quintero, et al 2010)

Kuvasta 12 nähdään, että oli käytetty teho mikä tahansa väliltä 1–3 kW, niin argonilla saavutetaan paras laatu. Apukaasun käytössä tulee kuitenkin ottaa huomioon myös sen hinta, onko esim. kalliimman kaasun käyttö kannattavaa tai välttämätöntä kulloisessakin sovellutuksessa.

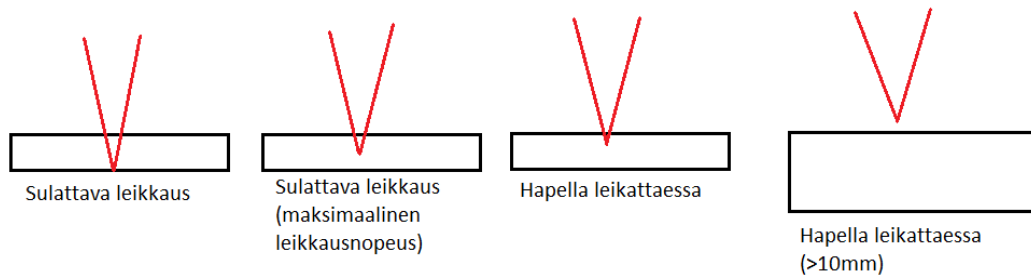


Kuva 13. Havainnollistava kuva pinnanlaadusta eri apukaasun paineilla, kun laserin teho on 2,5 kW, leikkausnopeus 4000 mm/min ja suuttimen halkaisija 2 mm (mukailen Riveiro, Quintero et al 2019).

Aikaisemmin mainitsin, että leikkauskaasun paineen lisäys heikentää pinnanlaatua, mutta kuvasta 11 nähdään, että paineen nosto nostaa suunnilleen samassa suhteessa leikkausnopeutta. Eräissä kokeissa (kuva 13) oli tutkittu apukaasun paineen vaikutusta pinnanlaatuun, kun leikkausnopeus on korkeahko 4000 mm/min. Laserin tehona käytettiin 2,5 kW, polttoväli 127 mm, suuttimen etäisyys leikattavasta pinnasta 1,5 mm ja suuttimen halkaisija 2 mm. Apukaasuna argon. Paineella 2 bar pinnanlaatu $R_a = 30 \mu\text{m}$, 4 bar paineella $R_a = 20 \mu\text{m}$ ja 8 bar paineella $R_a = 10 \mu\text{m}$ (Riveiro, Quintero et al 2019). Kun pinnanlaatua 8 bar:lla verrataan kuvaan 12, niin huomataan, että siinä on aika suuri ero optimaaliseen pinnanlaatuun, joka tuolla 2,5 kW teholla olisi n. 2–3 μm . Syy, miksi kuitenkin tuossa esimerkissä apukaasun paineen nosto paransi pinnanlaatua, on se, että paine ei myöskään saa olla liian pieni. Tuossa kokeessa alle 8 bar paine ei saanut riittävän hyvin puhallettua sulaa pois leikkausurasta, jolloin jälki jäi huonoksi ja partaa syntyi. Vaadittava laatu riippuu tosin hyvin paljon sovellutuskohteesta. Laatu ei juurikaan parannu nostamalla lisää painetta (Riveiro, Quintero et al 2019), joten mikäli halutaan parempaa jälkeä, tulee se tehdä laskemalla leikkausnopeutta ja optimoimalla siihen sopiva paine.

2.4 Polttopisteen ja sen sijainnin vaikutus

Polttopisteen sijainnin määrittelyyn vaikuttaa se, millaista materiaalia leikataan ja tapahtuuko leikkaus polttamalla vai sulamalla. Polttopiste yleensä halutaan joko yläpintaan, alapintaan tai keskelle. Alumiinin (sekä rosterin ja titaanin mm.) leikkauksessa leikkaus on sulattavaa, jolloin lähtökohtaisesti halutaan polttopiste leikattavan kappaleen alapintaan, tällöin ”parran” syntyminen levyn alapintaan on vähäisintä. Mikäli taas halutaan maksimoida leikkausnopeus, niin polttopisteen tulisi silloin olla puolessa välissä levyä. Hapella leikatessa rakenneterästä, polttopiste on puolen välin yläpuolella, ja kun mennään levyn paksuudessa yli 10 mm niin polttopiste ei ole enää edes levyssä, vaan sen yläpuolella joitakin millimetrejä (Kujanpää ym. 2005 s.137



Kuva 14. Polttopisteen sijainti eri tilanteissa

Jo aiemmin käsittelin polttopisteen pinta-alan eroja CO₂ vs. Kuitulaser. Polttopisteen koko vaikuttaa intensiteettiin ja sitä kautta leikkausnopeuteen. Polttopisteen halkaisija on suoraan verrannollinen fokusoivan linssin polttoväliin (kohdistava linssi kuvassa 1. = fokusoiva linssi). Leikkauksen jälkeen vaikuttaa myös syvyysterävyys, se on taas suoraan verrannollinen polttovälin toiseen potenssiin. Syvyysterävyys vaikuttaa polttopisteen toleranssiin optisella akselilla, eli paljonko polttopiste heittää levyn paksuussuunnassa. Ohuilla materiaaleilla paras pinnanlaatu saavutetaankin, kun sekä polttopiste, polttoväli, että syvyysterävyys on mahdollisimman pienet/lyhyet. Polttopisteeltä halutaan mahdollisimman korkeaa intensiteettiä, ja sen edellytyksenä on mahdollisimman pieni polttopisteen pinta-ala, sillä polttopisteen koko on kääntäen verrannollinen tehotiheyteen, eli intensiteettiin. Esimerkiksi jos halkaisija polttopisteessä tuplataan, niin intensiteetti putoaa neljäsosalla alkuperäisestä. Lyhyt polttovälikään ei ole ratkaisu kaikkeen. Sen haittapuolina on se, että kohdistava linssi on lähellä leikattavaa pintaa ja näin ollen siihen voi tulla roiskeita. Toinen huono puoli on se, että lyhyellä polttovälillä syvyysterävyys ei riitä paksummille materiaaleille (Kujanpää ym. 2005 s. 140).

Mikäli konepajassa leikataan monen sortista levyä, siten että on tarvetta erilaisille polttoväleille, niin tähän on ratkaisuna se, että on useampi polttopää, jossa on erilainen kohdistuslinssi. Tämä on siitä syystä hyvä ratkaisu, että polttopään vaihtaminen on todella nopea operaatio (n. 1 min) ja tällöin ei tarvitse alkaa vaihtamaan linssiä polttopään sisään, jolloin se altistuisi huonepölylle ja sormenjäljille.

2.5 Alumiineista

Työssäni mainitsen alumiineista esim. 2024-T3. Tämä on kuitenkin vain yksi seos, alumiinien seostus onkin luokiteltu ensimmäisen numeron perusteella. Ensimmäinen numero on joko 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 tai 8 (The Aluminum Association 2021). Toinen numero kertoo siitä, onko kyseessä alkuperäinen seos, vai jokin uudempi muunnos. Kaksi viimeistä numeroa ovat tarkentavia, eli yksilöivät eri seostukset (ESAB 2021c)

1xxx- sarja on vähintään 99% puhdasta alumiinia. Sen etuna on korroosionkesto ja työstettävyys (ei laserilla). Muita ominaisuuksia on hyvä lämmön- ja sähkönjohtavuus. Tästä syystä se on vaikea laserleikattava. Sähköteollisuudessa eräs käytetty seos on 1350. Elintarviketeollisuudessa esimerkiksi kertakäyttövuorat voivat olla 1100 seosta.

2xxx- sarjan alumiinit on kuparilla seostettuja. Tätä seosta voidaan lämpökäsitellä, ja se voikin tuoda lujuutta lisää. Näille seoksille ominaispiirteenä onkin korkea lujuus ja kovuus. Heikkoutena on korroosionkesto ilmassa, minkä takia niitä pitää pinnoittaa tai maalata. 2024 on ilmailuteollisuudessa todella laajasti käytetty seos.

3xxx- sarjan alumiinit ovat mangaanilla seostettuja. Tätä seosta ei voida lämpökäsitellä. 3003 onkin hyvin yleiskäyttöinen seos, sen työstettävyuden ja keskinkertaisen lujuuden ansiosta. Alumiinitölkeissä käytettävä seos on taas 3004 ja sen eri modifikaatiot.

4xxx- sarjan alumiinit on seostettu piillä. Aivan kuten 3xxx sarja, tämäkään ei ole lämpökäsiteltävissä. Pii alentaa sulamispistettä, lisäämättä kuitenkaan haurautta. Näiden ominaisuuksien ansiosta näitä seoksia käytetäänkin 6xxx sarjan alumiinien hitsaukseen. 4043 on esimerkiksi hyvin laajalti käytetty seos tähän tarkoitukseen.

5xxx- sarjan alumiinit eivät myöskään ole lämpökäsiteltävissä. Tässä seoksessa magnesium on seosaineena. Tämän sarjan alumiinit ovatkin kaikkein laajimmin käytettyjä. Syy tälle on kyseisten seosten keskinkertaisesta hyvään oleva lujuus, helppo hitsattavuus sekä korroosionkesto (vedessä). Esimerkkiseoksia eri käyttökohteisiin: ”5052 elektroniikkateollisuudessa, 5083 erinäisissä sovellutuksissa vedessä, anodisoitu

5005 arkkitehtuurisissa sovellutuksissa ja 5182 alumiinisten juomatölkkiä kansina” (suora lainaus The Aluminium Association).

6xxx- sarjan alumiineissa seosteena on käytetty piitä ja magnesiumia. Tämän sarjan seokset ovat lämpökäsiteltävissä. Näille seoksille ominaista on hyvä hitsattavuus, kohtalaisen kova lujuus sekä erinomainen korroosionkesto. Tämän seossarjan tuotteet ovat ekstruusiomenetelmällä valmistettuja yleisimpiä. Sovelluskohteita ovat erinäiset kehikko- ja karmirakenteet.

7xxx- sarjan alumiinit ovat seostettu sinkillä ja niitä voidaan lämpökäsitellä, mikäli magnesiumia on myös lisättyä pienissä määrin. Kyseisen sarjan alumiineja voidaan seostaa myös muilla aineilla, mutta määrät ovat vähäisiä. Muita seosaineita on kromi ja kupari. Yleisimmin käytetyt seokset erityisesti ilmailuteollisuudessa on 7050 ja 7075 (The Aluminium Association 2021).

Aluksi mainitsin esimerkkinä alumiinin 2024-T3. Tässä T3 ilmaisee sen, että kyseinen seos on lämpökäsitelty. T:n tilalla voi olla myös F, O, H tai W. Nämä ovat alumiinille suoritettavia mahdollisia käsittelyjä. T:n perässä oleva numero kertoo lämpökäsittelystä tarkemmin, T:n alaluokkia on 1-10 (ESAB 2021c). Alumiinien leikkauksen helppous/vaikeus riippuu hyvin paljon pinnanlaadusta. Mikäli pinta on todella heijastavaa, on sen leikkaaminen myös hyvin vaikeaa. 1xxx- sarjan puhdas alumiini on esimerkki hyvin vaikeasti leikattavasta seoksesta, sen heijastavuuden ja lämmönjohtavuuden takia.

3 MENETELMÄVERTAILU JA YHTEENVETO

3.1 Kuitu vai CO2

Kun vertaillaan kuitua ja hiilidioksidilaseria, ovat tilanteet aina yksilökohtaisia. Jos historiikkiosiota katsotaan eri tyylisten lasereiden myyntiosuuksia, niin hyvin selvää on se, että kuitu tulee aikanaan lähes kokonaan syrjäyttämään hiilidioksidilaserin. Tämä tosin vain siinä tapauksessa, että mitään erityistä mullistusta ei leikkaustekniikan puolelta tule, tai mitään materiaalia, jonka leikkauksessa CO₂-laserin aallonpituus olisi absorptioon kannalta paras.

Kuitu on etenkin pitkällä tähtäimellä parempi, siitä syystä, että siinä ei ole yhtä paljon huollettavaa kuin hiilidioksidilaserissa. Kuidun säteen laatu on myös parempi, millä on positiivinen vaikutus leikkaustulokseen. Kuidun suurempi intensiteetti taas takaa sen, että voidaan leikata samaa materiaalia pienemmällä teholla, kuin CO₂-laserilla. Näin ollen, mikäli suunnitellaan suurempaa investointia, niin todennäköisesti hyvin suuressa osassa tapauksia kallistutaan kuitulaserin puoleen.

Vaikka hiilidioksidilaserit ovatkin vanhaa tekniikkaa, niin ne ovat kuitenkin täysin käyttökelpoisia laitteita. Etuna CO₂-laserilla on se, että kuitujen yleistyessä käytettyjen koneiden markkinat todennäköisesti kasvavat, ja näin ollen kertakustannukset pysyvät selvästi alempana kuin kuidulla.

Laserlähde	ByLaser 4400						
Teho	4 400 W						
Säätöalue	150–4 400 W						
Laserlähteen pituus	2 840 mm						
Laserlähteen leveys	920 mm						
Laserlähteen korkeus	1 580 mm						
Paino	1 600 kg						
Teknologia	CO ₂						
Teräs (leikattavissa oleva maks. levynpaksuus) **	25 mm						
Jaloteräs (leikattavissa oleva maks. levynpaksuus) **	20 mm						
Alumiini (leikattavissa oleva maks. levynpaksuus) **	12 mm						
Koko laitteiston sähkönkulutus BySprint Pro 3015 ***	51 kW						
Koko laitteiston sähkönkulutus BySprint Pro 4020 ***	53 kW						

Laserlähde	Fiber 3000	Fiber 4000	Fiber 6000	Fiber 8000	Fiber 10000	Fiber 12000	Fiber 15000***
Teho	3 000 W	4 000 W	6 000 W	8 000 W	10 000 W	12 000 W	15 000 W
Säätöalue	300–3 000 W	400–4 000 W	600–6 000 W	800–8 000 W	1 000–10 000 W	1 200–12 000 W	400–15 000 W
Aallonpituus	Fiber	Fiber	Fiber	Fiber	Fiber	Fiber	Fiber
Teräs (leikattavissa oleva maks. levynpaksuus) *	20 mm	20 mm	25 mm	25 mm	25 mm	25 mm	25 mm
Teräs (lisävarusteella BeamShaper) *	20 mm	25 mm	30 mm	30 mm	30 mm	30 mm	30 mm
Teräs (laajennetut sovellukset) *							50 mm
Jaloteräs (leikattavissa oleva maks. levynpaksuus) *	12 mm	15 mm	30 mm	30 mm	30 mm	30 mm	40 mm
Jaloteräs (laajennetut sovellukset) *							50 mm
Alumiini (leikattavissa oleva maks. levynpaksuus) *	12 mm	20 mm	30 mm	30 mm	30 mm	30 mm	40 mm
Alumiini (laajennetut sovellukset) *							50 mm
Messinki (maks. levynpaksuus) *	6 mm	8 mm	15 mm	15 mm	15 mm	15 mm	20 mm
Kupari (maks. levynpaksuus) *	6 mm	8 mm	12 mm	12 mm	12 mm	12 mm	20 mm
Koko laitteiston sähkönkulutus ByStar Fiber 3015 **	20 kW	21 kW	22 kW	24 kW	25 kW	27 kW	27 kW
Koko laitteiston sähkönkulutus ByStar Fiber 4020 **	20 kW	21 kW	22 kW	27 kW	28 kW	27 kW	27 kW
Koko laitteiston sähkönkulutus ByStar Fiber 6225 **	21 kW	22 kW	23 kW	26 kW	27 kW	27 kW	
Koko laitteiston sähkönkulutus ByStar Fiber 8025 **	21 kW	23 kW	23 kW	26 kW	27 kW	27 kW	

Kuva 15. Laserlähdevertailua (Kuva Bystronic 2021e,d)

Kuvaa 15 kun tutkii, niin on helppo huomata, miksi kuitu on saanut markkinoilla merkittävästi jalansijaa hiilidioksidilaserilta. 10 kW kuitulaser kuluttaa sähköä kaksi kertaa vähemmän, kuin 4,4kW hiilidioksidilaser, ja kun vielä verrataan paksuimpia mahdollisia ainepaksuuksia, niin siinäkin kuitu voittaa hiilidioksidilaserin.

Vaikka kuitulaserit ovatkin uudempaa teknologiaa, niin siitä huolimatta CO₂-laserin teräksen leikkausvahvuudet voidaan voittaa vasta tehokkaimmilla kuiduilla, ja niilläkin lisälaitteen ansiosta. Toinen hiilidioksidilaserilla oleva etu on tehonkäyttöalue, CO₂ pystytään säätämään välille 150–4400 W, kun taas lähimpänä sitä oleva kuitu on välillä 400–4000 W. Paksujen niukkahiilisten seostamattomien terästen leikkauksessa etu onkin vielä hiilidioksidilasereilla (Bystronic 2021b).

Koneiden vertailussa ei myöskään voi vain tuijottaa koneiden speksejä ja tehdä päätöksiä siltä pohjalta. Hyvänä esimerkkinä voidaan pitää esimerkiksi sitä, että kuidulla voidaan kasvattaa leikkausnopeutta, mutta jos työpisteen työmäärässä sitä ei ole huomioitu, niin etua ei välttämättä ole laisinkaan. Tässäkään asiassa ei ole olemassa yhtä oikeaa ratkaisua. Esimerkiksi jos koneen operaattori ei kykene purkamaan levyä riittävän nopeasti, niin leikkausnopeus menee hukkaan, sillä se aiheuttaa koneen seisomista toimimattomana.



Kuva 16. Bystronicin lisälaitteita, kuvassa BySprint Pro, jossa lisälaitteina ByTower ja ByTrans (Bystronicin luvalla)

Koneen tehokkuuteen vaikuttavat myöskin leikkurissa olevat mahdolliset lisälaitteet. Kuvassa 16 on esiteltyä kaksi. ByTower on levyjen säilytykseen käytettävä torni, ja ByTrans on levyjen siirtoon pöydälle käytettävä lisälaitte. On olemassa vielä ByTrans Cross, jossa sama kehikko, joka siirtää levyjä pöydälle, siirtää ne leikkauksen jälkeen myös erilliselle purkupöydälle. Tämä mahdollistaa useiden levyjen työstön, ilman että purkua tarvitsee suorittaa joka levyn jälkeen (Bystronic 2021c).

Lisälaitteiden huomioiminen vertailussa tulee ottaa huomioon siksi, että yrityksillä voi olla tilanne, jossa kuituun siirtyminen tapahtuisi korvaamalla vanhempi hiilidioksidilaser.

Tällöin tulee ottaa huomioon myös se, paljonko tuotanto tehostuisi pelkillä lisälaitteilla, mikäli niitä ei vielä ole, ilman että tarvitsisi todella kallista investointia tehdä.

3.2 Yhteenveto

Työssä perehdyttiin hiilidioksidilaserilla tapahtuvaan alumiinin leikkaukseen. Laserleikkausta käsitellessä on hyvä tuoda esille myös muita termisiä menetelmiä, ja niitä koskevat standardit. Työssäni kävin läpi laserleikkauksen toimintaa, polttoleikkausta sivuten. Termisistä menetelmistä jätettiin tietoisesti plasmaleikkauksen pois, sillä sen sovellutuskohteet, taikka toimintaperiaatteen läpikäynti ei toisi työlle lisäarvoa. Polttoleikkauksen läpikäynti oli oleellista siksi, että tietyissä tapauksissa yhtäläisyyksiä laserleikkauksen kanssa on jonkin verran.

Pääpaino kuitenkin on siinä, että tarkastelin hiilidioksidi- ja kuitulaserin ominaisuuksien eroja, jotka johtavat siihen, että lähtökohtaisesti toinen suoriutuu toista paremmin, ja on vallannut markkinoita toiselta. Erot näiden välillä ovatkin sellaisia, että hiilidioksidilaser tuskin pystyy valta-asemaansa markkinoilla palauttamaan, vaan ajan kuluessa tulee vain enenevässä määrin häviämään kuidulle.

Laserin optimointi eri materiaaleille taas toimi samalla tavalla niin hiilidioksidi- kuin kuitulaserillekin. Eri materiaaleille voidaan jonkinlaisia nyrkkisääntöjä ajatella, mutta ne ovat hyvin riippuvaisia toisistaan, joten koneen käyttäjän tulisikin ymmärtää eri parametrien vaikutus toisiinsa, sekä leikkuujälkeen.

Vaikka parametrien, sekä fyysisten osien optimoinnilla voidaan leikkuutulosta parantaa, niin alumiinin, ja muiden samoja ominaisuuksia omaavien materiaalien aiheuttamaa perimmäistä ongelmaa ei kuitenkaan voida poistaa.

Olkoonkin, että hiilidioksidilaser on vanhaa tekniikkaa ja energiankäytöltään tehottomampi, niin tulee kuitenkin muistaa, että on täysin tilanteesta riippuvaista se, kannattaako sitä kuitenkaan vielä vaihtaa uudempaan tekniikkaan. Vaikka kone lähtökohtaisesti ei olisi paras mahdollinen tiettyihin sovellutuksiin, niin jos sitä on käytetty huonoilla parametreilla ja väärillä osilla, niin leikkausjälkeä on mahdollista parantaa vielä pelkillä parametrimuutoksilla merkittävästi.

LÄHDELUETTELO

Bystronic kuvat, 2021 [verkkodokumentti] Saatavissa:
<https://bystronic.picturepark.com/WorldPort/Port/MediaCenter> [viitattu 1.3.2021]

Bystronic, 2021a [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.bystronic.com/com-en/products/laser-cutting-systems/Laser-cutting-systems-101.php> [viitattu: 18.2.2021]

Bystronic, 2021b [verkkodokumentti]. Saatavissa:
https://www.bystronicusa.com/en/news/technical-articles/130204_CO2-vs-Fiber-Laser.php [viitattu: 18.2.2021]

Bystronic, 2021c [verkkodokumentti]. Saatavissa:
<https://www.bystronic.fi/fi/tuotteet/automation/requirements-and-solutions.php> [viitattu: 18.2.2021]

Bystronic, 2021d [verkkodokumentti]. Saatavissa:
<https://btp.bystronic.com//api/collection/search/1bed4bd663e65f909d73ee85da33ed5d907e1a3a8f26062bc3e7167caff17de4/sp021/Bystronic/plain> [viitattu: 18.2.2021]

Bystronic, 2021e [verkkodokumentti]. Saatavissa:
<https://btp.bystronic.com//api/collection/search/1cd233f8542d16f3b88ab21b7eb49144119c67d165e590250fb8812176cb7c8c/sp021/Bystronic/plain> [viitattu: 18.2.2021]

CEKIC, H., BEGIC, E. and KULENOVIC, A., 2012. Optimization of Process Parameters of Alloyed Steels using Co2 Lasers. *Annals of DAAAM & Proceedings*, **23**(1), pp. 247.

Engineering and Technology History Wiki, 2010 [verkkodokumentti]. Saatavissa:
https://ethw.org/Milestones:First_Working_Laser,_1960 [viitattu: 18.2.2021]

ESAB, 2021a [verkkodokumentti]. Saatavissa:
<https://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/what-is-the-best-way-to-cut-steel-plate.cfm>
 [viitattu: 18.2.2021]

ESAB, 2021b [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.esabna.com/us/en/education/blog/how-does-laser-cutting-work.cfm> [viitattu: 18.2.2021]

ESAB, 2021c [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.esabna.com/us/en/education/blog/understanding-the-aluminum-alloy-designation-system.cfm> [viitattu: 18.2.2021]

Fiber Optic Network Products, 2018 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.fiberopticsshare.com/what-is-fiber-optic-cable.html> [viitattu: 18.2.2021]

HPC Laser Ltd, 2021 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://hpclaser.co.uk/how-does-a-laser-cutter-work/> [viitattu: 18.2.2021]

JANKOVIĆ, P., MADIĆ, M., RADOVANOVIĆ, M., PETKOVIĆ, D. and MLADENOVIĆ, S., 2019. Optimization of Surface Roughness from Different Aspects in High-Power CO₂ Laser Cutting of AA5754 Aluminum Alloy. *Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media B.V.)*, **44**(12), pp. 10245-10256.

Kjällberg, 2021 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.kjellberg.de/en/oxy-fuel-cutting.html> [viitattu: 18.2.2021]

L. Li, The advances and characteristics of high-power diode laser material processing, *Opt. Laser Eng.* 34(4), 231-253 (2000).

Landry J, 2020 Laserax [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.laserax.com/blog/fiber-laser> [viitattu: 18.2.2021]

LEONE, C., GENNA, S., CAGGIANO, A., TAGLIAFERRI, V. and MOLITIERNO, R., 2016. Influence of process parameters on kerf geometry and surface roughness in Nd:YAG laser cutting of Al 6061T6 alloy sheet. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **87**(9-12), pp. 2745-2762.

National Science&Technology Medals Foundation, 2021 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://nationalmedals.org/laureate/c-kumar-n-patel/> [viitattu: 18.2.2021]

Optech Consulting, 2021 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://optech-consulting.com/laser-market-data/> [viitattu: 18.2.2021]

PLP Pääkkönen, 2021 [verkkodokumentti]. Saatavissa <https://www.plp.fi/laserleikkaus/> [viitattu: 18.2.2021]

RIVEIRO, A., QUINTERO, F., BOUTINGUIZA, M., DEL VAL, J., COMESAÑA, R., LUSQUÍÑOS, F. and POU, J., 2019. Laser Cutting: A Review on the Influence of Assist Gas. *Materials (1996-1944)*, **12**(1), pp. 157.

RIVEIRO, A., QUINTERO, F., LUSQUÍÑOS, F., COMESAÑA, R. and POU, J., 2010. Influence of assist gas nature on the surfaces obtained by laser cutting of Al–Cu alloys. *Surface & Coatings Technology*, **205**(7), pp. 1878-1885.

SAKURAI, T., CHOSROWJAN, H., SOMEKAWA, T., FUJITA, M., MOTOYAMA, H., WATANABE, O. and IZAWA, Y., 2016. Studies of melting ice using CO2 laser for ice drilling. *Cold Regions Science & Technology*, **121**, pp. 11-15.

SFS-EN ISO 14175, 2008. Hitsausaineet. Kaasut ja kaasuseokset sulahitsaukseen ja lähiprosesseille. Metalliteollisuuden standardointiyhdistys SFS: 25s.

SFS-EN ISO 4063, 2011. Hitsaus ja sen lähiprosessit. Prosessien nimikkeet ja numerotunnukset. 2. painos. Metalliteollisuuden Standardointiyhdistys SFS: 27s

SFS-EN ISO 9013, 2017. Terminen leikkaus. Termisesti leikattujen pintojen luokittelu. Geometrinen tuotemäärittely ja laatutoleranssit. 3. painos. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys SFS: 67s

The Aluminium Association, 2021 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.aluminum.org/resources/industry-standards/aluminum-alloys-101> [viitattu: 18.2.2021]

TWI-Global, 2002 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/the-early-days-of-laser-cutting-august-2007> [viitattu: 18.2.2021]

Veli K, Salminen A, Vihinen J, 2005. Lasertyöstö.