

# Lasersko rezanje metala

---

**Skender, Siniša**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Istrian University of applied sciences / Istarsko veleučilište - Università Istriana di scienze applicate**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:212:174673>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-26**



image not found or type unknown

*Repository / Repozitorij:*

[Digital repository of Istrian University of applied sciences](#)



image not found or type unknown



**Istarsko veleučilište**  
Università Istriana  
di scienze applicate

**PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ POLITEHNIKE**

**ZAVRŠNI RAD**

**LASERSKO REZANJE METALA**

**SINIŠA SKENDER**

**PULA, 2019.**



Izjava o samostalnosti izrade završnog rada

Izjavljujem da sam završni rad na temu "LASERSKO REZANJE METALA" samostalno izradio uz pomoć mentora dr.sc. Davora Stanića, koristeći navedenu stručnu literaturu i znanje stečeno tijekom studiranja. Završni rad je pisan u duhu hrvatskog jezika.

U Puli, rujan 2019.

Siniša Skender

**Završni rad preddiplomskog stručnog studija Politehnike**

## **LASERSKO REZANJE METALA**

Student: Siniša Skender

Studijski program: Preddiplomski stručni studij Politehnike

Kolegij: Tehnologija i proizvodna tehnika 2

Mentor: pred.dr.sc. Davor Stanić

Pula, rujan 2019.

## SAŽETAK

U ovom radu je opisano kako se ulaganjem i primjenom novih tehnologija može optimizirati proizvodni proces, smanjujući pri tome vrijeme proizvodnje bržim i kvalitetnijim laserskim rezanjem. Rad je podijeljen u sedam dijelova. Prvi dio rada obuhvaća uvod u rad. Drugi dio rada bavi se opisom definicije lasera, povijesti razvoja lasera, građom lasera, zatim opisuje princip rada lasera te nas upoznaje s energetske razinama neophodnim za rad lasera. Treći dio obuhvaća podjelu lasera koji se koriste u industriji. U četvrtom dijelu opisuju se komponente stroja za lasersko rezanje. Peti dio rada bavi se laserskim rezanjem gdje se opisuju razne vrste rezanja kao i parametri potrebni za lasersko rezanje. Šesti dio obuhvaća praktični dio istraživanja gdje se rade usporedbe između dvije vrste lasera. Na osnovi istraživanja provedenog usporedbom dvaju lasera (fiber i CO<sub>2</sub>), u zaključku je utvrđeno da je ulaganje u fiber lasere isplativo zbog veće brzine rezanja i bolje kvalitete rezne površine, ali da će unatoč tome CO<sub>2</sub> laseri i ubuduće zadržati svoje mjesto u primjeni pri laserskom rezanju metala.

## SUMMARY

This graduate thesis describes how investing and applying new technologies can optimize the production process, while reducing production time with faster and better laser cutting. The work is divided into seven parts. First part of deals with introduction. The second part deals with the definition of the laser, the history of laser development, the construction of the laser, it describes the principle of laser operation and introduces us to the energy levels necessary for laser operation. The third part describes the division of lasers used in industry. The fourth part describes the machine components for laser cutting. The fifth part deals with laser cutting, which describes the different types of cutting as well as the parameters required for laser cutting. In conclusion, it was presented on the basis of the study conducted by comparing two lasers (fiber and CO<sub>2</sub>) that investing in fiber lasers is profitable because of the higher cutting speed and better quality of the cutting surface, but that in the future CO<sub>2</sub> lasers will have their place in the application of laser metal cutting.



SAŽETAK.....	I
SADRŽAJ.....	II
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS GRAFOVA.....	V
1. UVOD.....	11
1.1. Definicija problema.....	12
1.2. Cilj i svrha rada .....	12
1.3. Hipoteza .....	12
1.4. Metode rada.....	13
1.5. Struktura rada .....	13
2. DEFINICIJA LASERA .....	14
2.1. Povijest razvoja lasera .....	15
2.2. Građa lasera .....	17
2.2.1. Laserska pumpa.....	18
2.2.2. Laserski medij .....	18
2.2.3. Optički rezonator.....	19
2.3. Princip rada lasera .....	20
2.4. Energetske razine lasera (laser s tri i četiri energetske razine).....	24
2.5. Karakteristike laserske svjetlosti .....	25
3. PODJELA LASERA .....	26
3.1. Ugljični dioksid (CO <sub>2</sub> ) laser.....	27
3.2. Fiber laser .....	28
3.3. Nd: yag laser (yttrium aluminium garnet).....	30
4. KOMPONENTE STROJA ZA LASERSKO REZANJE.....	31



5. LASERSKO REZANJE .....	34
5.1. Rezanje isparavanjem .....	35
5.2. Nereaktivno rezanje uz pomoćni plin .....	35
5.3. Reaktivno rezanje uz pomoćni plin .....	36
5.4. Rezanje kontroliranim lomom .....	36
5.5. Parametri laserskog rezanja .....	36
5.5.1. Žarišna duljina leće .....	37
5.5.2. Način rada laserske zrake .....	37
5.5.3. Snaga i intezitet lasera .....	38
5.5.4. Valna duljina laserske zrake .....	38
5.5.5. Žarišni položaj u odnosu na radni komad .....	38
5.5.6. Veličina i visina mlaznice .....	39
5.5.7. Vrsta plina i tlak plina .....	39
5.5.8. Pulsni ili kontinuirani valni rad .....	40
6. EKSPERIMENTALNI DIO RADA .....	40
6.1. Oprema korištena za lasersko rezanje .....	40
6.2. Radni materijal .....	43
6.3. Plan rezanja uzoraka .....	45
6.4. Rezanje uzoraka laserom (usporedba kvalitete reza i vremena) .....	47
7. ZAKLJUČAK .....	65
LITERATURA .....	67
PRILOZI .....	69

## POPIS SLIKA

Slika 1. Pojednostavljena shema lasera .....	14
Slika 2. Prvi proizvedeni laser .....	16
Slika 3. Osnovni dijelovi lasera .....	18
Slika 4. Spektar elektromagnetskog zračenja .....	20
Slika 5. Bohr-ov model atoma i jednostavne energetske razine .....	22
Slika 6. ApSORPCIJA, spontana i stimulirana emisija.....	23
Slika 7. Pojačanje uz pomoć stimulirane emisije.....	23
Slika 8. Prikaz lasera s tri energetske razine.....	24
Slika 9. Prikaz lasera s četiri energetske razine .....	25
Slika 10. Shematski prikaz CO <sub>2</sub> lasera .....	28
Slika 11. Shematski prikaz fiber lasera.....	29
Slika 12. Shematski prikaz Nd: YAG lasera.....	31
Slika 13. Laserski generator za fiber laser .....	32
Slika 14. Prikaz rezne glave lasera .....	33
<i>Slika 15. CNC obradni centar s laserskom glavom .....</i>	<i>34</i>
Slika 16. Obradni centar “Platino Fiber” s automatskim punjačem limova .....	41
Slika 17. Obradni centar “Platino 1530 CP 3000” .....	41
Slika 18. Nacrt uzorka za rezanje .....	46
Slika 19. Područje najbolje primjene fiber i CO <sub>2</sub> lasera .....	63
Slika 20. Usporedba različite brzine rezanja fiber i CO <sub>2</sub> lasera.....	64

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz specifikacije obradnog centra “Platino 1530 CP 3000” .....	42
Tablica 2. Prikaza specifikacije obradnog centra “Platino Fiber” .....	42
Tablica 3. Kemijski sastav čelika DC 01 .....	44
Tablica 4. Kemijski sastav čelika DD 12.....	44
Tablica 5. Mehanička svojstva čelika DC 01.....	44

Tablica 6. Mehanička svojstva čelika DD 12 .....	45
Tablica 7. Prikaz reznih površina i parametara rezanja za čelik DC 01 debljine 1,0 mm .....	47
Tablica 8. Prikaz reznih površina i parametara rezanja za čelik DC 01 debljine 1,0 mm .....	48
Tablica 9. Prikaz reznih površina i parametara rezanja za čelik DC 01 debljine 1,5 mm .....	50
Tablica 10. Prikaz reznih površina i parametara rezanja za čelik DC 01 debljine 1,5 mm .....	52
Tablica 11. Prikaz reznih površina i parametara rezanja za čelik DD 12 debljine 2,0 mm .....	54
Tablica 12. Prikaz reznih površina i parametara rezanja za čelik DD 12 debljine 2,0 mm .....	55
Tablica 13. Prikaz reznih površina i parametara rezanja za čelik DD 12 debljine 3,0 mm .....	57
Tablica 14. Prikaz reznih površina i parametara rezanja za čelik DD 12 debljine 3,0 mm .....	58

## **POPIS GRAFOVA**

Graf 1. Prikaz vremena potrebnog za rezanje uzorka debljine 1,0 mm .....	60
Graf 2. Prikaz vremena potrebnog za rezanje uzorka debljine 1,5 mm .....	61
Graf 3. Prikaz vremena potrebnog za rezanje uzorka debljine 2,0 mm .....	61
Graf 4. Prikaz vremena potrebnog za rezanje uzorka debljine 3,0 mm .....	62

## **POPIS PRILOGA**

Prilog 1. Nacrt uzorka korištenog za lasersko rezanje .....	69
Prilog 2. Nesting korišten prilikom obrade uzoraka strojevima za lasersko rezanje .....	70

## 1. UVOD

Riječ LASER je skraćenica od engleskih riječi „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ što u prijevodu ima značenje pojačanje svjetla stimuliranom emisijom zračenja. Laser je svjetlosni oscilator tj. on generira koherentnu, monokromatsku i usmjerenu svjetlost što omogućuje ovakvoj svjetlosti fokusiranje na točku malog promjera.

Tema ovog rada je lasersko rezanje metala. Lasersko rezanje je vrsta poznate digitalne tehnike proizvodnje i spada u nekonvencionalne postupke obrade jer alat kojim se vrši obrada nije tvrđi od obradka i nema mehaničkih sila između alata i obradka. Spada u toplinski proces obrade materijala u kojem se materijal zagrijava i reže fokusiranom laserskom zrakom, u kombinaciji s inertnim, aktivnim plinom. Laserska zraka udara u površinu materijala i zagrijava ga da se počinje topiti, potpuno isparava te kada laserska zraka potpuno prodre u materijal započinje stvarni proces rezanja. Najveću razliku u odnosu na druge tehnologije čine veoma velika brzina obrade, visoka preciznost, prilagodljivost te automatsko upravljanje.

Ulaganje u nove tehnologije i primjena istih veoma je bitna za opstanak poduzeća na tržištu jer omogućava bržu proizvodnju i bolju kvalitetu proizvoda, a time i samu konkurentnost na tržištu. Jedan od nedostataka rezanja laserom su visoki investicijski troškovi, koji se mogu nadoknaditi bržom proizvodnjom i visokom kvalitetom radnog komada i visokom kvalitetom rezne površine što nam štedi sredstva koja bi morali uložiti u dodatnu obradu komada.

U radu je izvedeno istraživanje kojim se usporedilo karakteristike dviju vrsta lasera međusobno. Rezanjem raznih debljina uzoraka s različitim posmičnim brzinama promatrali smo kvalitetu dobivenih reznih površina kao i vrijeme potrebno za rezanje uzorka. Na taj način došli smo do spoznaje da ulaganje u nove tehnologije može ubrzati proizvodni proces i povećati kvalitetu rezne površine što smanjuje dodatne troškove u proizvodnji.

## **1.1. Definicija problema**

Suvremeno tržište diktira uvjete poslovanja poduzeća koje se nalazi na tržištu. Cilj je svakog poslovanja smanjenje troškova proizvodnje, zadržavanje i povećanje obima posla kroz kvalitetu proizvoda koja će nam to omogućiti, kao i povećanje profita. To možemo postići ako idemo u korak sa novim tehnologijama, znanjima, strojevima i alatima te ako u iste investiramo. Laserska tehnologija se nalazi na prekretnici. Postavlja se pitanje da li će industrija prepoznati prednosti fiber lasera ili će CO<sub>2</sub> laseri biti zastupljeni u većem broju kao i do sada? Problem analiziran u ovom diplomskom radu su prednosti u brzini rezanja i kvaliteti reza fiber lasera naspram CO<sub>2</sub> lasera.

## **1.2. Cilj i svrha rada**

Cilj ovoga rada je na realnom primjeru dokazati da je potrebna implementacija nove tehnologije u smislu novih fiber lasera koji nose određena poboljšanja u proizvodnju te na taj način uvelike utječu na poslovanje poduzeća. Cilj rada je i na temelju analiziranih primjera zaključiti da li upotreba fiber lasera naspram CO<sub>2</sub> lasera donosi benefite koji mogu utjecati na stvaranje povećane poslovne uspješnosti poduzeća.

## **1.3. Hipoteza**

Hipoteza ovog istraživanja je da sve veća upotreba fiber lasera u industriji sa sve većom izlaznom snagom, daje bolje rezultate reznih površina koje nije potrebno dodatno obrađivati, kao i brže vrijeme rezanja u usporedbi sa CO<sub>2</sub> laserima koji su unazad par godina bili dominantni u korištenju u industriji.

## **1.4. Metode rada**

Prilikom izrade diplomskog rada korištena je metoda klasificiranja podataka koji su prikupljeni iz izvora poput knjiga, interneta, stručnih i znanstvenih časopisa i članaka.

Grafičkom metodom prikazala se usporedba vremena između fiber i CO<sub>2</sub> lasera potrebna da se izreže jedan uzorak.

Komparativnom metodom usporedili smo brzine rezanja i kvalitetu reza između fiber i CO<sub>2</sub> lasera.

Deskriptivnom metodom opisali smo činjenice kao i dosadašnja teorijska znanja o laserskoj tehnologiji, koje smo nadogradili na podatke prikupljene i raspoređene metodom klasifikacije.

Analiza i sintezu smo koristili kako bi došlo do shvaćanja međusobno povezanih djelova zbog složenosti teme.

Do zaključaka i završnih spoznaja došli smo uz pomoć induktivno-deduktivne metode.

## **1.5. Struktura rada**

Diplomski rad sastoji se od sedam (7) djelova.

U prvom dijelu, Uvodu, obuhvaćeni su definicija problema, cilj i svrha rada, hipoteza i metode koje su korištene u diplomskom radu te struktura rada.

Drugi dio rada bavi se opisom definicije lasera, povijesti razvoja lasera, građom lasera zatim opisuje princip rada lasera te nas upoznaje s energetske razinama neophodnima za rad lasera.

Treći dio obuhvaća podjelu lasera koji se koriste u industriji.

U četvrtom dijelu opisuju se komponente stroja za lasersko rezanje.

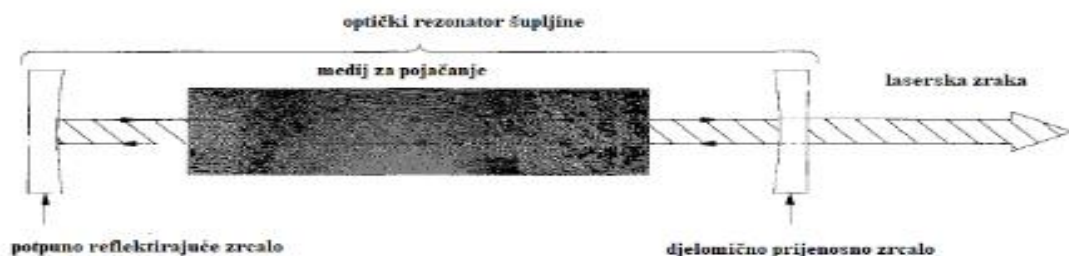
Peti dio rada bavi se laserskim rezanjem gdje se opisuju razne vrste rezanja kao i parametri potrebni za lasersko rezanje.

Šesti dio obuhvaća praktični dio istraživanja gdje se uspoređuju dvije vrste lasera.

Sedmi dio rada predstavlja zaključak kao sintezu cjelokupnog istraživanja.

## 2. DEFINICIJA LASERA

Riječ laser je akronim za pojačanje svjetla stimuliranim emisijskim zračenjem. Laser se koristi procesima koji povećavaju svjetlosne signale nakon što se ti signali generiraju na druge načine. Laser je svjetlosni oscilator tj. on generira koherentnu, monokromatsku i usmjerenu svjetlost što omogućuje ovakvoj svjetlosti fokusiranje na točku malog promjera. Procesi koji to uključuju jesu stimulirana emisija, prirodni efekt koji je izveden razmatranjem povezanim za termodinamičkom ravnotežom i optičkom povratnom spregom prisutnom u većini lasera koja se obično odvija pomoću zrcala. Najjednostavniji laser sastoji se od medija za pojačanje i skupa zrcala koji vraćaju svjetlost u pojačalo za kontinuirani rast razvojne zrake što vidimo na slici br.1.



Slika 1. Pojednostavljena shema lasera<sup>1</sup>

<sup>1</sup> William T. Silfvast, *Laser Fundamentals*

Princip jednostavnosti lasera može se ilustrirati na primjeru goruće svijeće. Svijeća koja gori zrači svjetlosti u svim smjerovima i stoga osvjetljava različite predmete jednako ako su na istoj udaljenosti od svijeće. Ako svjetlost koja zrači u različitim smjerovima usmjerimo u jednu zraku promjera zjenice oka, i ako stojimo na udaljenosti od jednog metra od svijeće onda će intenzitet biti 1.000.000 puta veći od svjetla koje vidimo da uobičajeno svjetli od svijeće. Laser na takav način uzima svjetlost koja bi bila emitirana u svim smjerovima te je koncentrira i usmjerava u jedan smjer.

## 2.1. Povijest razvoja lasera

Začetak teorije na kojoj počiva razvoj lasera seže u 1900. godinu kada je Max Planck došao do spoznaje da postoji odnos između energije i frekvencije zračenja. Bio je prvi koji je pretpostavio da se energija može apsorbirati ili emitirati u kvantima što je inspiriralo Alberta Einsteina koji je na njegovoj teoriji bazirao te kasnije objavio rad o fotoelektričnom efektu. Njegova tvrdnja bila je da svjetlost daje energiju u kvantima tj. česticama koje nazivamo fotoni. Zahvaljujući njihovom radu postavljeni su temelji za razvoj lasera.

Početak razvoja lasera možemo zahvaliti Charlesu Townesu koji je iskoristio proces stimulirane emisije kako bi napravio mikrovalno pojačalo i nazvao ga maser. Maser je uređaj koji je proizveo koherentnu zraku mikrovala te je služio za komunikaciju. Prvi model masera napravljen je od para amonijaka s inverzijom između dvije razine energije koje su proizvele produljenje valne duljine za 1,25 cm.<sup>2</sup>

Mikrovalovi koje je maser proizvodio bili su usporedivi s dimenzijom masera koji ih je proizvodio te je ekstrapolacija na optiku davala svjetlosne valove koji su bili pet puta manje veličine stoga se daljnji rad nije nastavio. Townes je nastavio sa istraživanjem na ovom području te je sa kolegom Schawlowom razvio koncept optičkog pojačivača pomoću rezonantne šupljine

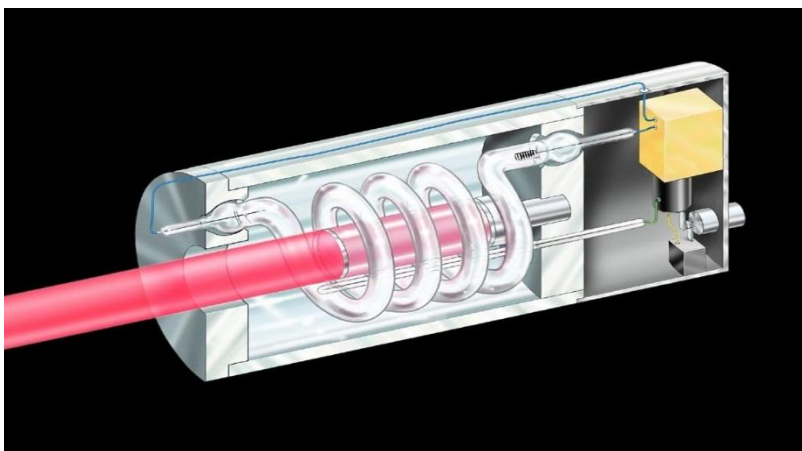
---

<sup>2</sup> Silfast, W.: **Laser fundamentals**, Cambridge University Press, Cambridge, 2004. Str.32



optičkog zrcala. Taj je koncept omogućio rast snopa svjetlosti. Da je ovo otkriće veoma važno govori činjenica da su obojica znanstvenika dobila Nobelovu nagradu za rad na ovom području znanosti.<sup>3</sup>

Prvi laser proizveden je 1960.godine te je imao kristal rubina kao povećalo i lampu kao izvor energije. Štapićasti kristal rubina bio je okružen spiralnom lampom dok je optička šupljina formirana posebnim krajevima rubinske šipke kao što je prikazano na slici broj 2. Taj je laser emitirao svjetlost valne duljine 694,0 nm.



*Slika 2. Prvi proizvedeni laser<sup>4</sup>*

Samo godinu nakon konstrukcije prvog lasera konstruiran je prvi plinski laser u laboratoriju Bell. Taj je laser koristio mješavinu helija i neona. U istom laboratoriju predstavljen je i neodimij laser koji se sastoji od tri štapića itrij-aluminijevog granita (YAG), dopiranog atomima neodimija ( $Nd:Y_3Al_5O_{12}$ ) dok su aktivni medij lasera trostruko ionizirani ioni neodimija ( $Nd^{+3}$ ). Taj je laser postao jedan od najpouzdanijih lasera koji su dostupni.

Nedugo nakon u General Electric Research laboratoriju predstavljen je prvi poluvodički laser koji predstavlja malen kristal podjeljen u dva osnovna područja, s različitim električnim svojstvima. Taj laser radi na principu diode pa se zbog toga još naziva i diodni laser.

<sup>3</sup>Silfast, W.: **Laser fundamentals**, Cambridge University Press, Cambridge, 2004. Str.32

<sup>4</sup><<http://www.laserfest.org/lasers/how/ruby.cfm>>, (16.7.2019.)>

1963. godine otkriven je infracrveni CO<sub>2</sub> laser koji je i danas jedan od najučinkovitijih i najjačih lasera u upotrebi.

1966. godine došlo je do otkrića koje je dovelo do nastanka optičkih vlakana. Izračunato je kako prebaciti svjetlost na velike duljine preko optičkih staklenih vlakana. Do tada su se svjetlosni signali mogli prebacivati samo oko 20,0 metara dok je otkriće staklenih vlakana omogućilo udaljenosti preko stotinu kilometara.

Još jedno od značajnih otkrića vezanih za lasere je laserski kvantum izvor, koji zahtijeva puno manje struje od konvencijalnih diodnih lasera, a izrazito je učinkovit.

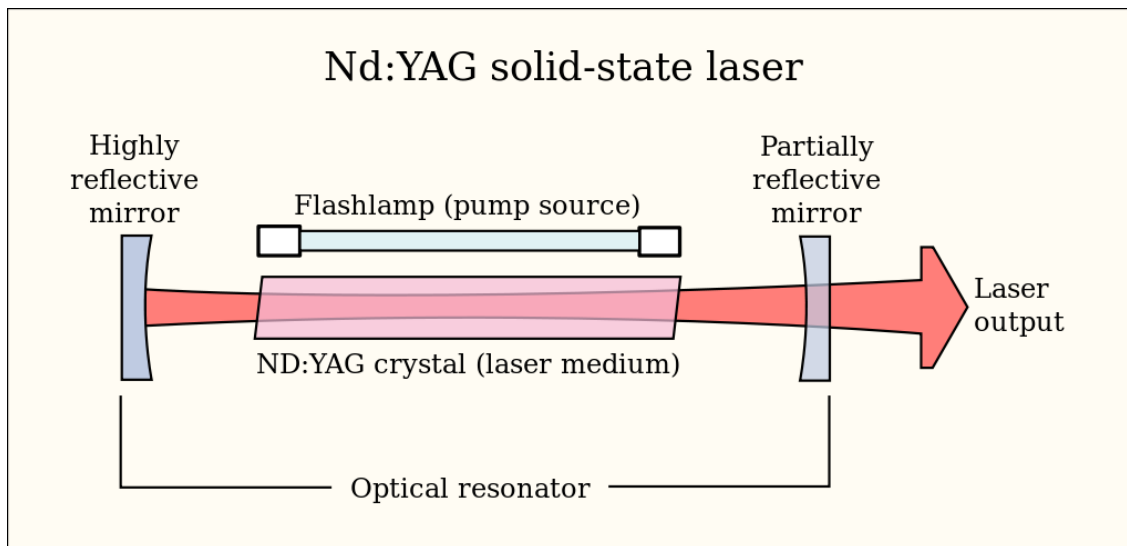
Laseri kao tehnologija razvijaju se do danas i to u različite svrhe te nalaze primjenu u mnogim djelatnostima kao što su medicina, telekomunikacije, meteorologija, astronomija, građevinarstvo, vojna industrija te druge grane industrije.

## **2.2. Građa lasera**

Laser se sastoji od tri glavna dijela:

1. Laserske pumpe ili energije za pobuđivanje medija
2. Laserskog medija ili laserskog materijala i
3. Optičkog rezonatora

Osnovni dijelovi lasera prikazani su na slici br.3.



*Slika 3. Osnovni dijelovi lasera<sup>5</sup>*

### 2.2.1. Laserska pumpa

Laserska pumpa je dio koji omogućava rad lasera opskrbljujući ga energijom potrebnom za rad. Kao laserska pumpa mogu nam poslužiti razni izvori energije kao što su bljeskalica, elektrolučna svjetiljka, električno pražnjenje naboja, kemijska reakcija pa čak i eksplozivno sredstvo. Kao primjer može nam poslužiti Helij-Neon laser koji kao lasersku pumpu ili izvor energije za pobuđivanje medija koristiti električno pražnjenje naboja u mješavini plina helija i neona dok Nd:YAG laser koristi fokusirano svjetlo ili lasersku diodu te ksenon bljeskalicu.<sup>6</sup>

### 2.2.2. Laserski medij

Laserski medij predstavlja glavni faktor koji određuje na kojoj će valnoj dužini raditi laser. Aktivni medij je vrsta molekula ili atoma čiji atomi sudjeluju u procesu nastanka laserskog djelovanja. On može imati linijski spektar ili šire područje spektra. Mediji sa širim područjem

<sup>5</sup> <[https://hr.wikipedia.org/wiki/Gra%C4%91a\\_lasera](https://hr.wikipedia.org/wiki/Gra%C4%91a_lasera)>, (17.07.2019.).

<sup>6</sup> <[https://hr.wikipedia.org/wiki/Gra%C4%91a\\_lasera](https://hr.wikipedia.org/wiki/Gra%C4%91a_lasera)>, (17.07.2019.).

omogućuje podešavanje frekvencije spektra, a samim time i valne duljine. Laserski medij pobuđuje se uz pomoć laserske pumpe te on započinje sa spontanom i stimuliranom emisijom fotona koja dovodi do optičkog povećanja.

Vrsta lasera zavisi o aktivnoj sredini koja može biti:

- **U čvrstom stanju** – tu spadaju stakla ili kristali kojima se dodaju primjese nečistoća poput kroma, erbija, titanija ili neodimija. U lasere sa čvrstom jezgrom možemo ubrojiti Nd:YAG, Ti:safir, rubin (Cr:safir), Nd:staklo i Er:staklo.
- **Tekućina** – laseri sa bojilima. U organska kemijska otapala (metanol, etanol ili etilen glikol) dodaju se kemijske boje i sa točnim kemijskim udio bojila određuje se radna valna dužina kao i frekvencija lasera.
- **Plinovi** – aktivni medij čine plinovi poput argona, smjese helij - neona, kripton ili ugljični dioksid.

### 2.2.3. Optički rezonator

Optički rezonator sačinjavaju dva paralelna ogledala pozicionirana oko aktivnog laserskog medija koji omogućuje povratnu vezu svjetla. Ogledala su tretirana optičkim premazom na način da je jedno ogledalo zapravo reflektor sa veoma visokim stupnjem refleksije, dok je drugo ogledalo reflektor sa djelomičnim stupnjem refleksije te se još naziva izlaznim reflektorom zato što dopušta da jedan dio svjetla napusti optički rezonator i stvori izlaznu zraku lasera. Reflektiranje na ogledala te prolazak zrake kroz aktivni medij može se ponoviti mnogo puta prije nego svjetlost u obliku zrake napusti rezonator. U optički rezonator mogu se ugraditi ostali optički uređaji (modulatori, filteri, apsorberi, rotirajuća ogledala) da različito djeluju na izlaznu zraku mjenjajući joj radnu valnu dužinu ili stvarajući impuls lasersko izlaznog svjetla. Konstruiranje te poravnanje ogledala s obzirom na aktivni medij je najbitnije za određivanje točne radne valne duljine.<sup>7</sup>

---

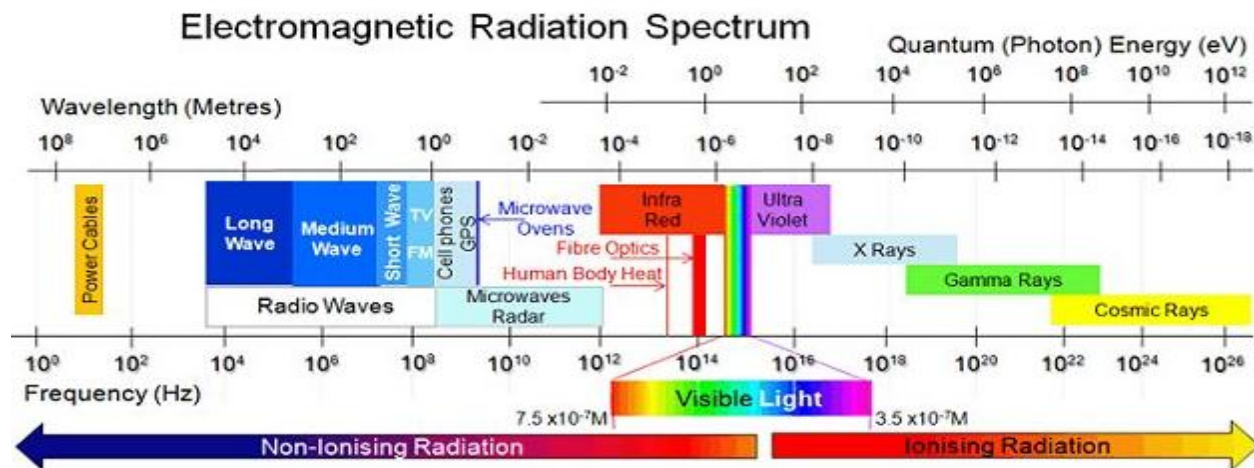
<sup>7</sup> <[https://hr.wikipedia.org/wiki/Gra%C4%91a\\_lasera](https://hr.wikipedia.org/wiki/Gra%C4%91a_lasera)>, (17.07.2019.).

## 2.3. Princip rada lasera

### 2.3.1. Svjetlost

Svjetlost je vidljivo elektromagnetsko zračenje u rasponu valnih duljina od 380 do 780 nm, koje ljudsko oko razlikuje kao boje, od ljubičaste sa najmanjom do crvene s najvećom valnom duljinom što možemo vidjeti na slici br. 4. Kao i ostalo elektromagnetsko zračenje, svjetlost se širi konačnom brzinom koja u vakuumu iznosi približno 300.000 km/h. Za svjetlost možemo reći da je roj čestica, fotona, koji se šire brzinom svjetlosti, a masa mirovanja jednaka im je nuli.

Svjetlost ima dualističku narav što je objašnjeno u kvantnoj teoriji prema kojoj svjetlost nastaje kvantnim prelazima elektrona iz jednog energetskog stanja u atomu u drugo. U atomu elektroni su raspoređeni po stanjima određene energije ( kvantna stanja) i dok se nalaze u tim stanjima, ne emitiraju energiju. Pri prijelazu elektrona u kvantno stanje niže energije, razlika u energiji emitira se kao kvant elektromagnetskog zračenja.<sup>8</sup>



Slika 4. Spektar elektromagnetskog zračenja<sup>9</sup>

<sup>8</sup> <<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=59121>>, (17.09.2019).

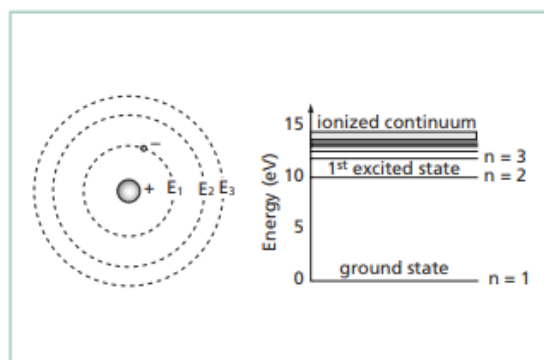
<sup>9</sup> <<https://www.racunalo.com/elektromagnetsko-zracenje-utjecaj-na-zdravlje-ljudi-i-regulativa-u-hrvatskoj/>>, (17.07.2019.).

### 2.3.2. Laserska svjetlost (zračenje)

Laser generira svjetlost određene snage i valne duljine. Te zrake svjetlosti su monokromatske i koherentne. Zraka koja je koherentna ima jednaku valnu duljinu, fazni pomak kao i amplitudu. Laser proizvodi svjetlost iste valne duljine što znači da je uvijek iste boje tj. monokromatska. Valna duljina laserskog svjetla je izrazito čista u usporedbi s drugim izvorima svjetla, a svi fotoni koji sačinjavaju lasersku zraku imaju fiksiranu faznu vezu (koherencija) u odnosu jedni na druge. Lasersko svjetlo ima veoma nisku divergenciju (rasipanje) što znači da može putovati na velike udaljenosti ili se može fokusirati na vrlo malom mjestu s osvjetljenjem koje premašuje svjetlinu Sunca.

### 2.3.3. Bohrov model atoma

Za razumijevanje načina na koji laser radi potrebno je poznavati građu atoma i molekula kao i osnove kvantne mehanike. Godine 1915. Niels Bohr predložio je model atoma koji je omogućio razjašnjavanje mnoštva fenomena. Taj jednostavan model postao je temelj za područje kvantne mehanike iako nije u potpunosti točan za današnjem poznavanju materije, ali je upotrebljiv za demonstraciju laserskih principa.<sup>10</sup>



<sup>10</sup> <<http://www.astro.caltech.edu/~lah/ay105/pdf/Laser-Guide.pdf>>, (18.07.2019.)

### *Slika 5. Bohr-ov model atoma i jednostavne energetske razine<sup>11</sup>*

U Bohrovom modelu, koji je prikazan na slici broj 5., elektroni kruže oko jezgre atoma i imaju ograničen broj orbita koje su dostupne elektronima. Kod pravih okolnosti elektron može prelaziti iz najniže energetske orbite ( na slici prikazano kao  $n=1$ ) do višeg stanja ( na slici prikazano kao  $n=2$ ) ili iz višeg u niže stanje, ali ne može ostati između tih stanja. Dopusćena energetska stanja nazivaju se kvantna stanja i povezana su sa kvantnim brojevima 1, 2, 3, itd.

Da bi se svjetlosna energija uzrokovala kretanje elektrona od nižeg energetskeg stanja ( $E_n$ ) ka višem energetskom stanju ( $E_m$ ), energija jednog fotona mora biti jednaka razlici energije između dva stanja. Ukoliko ima premalo ili previše energije, foton neće biti apsorbiran. Kada elektron prelazi u niže energetske razine, pri raspadu u radijacijskom prijelazu, foton svjetla kojeg daje atom mora imati istu energiju jednaku energetskeg razlici između ta dva stanja.

Ako je valna duljina svjetla duža, energija fotona je manja što nas dovodi do zaključka da ultraljubičasto svjetlo u usporedbi sa infracrvenim svjetlom “daje“ više energije.

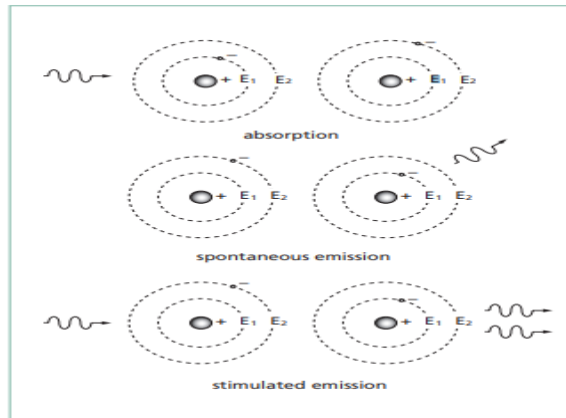
#### 2.3.4. Spontana i stimulirana emisija

Elektron u stanju pobuđene energije mora s vremenom propadati na nižu energetskeg razine dajući pritom foton zračenja. Taj se proces naziva spontana emisija, a foton je emitiran u nasumičnom smjeru i nasumičnoj fazi. Prosječno vrijeme potrebno za raspad elektrona naziva se vremenskom konstantom za spontanu emisiju. Ako je elektron u energetskom stanju  $E_2$  i njegov put propadanja je prema  $E_1$ , prije nego što se spontano raspadne, ako pokraj njega prođe foton koji ima približno energiju jednaku  $E_2 - E_1$  postoji veoma velika vjerovatnost da će taj isti foton uzrokovati raspad elektrona na takav način da se foton emitira u istom smjeru, iste valne duljine i s istom fazom kao i prolazni foton. Taj proces naziva se stimulirana emisija.<sup>12</sup> Spontana i stimulirana emisija kao i apsorpcija prikazani su na slici broj 6.

---

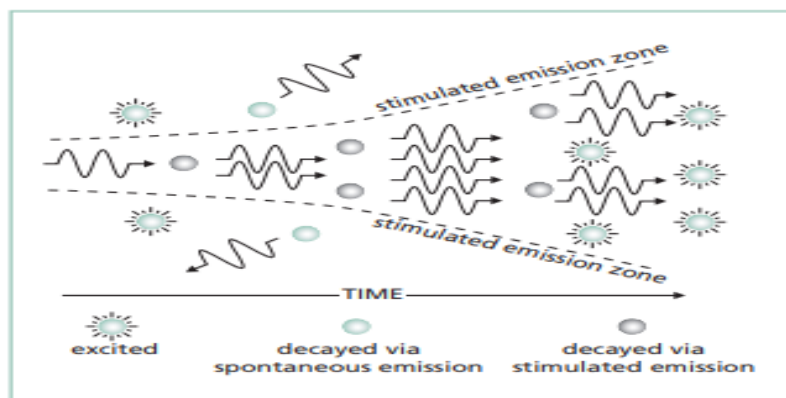
<sup>11</sup> <<http://www.astro.caltech.edu/~lah/ay105/pdf/Laser-Guide.pdf>>, (18.07.2019.).

<sup>12</sup> <<http://www.astro.caltech.edu/~lah/ay105/pdf/Laser-Guide.pdf>>, (18.08.2019.).



Slika 6. ApSORpcija, spontana i stimulirana emisija<sup>13</sup>

Ako promatramo skupinu atoma prikazanih na slici broj 7. koji se nalaze u potpuno istom uzbuđenom stanju, a većina je zapravo unutar stimulirajućeg dometa fotona koji prolazi, pretpostavka je da je vrijeme veoma dugo te da je vjerovatnost stimulacije 100,0 %. Foton koji dolazi stupa u interakciju sa prvim atomom i uzrokuje stimuliranu emisiju koherentnog fotona; tada ta dva fotona stupaju u interakciju sa sljedeća dva atoma i kao rezultat dobit ćemo četiri koherentna fotona te na kraju procesa dobit ćemo jedanaest koherentnih fotona s identičnom fazom i svi putuju u istom smjeru. Na kraju procesa početni foton pojačan je jedanaest puta. Energija potrebna za stavljanje atoma u uzbuđeno stanje osigurana je nekim izvorom energije koji se naziva “izvor pumpe”.



Slika 7. Pojačanje uz pomoć stimulirane emisije<sup>14</sup>

<sup>13</sup> < <http://www.astro.caltech.edu/~lah/ay105/pdf/Laser-Guide.pdf>>, (18.07.2019.).

<sup>14</sup> < <http://www.astro.caltech.edu/~lah/ay105/pdf/Laser-Guide.pdf>>, (18.07.2019.).



## 2.4. Energetske razine lasera (laser s tri i četiri energetske razine)

U početku većina atoma nalazi se u stanju  $E_1$  energije. Neki vanjski izvor pobuđuje ih sa  $E_1$  razine na višu energetska razinu  $E_3$ . Atomi ostaju na razini  $E_3$  u prosjeku  $10^{-8}$  s i potom prelaze na energetska razinu  $E_2$  koja je metastabilna i pri tome prijelazu otpušta se toplina. Mnogo atoma ostaje u metastabilnoj razini, jer joj životni vijek traje relativno dugo, približno  $10^{-3}$  s. Ako pobuda dovoljno snažno djeluje na atome nakon nekog vremena više od polovice atoma biti će u stanju  $E_2$  te je sa time postignuta inverzija naseljenosti između prve i druge energetske razine što omogućuje odvijanje laserskog djelovanja. Svjetlost nastaje pri prijelazu s energetske razine  $E_2$  na  $E_1$ . Nedostatak ovakvog sustava je taj što donja energetska razina ne ostaje prazna. Princip rada lasera s tri energetske razine prikazan je na slici br.8.

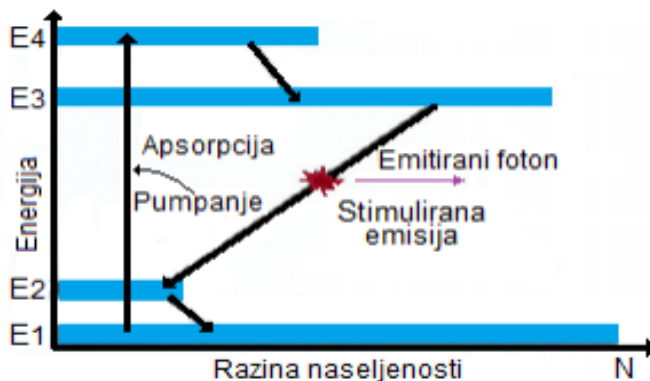


Slika 8. Prikaz lasera s tri energetske razine<sup>15</sup>

Ova vrsta lasera ima dodatnu energetska razinu  $E_2$  iznad osnovnog stanja  $E_1$ . Inverzija naseljenosti postiže se između razina  $E_3$  i  $E_2$ . Dodatna energetska razina  $E_2$  ima kratki vijek

<sup>15</sup> < <https://perg.phys.ksu.edu/vqm/laserweb/Ch-2/F2s11p1.htm> > , (18.07.2019.)

trajanja tj. donja razina laserskog prijelaza prazni se brzo što omogućuje olakšano održanje inverzne naseljenosti. Dakle popunjavanje metastabilnog stanja je isto kao i kod lasera s tri energijske razine. Kod ovakvog laserskog djelovanja nisu potrebne velike snage pumpanja kao što je slučaj kod lasera sa tri energijske razine. Sustav koji je prikazan na slici br. 9. koristi se kod lasera za kontinuiran rad.<sup>16</sup>



Slika 9. Prikaz lasera s četiri energetske razine<sup>17</sup>

## 2.5. Karakteristike laserske svjetlosti

Laserska zraka ima sljedeće značajke:

1. Koherencija- za dva ili više svjetlosnih valova kažemo da su koherentni ako imaju međusobno konstantan odnos faze. Koherentnost može biti vremenska ili prostorna.
2. Svjetlina- zbog visokog smjera laserske zrake ona ima mnogo puta veću svjetlinu nego drugi konvencionalni izvori.
3. Usmjerenost- kutno širenje lasera veoma je malo u odnosu na običan izvor svjetla koji emitira svjetlosne valove u svim smjerovima tj. veoma je divergentan.
4. Jednobojnost- Laserska svjetlost je monokromatska, a sve laserske zrake emitirane iz istog izvora imaju istu frekvenciju i valnu duljinu.

<sup>16</sup> Breck Hitz, C. et.al.: Introduction to Laser Tehnology, John Wiley & Sons, New Jersey, 2012., str.82

<sup>17</sup> < <https://perg.phys.ksu.edu/vqm/laserweb/Ch-2/F2s12p1.htm>>, (18.07.2019.).

### 3. PODJELA LASERA

Od prvog lasera otkriveno je na stotine novih vrsta lasera, ali samo nekolicina je našla praktičnu primjenu. Lasere možemo podijeliti prema načinu rada, načinu pobude te prema agregatnom stanju optičkog pojačala. U daljnjem nastavku teksta ukratko je navedena podjela lasera, opisani su laseri koji se najčešće koriste u industriji i koji će se koristiti u istraživanju.

a) Prema načinu rada lasere djelimo na:

1. Kontinuirane („cw“) – optičko pojačalo nalazi se između dva paralelno postavljena zrcala. Jedno zrcalo propušta određenu količinu svjetla dok drugo zrcalo u potpunosti reflektira svjetlo.
2. Pulsne („pw“) – kod ove vrste lasera moguće je koristiti zrcala koja su potpuno nepropusna te se jedno od zrcala pomiče periodički izvan optičkog puta lasera. Kada zrcalo dođe na svoje mjesto zarobljava lasersku zraku unutar rezonatora i ona se pojačava dok se zrcalo ne pomakne te iz lasera izlazi kratak puls veoma intenzivnog laserskog zračenja. Ovako se postižu jako velike snage u pojedinačnim pulsevima usprkos maloj prosječnoj snazi lasera.

b) Prema načinu pobude lasere dijelimo na:

1. Optičke
2. Prema sudarima elektrona i atoma u plinskom izboju
3. Prema ozračivanjem snopovima čestica visoke energije
4. Prema kemijskim reakcijama

c) Prema vrsti laserskog medija na :

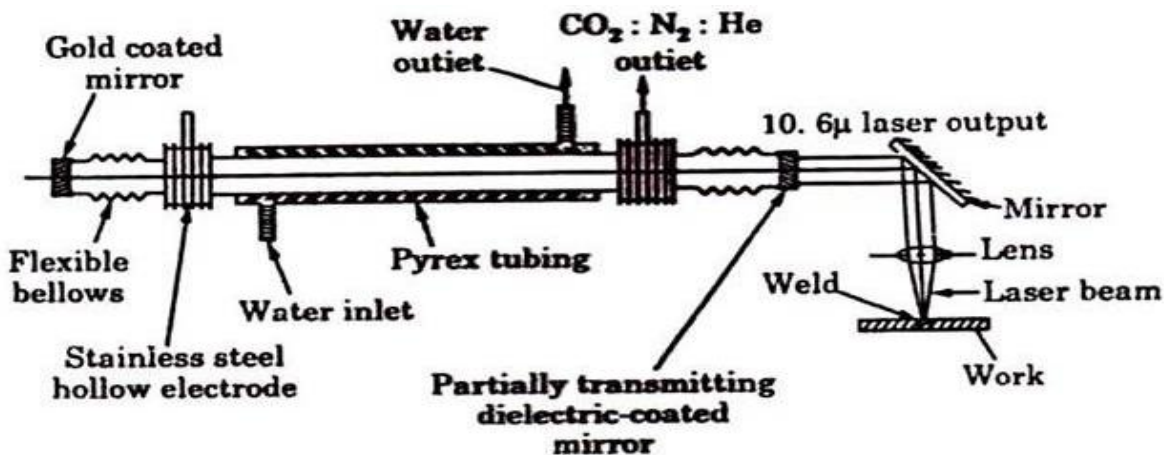
1. Plinske – možemo ih podijeliti na atomske (He-Ne, Cs), ionske (Ar, Kr), molekularne ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ) i kemijske.
2. Tekuće - dijele se na lasere s organskim bojama te na lasere „kaveznih molekula“

3. Krute - dijele se na kristalne (YAG; rubinske), poluvodičke i amorfne (plastični, stakleni).

### 3.1. Ugljični dioksid ( $CO_2$ ) laser

Zbog sposobnosti da proizvedu vrlo veliku snagu s relativnom učinkovitosti koriste se prvenstveno za obradu materijala. Izlazna svjetlost  $CO_2$  lasera je valne duljine  $10,6 \mu m$  i može biti izlazne snage više od 50 kW. Za razliku od atomskih lasera  $CO_2$  laseri rade s molekularnim prijelazima koji su dovoljno niske energetske razine koje mogu biti termalno naseljene i povećane u temperaturi plina, uzrokovane pražnjenjem što će izazvati smanjenje inverzije te samim time i smanjenu izlaznu snagu. Zbog toga  $CO_2$  laseri velike snage koriste tehnologiju tekućeg plina za uklanjanje vrućeg plina iz područja ispuštanja zamjenjujući ga hladnijim ili hlađenim plinom. Djeluju u srednjem infracrvenom zračenju na rotacijsko-vibracijskoj tranziciji u svjetlosnim razinama. I pulsni i kontinuirani ( u daljnjem tekstu cw) laser javlja se u nekoliko različitih tipova konfiguracija za plinsko pražnjenje u mješavini ugljičnog dioksida, dušika i helija u omjeru 1:2:10. Ovi laseri proizvode impulsnu energiju veću od 10,0 kJ. Prednost se javlja na rasponu rotacijsko-vibracijskih prijelaza kojima dominira Dopplerovo proširenje ili širenje tlaka, ovisno o tlaku plina. Da bi se ostvarila laserska reakcija aktivni medij  $CO_2$  stimuliran je električnim pražnjenjem. Pumpanje se izvodi pomoću napona od 30 kV, a molekule  $CO_2$  pobuđuju se na više energetske stanje. Prelazak molekula  $CO_2$  sa višeg na niže energetske stanje oslobađa fotone te se stvara laserska zraka. Molekule  $CO_2$  sudarajući se sa atomima helija koje su u većini u mješavini plinova vraćaju se u prvobitno stanje i ciklus se ponavlja. Laserski snop vodi se sustavom zrcala. Veličina lasera se kreće od malih „cw“ valovodnih sustava reda 0,35 m pa do mnogo većih impulsnih laserskih pojačala dizajniranih za lasersku fuziju. Jedan od najkorisnijih  $CO_2$  lasera za obradu materijala je „cw“ verzija s duljinom šupljine od 1,0-2,0 metra koja prizvodi jedan ili više kilovata snage.

Drugi laser ove klase je CO laser koji emitira na približno polovici valne duljine CO<sub>2</sub> lasera u području valne duljine 5,0-6,0  $\mu\text{m}$ .<sup>18</sup> Shematski prikaz CO<sub>2</sub> lasera prikazan je na slici br.10.



Slika 10. Shematski prikaz CO<sub>2</sub> lasera<sup>19</sup>

### 3.2. Fiber laser

Tijekom prvog desetljeća 21.stoljeća fiber laseri pojavili su se u raznim inačicama diljem svijeta. Iako spadaju u čvrste lasere, fiber laseri razlikuju se na mnogo načina od konvencionalnih, optički pumpanih poluvodičkih lasera. Zbog tih razlika imaju veću električnu učinkovitost nego konvencionalni čvrsti laseri sa istom ili sličnom izlaznom snagom i njihova je laserska zraka veće optičke kvalitete. Optičko vlakno je tanko staklo, nekoliko mikrometara do više od milimetra promjera i duljine dok u nekim slučajevima mogu imati dužinu i stotinu kilometara. Jednostavno vlakno sastoji se od dva sloja, jezgre koja usmjerava svjetlo i omotača koji okružuje jezgru. Svjetlo se vodi kroz jezgru fenomenom totalne unutarnje refleksije. Fiber laseri i optička pojačala izrađena su od vlakana u kojima je jezgra dopirana s nečistoćama koje se raspršuju. Vlakna se izrađuju od germanij ili silicija i dopirana su primjesama iterbija i erbija. Struktura im je nalik zrcalu na oba kraja koja tvore rezonantnu šupljinu u kojoj laser oscilira.

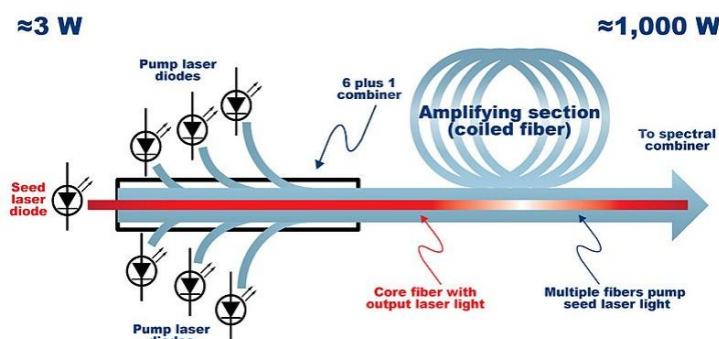
<sup>18</sup> SILFAST, W.: **Laser fundamentals**, Cambridge University Press, Cambridge, 2004. Str.511.

<sup>19</sup> <<http://www.yourarticlelibrary.com/welding/laser-welding/diagram-of-carbon-dioxide-lasers-metallurgy/97400>>, (19.07.2019.).

Ono što razlikuje fiber laser od konvencionalnih je neuobičajena geometrija vlakana. Vlakna su duga i tanka pa je odnos površine prema volumenu mnogo veći nego kod drugih lasera te je odvođenje toplote koja se stvara mnogo lakše. Ograničenje takvih vlakana je u tome što se snaga proizvodi u tankoj jezgri, stvarajući velike snage, nelinearne efekte (četverovalno miješanje) koje pretvara lasersko svjetlo u druge valne duljine i smanjuje cirkulirajuću snagu. Većina tih učinaka povećavaju se s udaljenosti i postaju veoma veliki u dugim vlaknima.

Optička vlakna dobro zaštićuju svjetlost koja prolazi kroz njih i pošto rade na principu totalne refleksije moguće je napraviti cijeli laserski rezonator od optičkih dijelova kao što su Braggova rešetka i razdjelnik. Braggova rešetka ima funkciju zamjene ogledala na način da propušta određene valne duljine dok druge zaustavlja. Ova vrsta lasera koristi kao i drugi čvrsti laseri optičko pumpanje, ali razlika je u tome da je pumpa zračenja spojena u vlakno iz jednog ili oba kraja i zarobljena je unutar gdje se može apsorbirati preko cijele duljine vlakna.<sup>20</sup> Da bi optičko pumpanje radilo moraju se zadovoljiti dvije stvari, ulazna svjetlost mora stati u jezgri koja vodi svjetlo i mora ući u jezgri unutar kutova prihvaćanja vlakana što je prikazano na slici br.11

Najnoviji napredak u laserskoj tehnologiji doveo je do uvođenja vlakana velikog područja kao i kontinuiranog napretka u visokoj snazi i visokoj svjetlini diode što je dovelo do



povećanja

Slika 11. Shematski prikaz fiber lasera<sup>21</sup>

<sup>20</sup> SILFAST, W.: **Laser fundamentals**, Cambridge University Press, Cambridge, 2004. Str.570.

<sup>21</sup> <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Combined-fiber\\_laser\\_diagram.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Combined-fiber_laser_diagram.jpg)>, (20.07.2019).

izlazne snage s 100,0 W na više od 20,0 kW. Kombinirani snop vlakana uspio je postići snagu 30,0 kW 2014. godine što je dovelo do masovne upotrebe ove vrste lasera u industriji.

### **3.3. Nd: yag laser (yttrium aluminium garnet)**

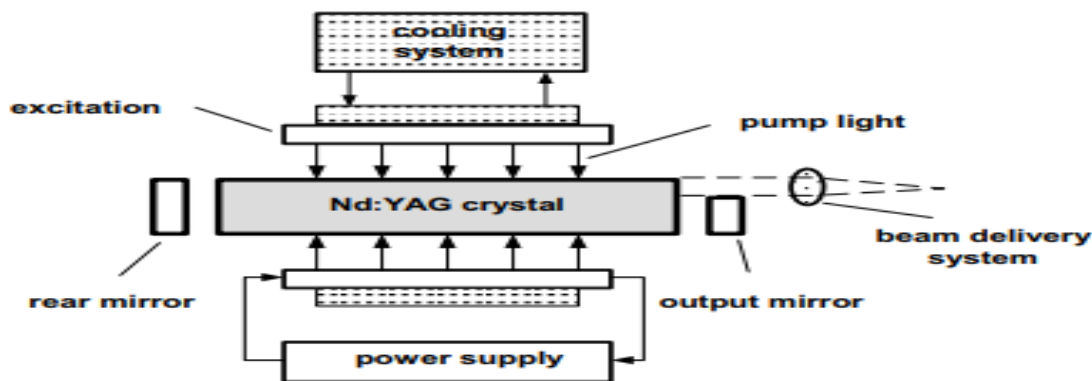
Ova vrsta lasera spada u lasere čvrstog stanja koji se također nazivaju dopirani izolatorski laseri. Ovi laseri su robusni, jednostavni za održavanje i sposobni za generiranje velikih snaga. Koriste samo princip optičkog pumpanja koji uzbuđuju aktivne centre iz posebno odabranog izvora kao što su iskrišta, plamen, bljeskalice, lampe... Sastoje se od krute jezgre (štapići itrij-aluminijev granat-YAG) dopiranog atomima neodimija što je prikazano na slici br.12. Za pobuđivanje koristi se kriptonska bljeskalica za razliku od drugih lasera gdje se koristi ksenonska bljeskalica koja daje više svjetla. Kristal granata ima dobru toplinsku vodljivost pa se mogu upotrebljavati u kontinuiranom modu kao i u pulsnom (Nd: staklo). Da bi došlo do optičkog pumpanja moraju se ispuniti dva uvjeta. Prvo razina pumpanja aktivnog središta mora biti dovoljno široka tj.apsorpcijska linija prijelaza pumpe mora imati relativno veliku propusnost i vrh linije apsorpcije mora biti dio najvećeg spektra zračenja crpke. Ako ovi uvjeti nisu zadovoljeni udio korisne potrošene snage izvora biti će iznimno mali.

U većini slučajeva aktivni materijal čvrstih lasera (dopirani izolator) sadrži nečistoće u kristalnom ili staklenom izolatoru. Atomi kristala ne sudjeluju izravno u radu lasera nego služe kao rešetka u kojoj se nalaze nečistoće. U današnje vrijeme postoji oko tri stotine dielektričnih dopiranih kristala koji pokazuju učinak stimulirane emisije.<sup>22</sup> Kristal Nd: YAG ima dobru optičku kvalitetu i visoku toplinsku provodljivost što omogućuje pulsirajući laserski izlaz do 100,0 Hz. Nedostatak Nd: staklenih laserskih materijala je njihova relativno slaba toplinska vodljivost što ih ograničava na relativno nisko ponavljanje pulsiranja. Nd: YAG laseri za rad trebaju sustav hlađenja jer uz učinkovitost od 3,0% proizvode trideset puta više otpadne topline te je tu toplinu neophodno otkloniti. Hlađenje se vrši protjecanjem vode preko vanjske strane optičke šupljine i zatvaranjem svjetiljke i laserskog snopa s prozirnim rashladnim plaštovima. Za hlađenje Nd: YAG lasera koristi se deionizirana voda da bi se spriječila bilo kakva električna

---

<sup>22</sup> Tarasov L.V.: Laser physics and applications, Mir publishers, Moscow, 1986., str.47.

provodljivost kroz vodu. Laseri dopirani neomidijem kreću se od malih izvedbi od malih verzija s snagom izlaza od nekoliko mW pa do prosječnih snaga od nekoliko kW. Laseri prosječne i velike snage koriste kombinaciju oscilator - pojačalo. Imaju široku primjenu od rezanja, bušenja, graviranja i ostale obrade metala i drugih materijala kao i u medicini.



Slika 12. Shematski prikaz Nd: YAG lasera<sup>23</sup>

#### 4. KOMPONENTE STROJA ZA LASERSKO REZANJE

Sustav laserskog rezanja najčešće se sastoji od radnog stola, hladnjaka i računala (hardver i softver), vanjske komponente prijenosnog zraka, laserskog generatora i mikrokontrolne brojčanog upravljačkog ormarića.

Glavni dio alatnog stroja - mehanički dio laserskog stroja koji služi za pomicanje X, Y i Z osi i uključuje obradni stol. Služi za postavljanje obradaka za obradu rezanjem i korigiranje pravilno i precizno prema programu upravljanja, najčešće servo motorom. Obradni stol izveden je u obliku rešetke sa zubima koji pridržavaju materijal. Takav oblik obradnog stola omogućuje dobar protok zraka ispod obratka postizući na takav način čišći rez na obratku i smanjenje naslaga na donjoj strani obratka.

<sup>23</sup> Pires Norberto J., Loureiro A., Bolmsjo G.: Welding Robots, Springer, London, 2006. Str.48

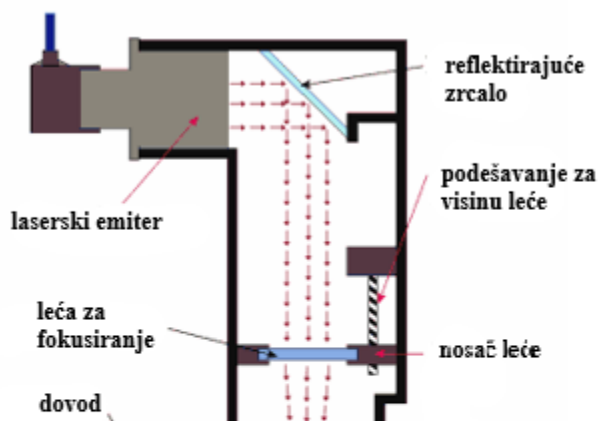


- Laserski generator- uređaj koji služi za stvaranje laserskog izvora svjetla. Najčešće korišteni su CO<sub>2</sub> laser s visokom učinkovitošću elektrooptičke pretvorbe i visokom izlaznom snagom dok se koriste i YAG laseri. Na slici br.13. prikazan je laserski generator za fiber laser.



Slika 13. Laserski generator za fiber laser<sup>24</sup>

- Vanjski put svjetla - refrakcijsko ogledalo koje usmjerava laserski snop u željenom smjeru. Za sprječavanje neispravnog puta zrake, sva zrcala su zaštićena zaštitnim poklopcem i uveden je čisti plin da bi zaštitio objektiv od pozitivnog tlaka, tj. onečišćenja.
- CNC sustav - služi za kontrolu strojnog alata za ostvarivanje gibanja X, Y i Z osovine kao i iza kontrolu izlazne snage lasera. Regulirani izvor napajanja - povezuje laserski, CNC stroja i sustava napajanja kako bi se spriječile smetnje vanjske mreže.
- Rezna glava - sadrži dijelove poput držača za fokusiranje, šupljine, ogledalo za fokusiranje, kapacitivni senzor i pomoćna plinska mlaznica. Pogonska glava za rezanje služi za pomicanje rezne glave u smjeru osovine Z uz pomoć servo motora. Rezna glava prikazana je na slici br.14.



<sup>24</sup> < <http://www.u-tanklaser.co>

*Slika 14. Prikaz rezne glave lasera<sup>25</sup>*

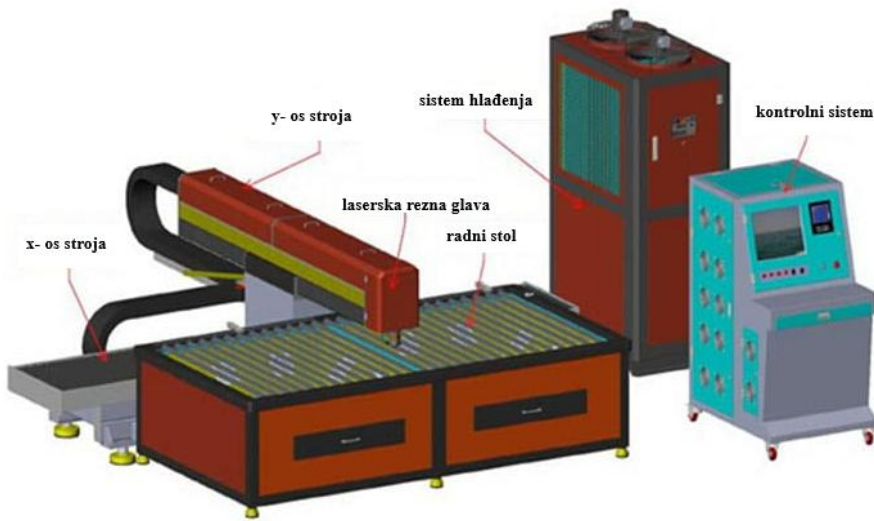
- Operatorska stanica - služi za upravljanjem radnim procesom cijeloga uređaja za rezanje.
- Hlađenje- koristi se za hlađenje laserskog generatora uklanjajući višak topline omogućavajući na taj način rad lasere. hlađenje također hladi vanjsko zrcalo za svjetlo i zrcalo za fokusiranje alatnog stroja da bi se osigurala stabilna kvaliteta prijenosa zrake i spriječilo pregrijavanje leća te uzrokovala deformacija leće.
- Cilindri- tu spadaju cilindri za radni medij lasera kao i pomoćni cilindri koji se koriste za dopunu laserski oscilirajućih industrijskih plinova i pomoćnih plinova za rezanje glave.
- Kompresor zraka- osigurava i pohranjuje komprimirani zrak
- Sušilica za zrak, filter- služi za isporuku suhog zraka u laserski generator i na taj način održava pravilan rad staze i zrcala.
- Odstranjivač prašine –izvlači prašinu koja je nastala tokom obrade i filtrira je kako bi ispuštanje plinova zadovoljilo standarde zaštite okoliša.<sup>26</sup>

Na slici br.15. je prikazan CNC obradni centar s laserskom glavom sa glavnim komponentama.

---

<sup>25</sup> < <http://14.ymngy.rund-ums-backen.de/fseg/laser-head-diagram.html>>, (21.07.2019.).

<sup>26</sup> HG TECH, <<https://www.hgtech-laser.com/>>, (21.07.2019.).



Slika 15. CNC obradni centar s laserskom glavom<sup>27</sup>

## 5. LASERSKO REZANJE

Lasersko rezanje je vrsta poznate digitalne tehnike proizvodnje i spada u nekonvencionalne postupke obrade jer alat kojim se vrši obrada nije tvrdi od obradka i nema mehaničkih sila između alata i obradka. Spada u toplinski proces obrade materijala u kojem se materijal zagrijava i reže fokusiranom laserskom zrakom, u kombinaciji sa inertnim ili aktivnim plinom. Laserska zraka udara u površinu materijala i zagrijava ga da se počinje topiti ili potpuno isparava te kada laserska zraka potpuno prodre u materijal započinje stvarni proces rezanja. Laserski sustav slijedi odabranu geometriju i odvaja materijal u procesu. Za rezanje u industriji se koriste tri glavne vrste lasera: CO<sub>2</sub>, Nd-YAG i Nd.

U ovom polju primjene laseri nude sljedeće prednosti:

1. Širok raspon prerađenih materijala (keramika, limovi, papir, tkanina, šperploča)

<sup>27</sup><https://www.machinemfg.com/laser-cutter-components/>, (21.07.2019.).

2. Mogućnost finog i preciznog rezanja
3. Minimalna količina mehaničkog izobličenja i toplinskih oštećenja koja u izrezanom materijalu
4. Kemijska čistoća postupka rezanja
5. Mogućnost rezanja u dvije ili čak tri dimenzije prema složenom profilu
6. Jednostavna automatizacija procesa i visoka stopa proizvodnje<sup>28</sup>

Lasersko rezanje može biti nereaktivno rezanje uz pomoćni plin, reaktivno rezanje uz pomoćni plin, rezanje kontroliranim lomom ili isparavanjem materijala. ,

## **5.1. Rezanje isparavanjem**

Kod rezanja isparavanjem fokusirana zraka zagrijava površinu materijala do točke vrenja i stvara “ključanicu”. Stvorena ključanica dovodi do naglog povećanja apsorpcije koja brzo produbljuje rupu. Kako se rupa produbljuje i materijal prokuhava, isparavanje erodira rastaljene zidove koji ispuhuju materijal i dalje povećavaju rupu. Ovim postupkom režu se materijali koji se ne tope kao što je drvo, ugljik termostatske plastične mase.

## **5.2. Nereaktivno rezanje uz pomoćni plin**

Ovakav postupak koristi inertni plin kao što je argon da otpusti materijal nakon što se otopi. Energetske potrebe su manje nego kod rezanja isparavanjem, a pomoćni plin također pomaže u zaštiti laserske optike.<sup>29</sup>

---

<sup>28</sup> Tarasov L.V.: Laser physics and applications, Mir publishers, Moscow, 1986., str.143.

<sup>29</sup> Natarajan R.: An experimental and theoretical study of heat transfer effects during a laser-cutting process, Iowa State University, 1990, Ames, str.12.

### **5.3. Reaktivno rezanje uz pomoćni plin**

Ova metoda koristi reaktivan plin kao što je kisik ili metan kao pomoćni plin. Plin ispuhuje rastaljeni metal i osigurava dodatnu toplinu za proces rezanja nekim egzotermičkim reakcijama. Deblji metali se mogu rezati brže i s nižim snagama lasera. To je najčešća korištena metoda rezanja metala debljih od 2 mm. Mlaznica dovodi mlaz kisika koji je koaksijalan laserskom snopu iznad izradka. Apsorbirano lasersko zračenje u početku stvara rupu poznatu kao “ključanica” koja zatim djeluje kao crno tijelo i uzrokuje apsorpciju većine zračenja. Apsorbirano zračenje povećava temperaturu na lokalnoj razini, što rezultira većim taljenjem metala. Rastaljeni metal se brzo ispuše iz područja rezanja pomoću udarajućeg plinskog mlaza. Korištenjem kisika kao pomoćnog plina dobiva se dodatni izvor energije iz egzotermne reakcija oksidacije metala. Brzina oksidacije se povećava s povećanjem temperature s čime proces postaje gotovo samoodrživ.

### **5.4. Rezanje kontroliranim lomom**

Metoda koja se koristi samo za krute materijale kao što je staklo. Pukotina se inicira induciranjem toplinskih napreznja u materijalu. Kada se postigne lom vodi se laserskom zrakom povećanom brzinom.<sup>30</sup>

### **5.5. Parametri laserskog rezanja<sup>31</sup>**

Parametri laserskog rezanja uključuju sva ona svojstva koje možemo mijenjati da bismo poboljšali kvalitetu rezanja.

---

<sup>30</sup> Natarajan R.: An experimental and theoretical study of heat transfer effects during a laser-cutting process, Iowa State University, 1990, Ames, str.12.

<sup>31</sup> Laser cutting, Laserline Tehnical:< [https://www.boconline.ie/en/images/laser\\_cutting\\_tcm674-78872.pdf](https://www.boconline.ie/en/images/laser_cutting_tcm674-78872.pdf)>, (22.07.2019.).

Parametri koje možemo mjenjati jesu:

1. Žarišna duljina leće
2. Način rada laserske zrake
3. Snaga i intezitet lasera
4. Valna duljina laserske zrake
5. Žarišni položaj u odnosu na radni komad
6. Veličina i visina mlaznice
7. Vrsta plina i tlak plina
8. Pulsni ili kontinuirani valni rad

#### 5.5.1. Žarišna duljina leće

Žarišna duljina je udaljenost između središta leće i žarišta, ovisno o obliku leće i tvari iz koje je leća napravljena.<sup>32</sup>

Žarišna duljina leće određuje oblik fokusiranje laserske zrake te ovisi o materijalu koji se reže. Leće koje imaju manje žarišne duljine koriste se za rezanje materijala koji su debljine do 4,0 mm. Za materijale veće debljine od 4,0 mm koriste se leće sa većom žarišnom duljinom jer veličina fokusa mora biti barem polovica debljine materijala koji ćemo rezati.

#### 5.5.2. Način rada laserske zrake

Način rada laserske zrake odnosi se na distribuciju energije kroz poprečni presjek i utječe na postupak rezanja, jer direktno utječe na veličinu fokusiranog mjesta i intezitet fokusiranog snopa kao i na raspodjelu inteziteta u zraku i fokusu što za rezultat ima kvalitetu rezanja.

---

<sup>32</sup>Wikipedia, Žarišna duljina: < [https://hr.wikipedia.org/wiki/%C5%BDari%C5%A1na\\_duljina](https://hr.wikipedia.org/wiki/%C5%BDari%C5%A1na_duljina)>, (22.07.2019.)

### 5.5.3. Snaga i intezitet lasera

Snaga lasera je ukupna energija emitirana u obliku laserske svjetlosti po sekundi. Intezitet laserske zrake jednak je omjeru njegove snage i područja iznad kojeg je koncentrirana njegova snaga. Fokusiranje laserskog snopa od 1,0 kW na promjer od 0,1 mm će rezultirati gustoćom snage od cca. 125,0 kW/mm<sup>2</sup>. Visok intezitet uzrokuje da se materijal veoma brzo zagrijava tako da ostaje veoma malo vremena da se toplina koja se stvara raspršuje u okolni materijal. To uzrokuje visoku stopu rezanja kao i odličnu kvalitetu reza. Intezitetom lasera također se određuje debljina koja se može izrezati, intezitet raste kako raste i debljina materijala koji je potrebno rezati. Viši intezitet možemo postići povećanjem snage lasera ili pomoću objektiva za izoštravanje s kraćom žarišnom duljinom.

### 5.5.4. Valna duljina laserske zrake

Apsorpcija materijala koji se reže ovisi o valnoj duljini laserske zrake. Brzina apsorpcija raste značajno s temperaturom materijala. Valna duljina laserske zrake utječe na pojavu refleksije prilikom rezanja što je pojava koja se nastoji izbjeći zbog mogućeg oštećenja glave lasera. Refleksija je uvjetovana svojstvima metala. Dok neki visokoreflektirajuće materijali npr. aluminij mogu apsorbirati neke valne duljine bolje od drugih, specifična vrsta lasera je prikladnija za određenu primjenu od drugih lasera. Prikladnost lasera ovisi i o drugim parametrima kao što su vršna snaga, duljina pulsa i sposobnost fokusiranja, a ne valna duljina.

### 5.5.5. Žarišni položaj u odnosu na radni komad

Manja veličina točke dobivena fokusiranjem laserske zrake osigurava visoke intezitete za obradu materijala. Iznad i ispod fokusa intezitet zrake opada. Dubina fokusa izražava se koliko brzo snop postaje širi i intezitet pada. Kraća žarišna duljina rezultira manjom veličinom točke i manjom dubinom fokusa. Žarišna točka mora biti točno pozicionirana s referencom na površinu obratka, a taj položaj se mora zadržati tijekom cijele obrade. Točka gdje je promjer zrake

najmanji treba biti na površini obratka. Osjetljivost fokusiranja je manja u laserima velike snage nego u onima slabije snage. Žarišni položaj je parametar koji se mora kontrolirati da se osigura optimalna učinkovitost rezanja. Varijacije u materijalu i debljini mogu zahtjevati promjenu fokusa kao i varijacije u obliku laserske zrake ili načinu rada i promjenama u temperaturi rashladne vode te kontaminacija na leći su isto uzrok koji zahtjeva promjenu fokusa.

#### 5.5.6. Veličina i visina mlaznice

Geometrija mlaznice i odstupanje od udaljenosti mlaznice od obratka su veoma bitni. Dizajn mlaznice i dinamika protoka kroz mlaznicu bitno se razlikuju od drugih toplinskih rezanja. To je uglavnom zbog kompaktnosti i promjera mlaznice koja je uvijek veća od pukotine proizvedene ispod nje. Kao rezultat, samo dio mlaza plina koji je formiran od mlaznice prodire u otvor. Daljine odmaka mlaznice ovise o konstrukciji mlaznice. Udaljenost za standardne mlaznice koje se koriste za lasersko rezanje treba biti manji od promjera mlaznice jer se inače u protivnom mogu javiti turbulencije i promjene tlaka. Tipični promjeri mlaznice su u rasponu od 0,8-3,0 mm.

#### 5.5.7. Vrsta plina i tlak plina

Korišteni plin za rezanje ključan je za rezultat rezanja. Kisik daje dobre performanse rezanja u ugljičnim čelicima i slabo legiranim čelicima. Kisik reagira s osnovnim metalom i rezni rub je prekriven oksidnim slojem te to predstavlja razlog zbog kojeg se visoko legirani čelici režu sa dušikom. Dušik se koristi i za dijelove koji se poslije rezanja oblažu prahom tj. boje prahom jer oksidi na reznom rubu smanjuju vezu između premaza i materijala te mogu dovesti do korozije. Nedavni razvoj u industriji lasera doveo je do rezanja lasera izlaznom snagom 8,0 kW te sve više poduzeća koristi dušik za rezanje nehrđajućih čelika i drugih visoko legiranih materijala. Kako ne postoje potporne egzotermne reakcija kod laserskog procesa



povećava se pritisak plina za rezanje sukladno povećanju debljine materijala. Stariji strojevi imaju ograničenje tlaka plina koji ne smije preći 12,0 bara zbog fokusirajuće leće što nije slučaj kod novijih strojeva koji imaju deblje leće pa mogu koristiti tlakove reznog plina od 20,0 bara i više.

#### 5.5.8. Pulsni ili kontinuirani valni rad

Najveće brzine rezanja mogu se postići na visokim razinama snage u u načinu rada "cw" (kontinuiranom načinu rada). Kontinuirani val znači da je izlazna snaga lasera konstantna, bez prekida tijekom vremena. Pri velikim brzinama snaga lasera se u potpunosti koristi za taljenje ili isparavanje materijala na prednjem rezu i tu dolazi do relativno malo provođenja topline u osnovni materijal. Dio topline prelazi u osnovni materijal prilikom okretanja smjera rezanja ili prilikom rezanja oko oštrog ugla. Time se smanjuje kvaliteta rezanja.

Pulsirajuća obrada može proizvesti najbolje rezove prilikom rezanja filigranskih struktura ili kod probijanja rupa u debljim materijalima. Visoka vršna snaga u kratim impulsima osigurava učinkovito zagrijavanje s efikasnim uklanjanjem vrućeg materijala iz pukotine dok niska prosječna snaga održava komad hladnim. Brzine rezanja u pulsnom radu su mnogo manje nego u kontinuiranom radu.

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

U ovom djelu rada izvršili smo eksperimentalni dio rezanja metala laserom. Uspoređivali smo brzinu potrebnu za rezanje uzoraka te kvalitetu reza između CO<sub>2</sub> lasera i fiber lasera na debljinama čeličnih limova od 1,0 mm do 3,0 mm s različitim posmičnim brzinama. Usporedbom dobivene brzine i kvalitete reza došli smo do određenih zaključaka koji su opisani nadalje u radu.

### 6.1. Oprema korištena za lasersko rezanje

Za rezanje čeličnih limova koristili smo obradni centar CO<sub>2</sub> laser “Platino 1530 CP 3000” kao i “Platino Fiber” koji se nalaze u sklopu tvrtke Krasa d.o.o. u Potpićnu, a u radu su prikazane na slikama br.16. i 17. kao i njihove tehničke specifikacije koje su prikazane u tablicama broj 1 i 2.



*Slika 16. Obradni centar “Platino Fiber” s automatskim punjačem limova<sup>33</sup>*



*Slika 17. Obradni centar “Platino 1530 CP 3000”<sup>34</sup>*

<sup>33</sup> < <http://krasa.hr/galerija.html>>, (14.08.2019.).

**Tehničke specifikacije:***Tablica 1. Prikaz specifikacije obradnog centra "Platino 1530 CP 3000"*

SPECIFIKACIJE OBRADNOG CENTRA PLATINO 1530 CP 3000	
MAKSIMALNA IZLAZNA SNAGA STROJA [W]	5000,0
MODEL LASERA	Platino 1530 CP 3000
RADNI VOLUMEN STROJA [mm]	3000,0X1500,0X150,0
TEŽINA STROJA [kg]	10,000,0
RASPON KRETANJA X, Y, Z OSI [mm]	3000,0X1500,0X150,0
MAKSIMALNA CJELOKUPNA DIMENZIJA STROJA [mm]	10,600X3,540X 2,500
TOČNOST GLAVNIH OSI [mm]	0,03
TEHNIČKI PLIN KOJI LASER KORISTI	kisik (O <sub>2</sub> )
MAKSIMALNA BRZINA [m/min]	100,0
MAKSIMALNO UBRZANJE [g]	1,20 (pojedinačna os)
REZOLUCIJA OSI [ $\mu$ m]	0,03
MAKSIMALNA TEŽINA IZRADKA [kg]	1200,0

*Izvor: Izradio autor*

*Tablica 2. Prikaza specifikacije obradnog centra "Platino Fiber"*

SPECIFIKACIJE OBRADNOG CENTRA PLATINO FIBER	
MAKSIMALNA IZLAZNA SNAGA STROJA [W]	2500,0
MODEL LASERA	Platino FIBER

<sup>34</sup> <<https://f.nordiskemedier.dk/2zbtza0tj3jk28ya.pdf>>, (14.08.2019.).

RADNI VOLUMEN STROJA [mm]	3000,0X1500,0X150,0
TEŽINA STROJA [kg]	12,000,0
RASPON KRETANJA X, Y, Z OSI [mm]	3065,0X1560,0X150,0
MAKSIMALNA CJELOKUPNA DIMENZIJA STROJA [mm]	10,600X3,540X 2,500
TOČNOST GLAVNIH OSI [mm]	0,03
TEHNIČKI PLIN KOJI LASER KORISTI	dušik (N2), kisik (O2)
MAKSIMALNA BRZINA [m/min]	100,0
UBRZANJE GLAVNIH OSI [g]	1,2 ( pojedinačna osovina)
REZOLUCIJA OSI [ $\mu$ m]	0,03
MAKSIMALNA TEŽINA IZRADKA [kg]	1200,0

*Izvor: Izradio autor*

## 6.2. Radni materijal

Za rezanje koristili smo dvije vrste čelika s oznakama DC 01 i DD 12 koji spadaju u niskouglične čelike za hladno oblikovanje. Ove vrste čelika prikladne su za jednostavno oblikovanje, savijanje i zavarivanje. Karakterizira ih vrhunski oblik lima i kvaliteta površine s dobrom ravnom i površinskom završnom obradom. Površina je čista, svjetla i lagana za premazivanje. Razlika između korištenih materijala je u kemijskom sastavu kao i u tome da je materijal DC 01 hladnovaljani dok je DD 12 toplovaljani niskouglični čelik. Oba lima su dekapirana, a to znači da su kemijski očišćena od hrđe i nečistoća te može biti nauljen ili ne. Kemijska i mehanička svojstva materijala koje smo koristili propisani su normama EN 10111 dok je tolerancija mjera i debljina propisana normom EN 10051. Kemijski sastav čelika kao i mehaničke osobine prikazane su u tablicama pod rednim brojem 3, 4, 5 i 6 prema standardima za kvalitetu.

OZNAKA MATERIJALA	KEMIJSKI SASTAV ČELIKA (%)								
	C (max)	Si (max)	Mn (max)	P (max)	S (max)	Cr (max)	Mo (max)	Ni (max)	Drugi (max)
DC 01	0,12	-	0,6	0,045	0,0045	-	-	-	-

Tablica 3. Kemijski sastav čelika DC 01

Izvor: Izradio autor

OZNAKA MATERIJALA	KEMIJSKI SASTAV ČELIKA (%)								
	C (max)	Si (max)	Mn (max)	P (max)	S (max)	Cr (max)	Mo (max)	Ni (max)	Drugi (max)
DD 12	0,10	-	0,45	0,035	0,035	-	-	-	-

Tablica 4. Kemijski sastav čelika DD 12

Izvor: Izradio autor

OZNAKA MATERIJALA	MEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA							
	Re [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	A <sub>80</sub> [%]	r <sub>90</sub> min	n <sub>90</sub> min	DEBLJINA [mm]	POVRŠINSKI SLOJ
DD 12	170-320	≤420	30	26	-	-	2,0-11,0	neprekriven

Tablica 5. Mehanička svojstva čelika DC 01

Izvor: Izradio autor

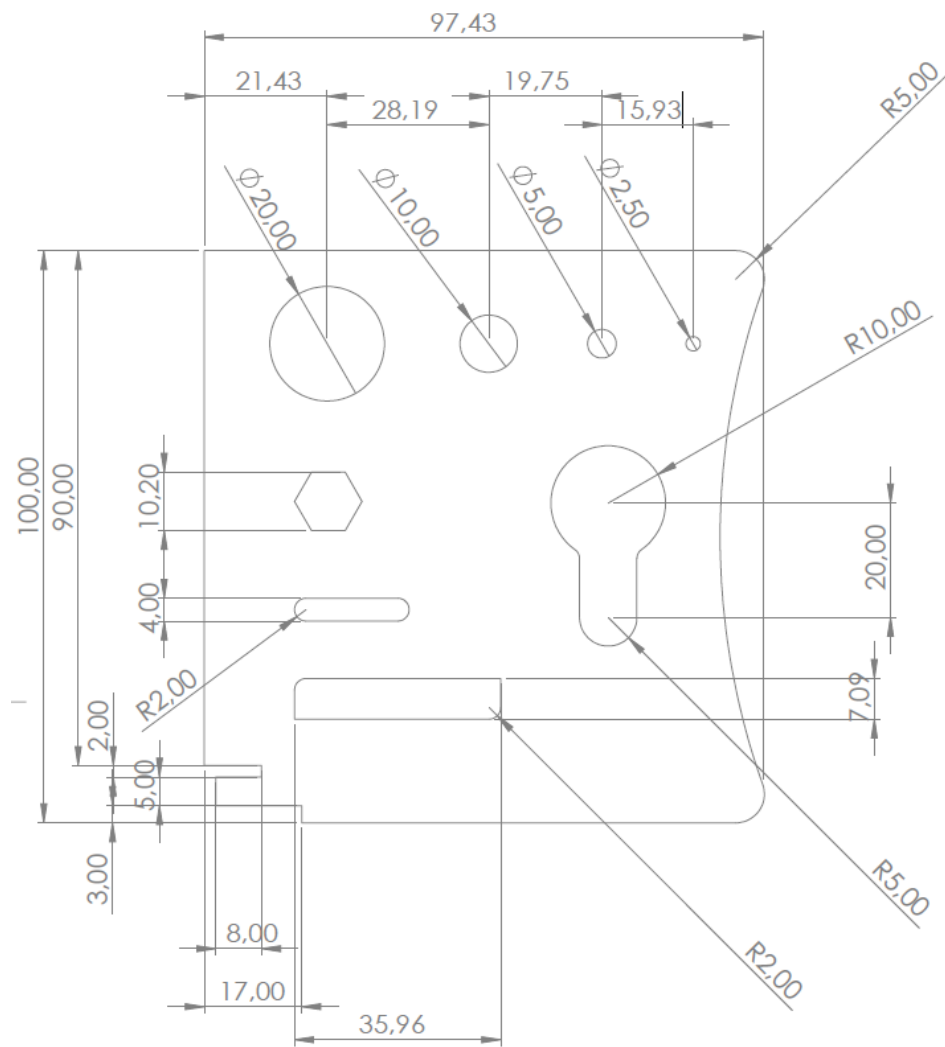
Tablica 6. Mehanička svojstva čelika DD 12

OZNAKA MATERIJALA	MEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA							
	Re [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	A <sub>80</sub> [%]	r <sub>90</sub> min	n <sub>90</sub> min	DEBLJINA [mm]	POVRŠINSKI SLOJ
DC 01	140-280	270-410	-	28	-	-	0,70-1,50	neprekriven

Izvor: Izradio autor

### 6.3. Plan rezanja uzoraka

Rezanje uzoraka niskougličnih čelika DC 01 i DD 12 sproveli smo sa CO2 i Fiber laserom. Uzorak koji smo rezali nacrtan je u programu Solidworks i prikazan je slikom br.18. te je uložan u rad kao prilog s nestingom. Uzorci su debljine 1,0 mm, 1,5 mm, 2,0 mm i 3,0 mm, rezani su na dvije različite vrste lasera, različitim tehničkim plinovima i svaki uzorak je izrezan pet puta pri različitim posmičnim brzinama. Tehnički plinovi za rezanje koje smo koristili su kisik i dušik, a njihov tlak je različit ovisno o stroju na kojem se vršilo rezanje kao i o debljini materijala koji smo rezali. Posmičnu brzinu smanjivali smo postepeno za 10,0% i taj postupak smo ponovili pet puta na svakoj debljini uzoraka i na svakom laseru mjereći pri tome vrijeme koje je potrebno da se uzorak izreže te smo isto zabilježili.








Slika 18. Nacrt uzorka za rezanje<sup>35</sup>

<sup>35</sup> Izradio autor

#### 6.4. Rezanje uzoraka laserom (usporedba kvalitete reza i vremena)

Kod rezanja odabranih čelika svi parametri, mjenjanje brzine posmaka kao i odabir tehničkog plina za rezanje doveli su do potpunog rezanja čelika. Brzina rezanja određenog komada čelika, prikaz kvalitete dobivenih reznih površina, vrsta tehničkog plina, debljina materijala i ostali parametri prikazani su u narednim tablicama u radu za sve uzorke.

Tablica 7. Prikaz reznih površina i parametara rezanja za čelik DC 01 debljine 1,0 mm



MATERIJAL UZORKA	DEBLJINA LEĆE [ " ]	DEBLJINA UZORKA [mm]	MLAZNICA [mm]	TEHNIČKI PLIN	LASER
DC 01	5,0	1,0	ST 2	O <sub>2</sub>	CP 3000
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
REDNI BROJ UZORKA	UZORAK 1.	UZORAK 2.	UZORAK 3.	UZORAK 4.	UZORAK 5.






POSMIČNA BRZINA [%]	100,0	90,0	80,0	70,0	60,0
POSMIČNA BRZINA [mm/min]	5300,0	4770,0	4240,0	3710,0	3180,0
SNAGA [W]	800,0	800,0	800,0	800,0	800,0
TLAK PLINA [bar]	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
UDALJENOST MLAZNICE OD OBRADKA [mm]	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
VRIJEME REZANJA [sec]	14,0	16,0	18,0	20,0	23,0

*Izvor: Izradio autor*

*Tablica 8. Prikaz reznih površina i parametara rezanja za čelik DC 01 debljine 1,0 mm*




MATERIJAL UZORKA	DEBLJINA LEĆE [ " ]	DEBLJINA UZORKA [mm]	MLAZNICA [mm]	TEHNIČKI PLIN	LASER
DC 01	7,50	1,0	ST 2	N <sub>2</sub>	FIBER
6.					
7.					



8.					
9.					
10.					
REDNI BROJ UZORKA	UZORAK 6.	UZORAK 7.	UZORAK 8.	UZORAK 9.	UZORAK 10.
POSMIČNA BRZINA [%]	100,0	90,0	80,0	70,0	60,0
POSMIČNA BRZINA [mm/min]	11000,0	9900,0	8800,0	7700,0	6600,0
SNAGA [W]	2000,0	2000,0	2000,0	2000,0	2000,0
TLAK PLINA [bar]	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
UDALJENOST MLAZNICE OD OBRADKA [mm]	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
VRIJEME REZANJA [sec]	10,	11,02	12,20	13,70	14,90

Izvor: Izradio autor

Prilikom rezanja uzoraka niskougličnog čelika DC 01 debljine 1,0 mm promjena posmične brzine rezanja ne stvara preveliki utjecaj na kvalitetu reza kod oba lasera jer je lim veoma tanak i reže se bez poteškoća. Smanjenje posmične brzine pokazalo je da će se pojaviti nepravilnosti na reznim površinama kod oba lasera što se može bolje vidjeti na uzorcima koji su rezani uz pomoć CO<sub>2</sub> lasera. Pomoću površina prikazanih u tablicama pod rednim brojem 7.i 8. možemo zaključiti da je najbolji rez dobiven kod CO<sub>2</sub> lasera pri posmičnoj brzini od 5300,0 mm/min, (100,0%) i korištenom snagom od 800,0 W dok je tlak tehničkog plina 2,0 bara, kod Fiber lasera najbolji rez je dobiven pri posmičnoj brzini od 11000,0 mm/min ( 100,0%) i snagom lasera od 2000,0 W te tlak tehničkog plina je 12,0 bara. Korištenje manjih posmičnih brzina može dovesti do taljenja ruba i oksidacije površine reza pa je potrebna dodatna obrada površina što je vidljivo na uzorcima kod CO<sub>2</sub> lasera u izraženoj hrapavosti rezne površine. Usporedba reza između Fiber i CO<sub>2</sub> lasera dovela nas je do zaključka da je rez uzoraka debljine 1,0 mm bolji kod Fiber lasera te je vrijeme rezanja uzoraka puno manje nego kod CO<sub>2</sub> lasera što nam uvelike smanjuje troškove proizvodnje te nema dodatne obrade rezne površine zbog korištenja dušika umjesto kisika.






*Tablica 9. Prikaz reznih površina i parametara rezanja za čelik DC 01 debljine 1,5 mm*

MATERIJAL UZORKA	DEBLJINA LEĆE [ " ]	DEBLJINA UZORKA [mm]	MLAZNICA [mm]	TEHNIČKI PLIN	LASER
DC 01	5,0	1,50	ST 2	O <sub>2</sub>	CP 3000
11.					
12.					
13.					

14.					
15.					
REDNI BROJ UZORKA	UZORAK 11.	UZORAK 12.	UZORAK 13.	UZORAK 14.	UZORAK 15.
POSMIČNA BRZINA [%]	100,0	90,0	80,0	70,0	60,0
POSMIČNA BRZINA [mm/min]	3500,0	3150,0	2800,0	2450,0	2100,0
SNAGA [W]	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0
TLAK PLINA [bar]	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
UDALJENOST MLAZNICE OD OBRADKA [mm]	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
VRIJEME REZANJA [sec]	32,0	70,0	106,0	145,0	187,0

*Izvor: Izradio autor*

Tablica 10. Prikaz reznih površina i parametara rezanja za čelik DC 01 debljine 1,5 mm






MATERIJAL UZORKA	DEBLJINA LEĆE [ " ]	DEBLJINA UZORKA [mm]	MLAZNICA [mm]	TEHNIČKI PLIN	LASER
DC 01	7,50	1,50	ST 2	$N_2$	FIBER
16.					
17.					
18.					
19.					
20.					
REDNI BROJ UZORKA	UZORAK 16.	UZORAK 17.	UZORAK 18.	UZORAK 19.	UZORAK 20.
POSMIČNA BRZINA [%]	100,0	90,0	80,0	70,0	60,0
POSMIČNA BRZINA [mm/min]	6000,0	5400,0	4800,0	4200,0	3600,0
SNAGA [W]	2000,0	2000,0	2000,0	2000,0	2000,0

TLAK PLINA [bar]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
UDALJENOST MLAZNICE OD OBRADKA [mm]	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
VRIJEME REZANJA [sec]	13,0	14,0	15,08	16,10	17,30

*Izvor: Izradio autor*

Kod rezanja uzoraka debljine 1,50 mm promjena posmične brzine ne stvara preveliki utjecaj na kvalitetu reza kod lasera Fiber koja je bolja nego kod CO<sub>2</sub> lasera što je vidljivo iz uzoraka. Prilikom rezanja CO<sub>2</sub> lasera najbolji rez daje posmična brzina 3500,0 mm/min i snaga 1200,0 W dok je tlak tehničkog plina 3,0 bara. Fiber laser daje najbolji rez pri posmičnoj brzini 6000,0 mm/min, pri snazi od 2000,0 W te tlaku tehničkog plina od 10,0 bara. Kao i kod rezanja uzoraka debljine 1,0 mm i kod uzoraka od 1,50 mm usporedba reza CO<sub>2</sub> i Fiber lasera daje bolje rezultate u kvaliteti reza kod lasera Fiber što je vidljivo u nepravilnostima kod rezne površine gdje dolazi do izražene hrapavosti te dolazi do razlike u vremenu koj je potrebno da laser odreže uzorak. Laser Fiber znatno je brži nego CO<sub>2</sub> lasera što nam ubrzava proizvodnju i dovodi do smanjenja troškova proizvodnje. Korištenjem tehničkog plina dušika umjesto kisika donosi prednost u tome da nema daljnje obrade rezne površine, jer rezanje dušikom ne ostavlja oksidirani sloj ili patinu na reznoj površini pa se obradak može direktno slati na daljnju obradu.






Tablica 11. Prikaz reznih površina i parametara rezanja za čelik DD 12 debljine 2,0 mm

MATERIJAL UZORKA	DEBLJINA LEĆE [ " ]	DEBLJINA UZORKA [mm]	MLAZNICA [mm]	TEHNIČKI PLIN	LASER
DD 12	5,0	2,0	ST 2	O <sub>2</sub>	CP 3000
21.					
22.					
23.					
24.					
25.					
REDNI BROJ UZORKA	UZORAK 21.	UZORAK 22.	UZORAK 23.	UZORAK 24.	UZORAK 25.
POSMIČNA BRZINA [%]	100,0	90,0	80,0	70,0	60,0
POSMIČNA BRZINA [mm/min]	3452,0	3105,0	2760,0	2415,0	2070,0
SNAGA [W]	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0

TLAK PLINA [bar]	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
UDALJENOST MLAZNICE OD OBRADKA [mm]	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
VRIJEME REZANJA [sec]	30,0	63,0	98,0	136,0	178,0

Izvor: Izradio autor

Tablica 12. Prikaz reznih površina i parametara rezanja za čelik DD 12 debljine 2,0 mm

MATERIJAL UZORKA	DEBLJINA LEĆE [ " ]	DEBLJINA UZORKA [mm]	MLAZNICA [mm]	TEHNIČKI PLIN	LASER
DD 12	7,50	2,0	ST 2	$N_2$	FIBER
26.					
27.					
28.					
29.					
30.					








REDNI BROJ UZORKA	UZORAK 26.	UZORAK 27.	UZORAK 28.	UZORAK 29.	UZORAK 30.
POSMIČNA BRZINA [%]	100,0	90,0	80,0	70,0	60,0
POSMIČNA BRZINA [mm/min]	4500,0	4050,0	3600,0	3150,0	2700,0
SNAGA [W]	2000,0	2000,0	2000,0	2000,0	2000,0
TLAK PLINA [bar]	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
UDALJENOST MLAZNICE OD OBRADKA [mm]	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
VRIJEME REZANJA [sec]	15,0	16,30	17,60	20,0	22,50

*Izvor: Izradio autor*

Rezanjem uzoraka debljine 2,0 mm, smanjenje posmične brzine nije dalo preveliku razliku u kvaliteti rezanja kako kod CO<sub>2</sub> tako i kod fiber lasera. Najbolji rez CO<sub>2</sub> laser dao je pri posmičnoj brzini 2070,0 mm/min (60,0%) i snazi 1200,0 W dok je tlak tehničkog plina bio 1,10 bar-a. Na uzorcima 21 i 22 vidljiva je pojava oštećenja pri dnu rezne površine dok na ostatak rezne površina nema vidljivih oštećenja. Kod fiber lasera najbolju reznu površinu ima uzorak 26 rezan posmičnom brzinom 4500,0 mm/min, snagom 2000,0 W i tlakom tehničkog plina koji je iznosio 12,0 bar-a. Vidljiva razlika između fiber i CO<sub>2</sub> lasera je u vremenu potrebnom da se uzorak izreže gdje je kod fiber-a potrebno mnogo manje vremena da se uzorak

u potpunosti izreže. Razliku čini i upotreba dušika koji pri rezanju sprečava nastanak visoke temperature te na takav način omogućava dobivanje bolje kvalitete rezne površine.




Tablica 13. Prikaz reznih površina i parametara rezanja za čelik DD 12 debljine 3,0 mm



MATERIJAL UZORKA	DEBLJINA LEĆE [ " ]	DEBLJINA UZORKA [mm]	MLAZNICA [mm]	TEHNIČKI PLIN	LASER
DD 12	5,0	3,0	ST 2	O <sub>2</sub>	CP 3000
31.					
32.					
33.					
34.					
35.					
REDNI BROJ UZORKA	UZORAK 31.	UZORAK 32.	UZORAK 33.	UZORAK 34.	UZORAK 35.
POSMIČNA BRZINA [%]	100,0	90,0	80,0	70,0	60,0

POSMIČNA BRZINA [mm/min]	3150,0	2835,0	2520,0	2205,0	1890,0
SNAGA [W]	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0
TLAK PLINA [bar]	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
UDALJENOST MLAZNICE OD OBRADKA [mm]	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
VRIJEME REZANJA [sec]	39,0	81,0	126,0	174,0	227,0

Izvor: Izradio autor

Tablica 14. Prikaz reznih površina i parametara rezanja za čelik DD 12 debljine 3,0 mm

MATERIJAL UZORKA	DEBLJINA LEĆE [ " ]	DEBLJINA UZORKA [mm]	MLAZNICA [mm]	TEHNIČKI PLIN	LASER
DD 12	7,50	3,0	ST 2	N <sub>2</sub>	FIBER
36.					
37.					
38.					

39.					
40.					
REDNI BROJ UZORKA	UZORAK 36.	UZORAK 37.	UZORAK 38.	UZORAK 39.	UZORAK 40.
POSMIČNA BRZINA [%]	100,0	90,0	80,0	70,0	60,0
POSMIČNA BRZINA [mm/min]	4500,0	4050,0	3600,0	3150,0	2700,0
SNAGA [W]	2000,0	2000,0	2000,0	2000,0	2000,0
TLAK PLINA [bar]	12	12	12	12	12
UDALJENOST MLAZNICE OD OBRADKA [mm]	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
VRIJEME REZANJA [sec]	15,70	16,50	17,90	20,20	22,90

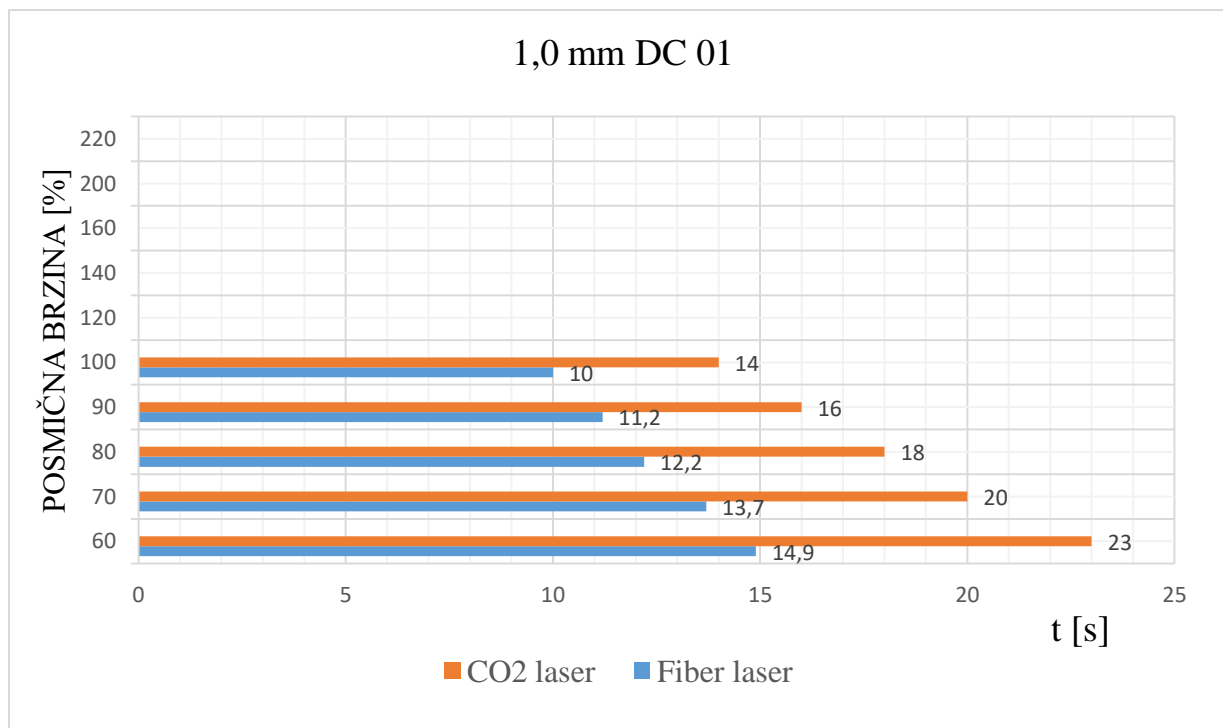
*Izvor: Izradio autor*

Kod rezanja uzoraka niskougličnih čelika DD 12 debljine 3,0 mm postupno smanjivanje posmične brzine dalo je sljedeće rezultate. Kod CO<sub>2</sub> lasera na uzorcima 32 i 33 vidljiva su

oštećenja rubova rezne površine dok je ostatak površine ostao gladak i neoštećen. Najbolje rezultate dalo je rezanje posmičnom brzinom 2205,0 mm/min, snage 1200,0 W te s tlakom tehničkog plina 1,6 bara. Kod fiber lasera najbolja rezna površina dobivena je rezanjem posmičnom brzinom 4500,0 mm/min, snagom 2000,0 W te tlakom tehničkog plina 12,0 bara. Na uzorcima 39 i 40 možemo vidjeti rubna oštećenja reznih površina što je rezultiralo smanjenjem posmične brzine. Osim rubova ostatak rezne površine je ostao relativno gladak i neoštećen.

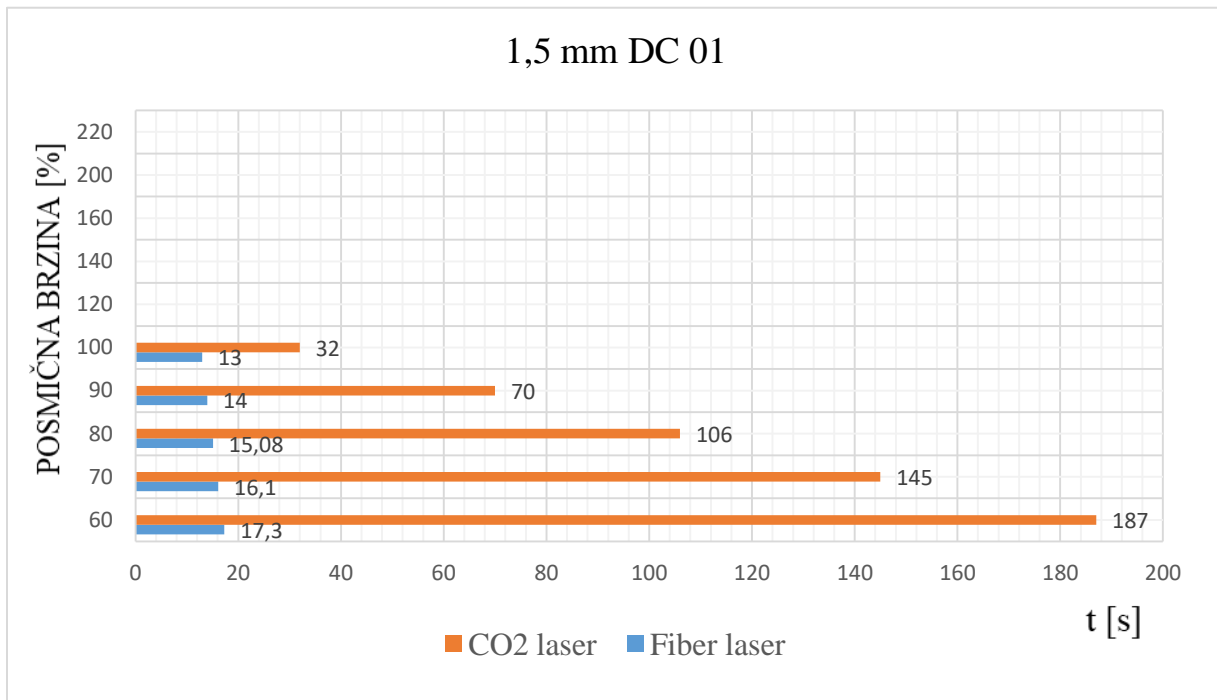
Razlika između CO<sub>2</sub> i Fiber lasera je u vremenu potrebnom da se uzorak izreže što nam daje uštedu u troškovima proizvodnje kao i upotreba dušika smanjuje nastanak reakcije s pomoćnim plinom što je vidljivo kod uzorka koji su rezani s CO<sub>2</sub> laserom.

Graf 1. Prikaz vremena potrebnog za rezanje uzorka debljine 1,0 mm



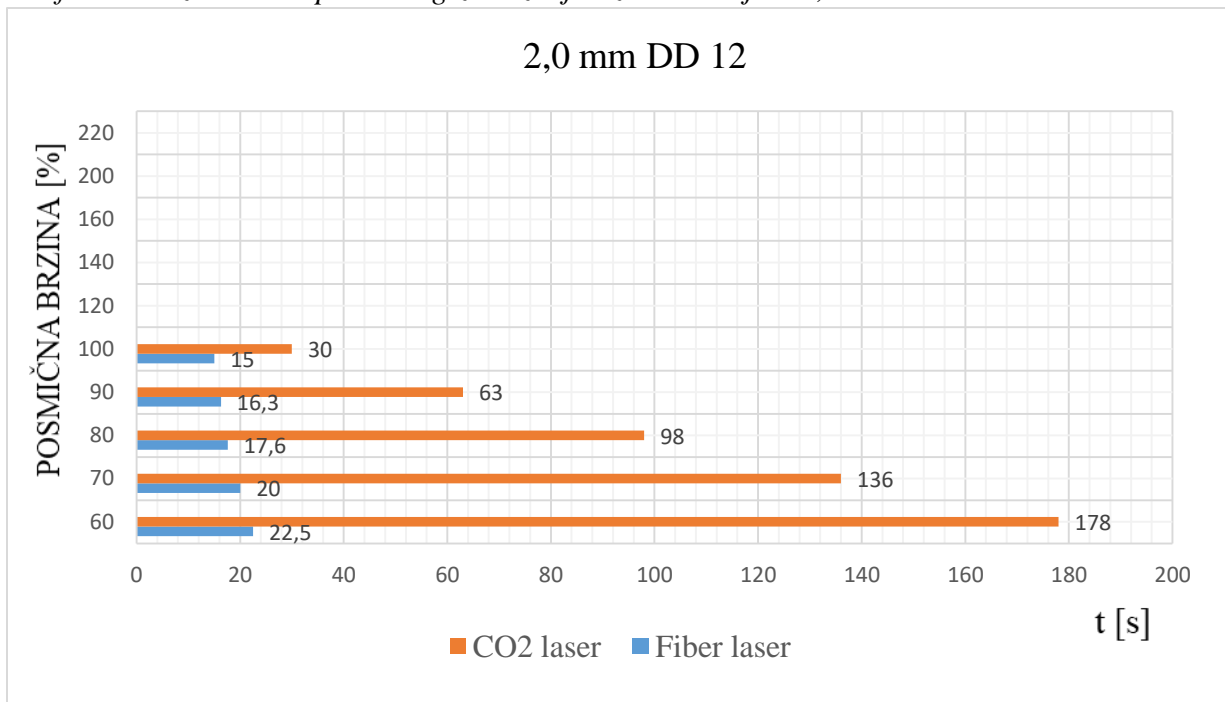
Izvor: Izradio autor

Graf 2. Prikaz vremena potrebnog za rezanje uzorka debljine 1,5 mm



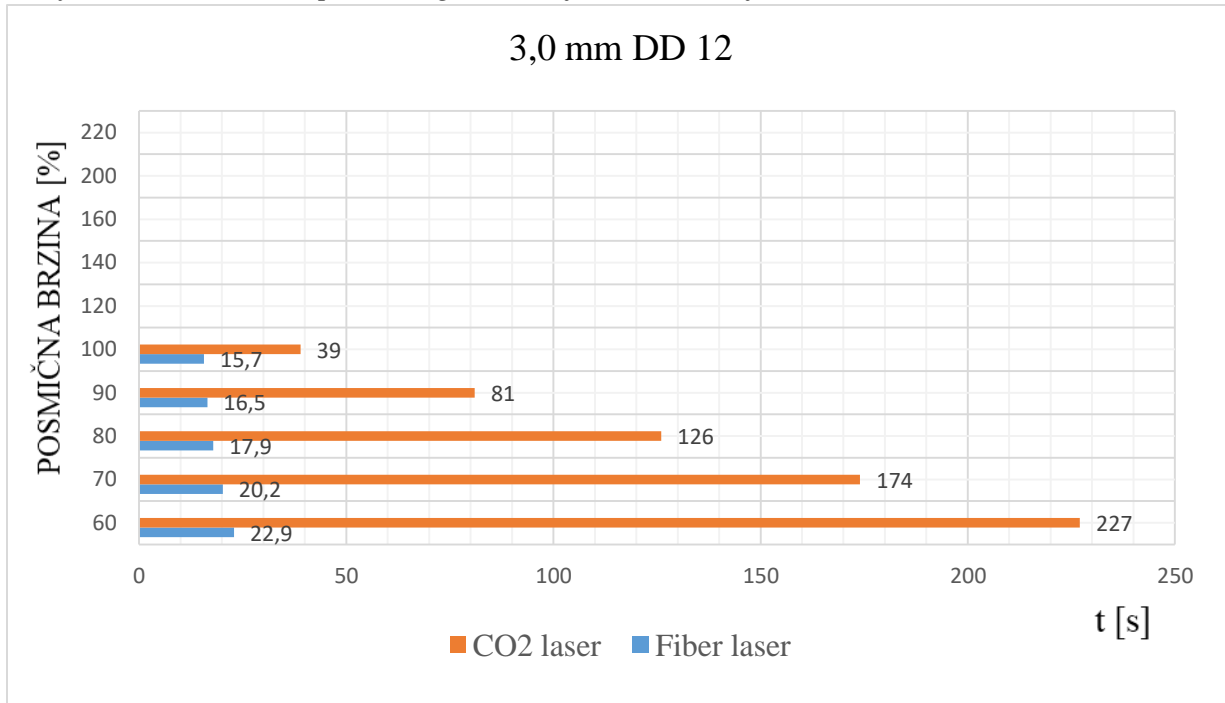
Izvor: Izradio autor

Graf 3. Prikaz vremena potrebnog za rezanje uzorka debljine 2,0 mm



Izvor: Izradio autor

Graf 4. Prikaz vremena potrebnog za rezanje uzorka debljine 3,0 mm

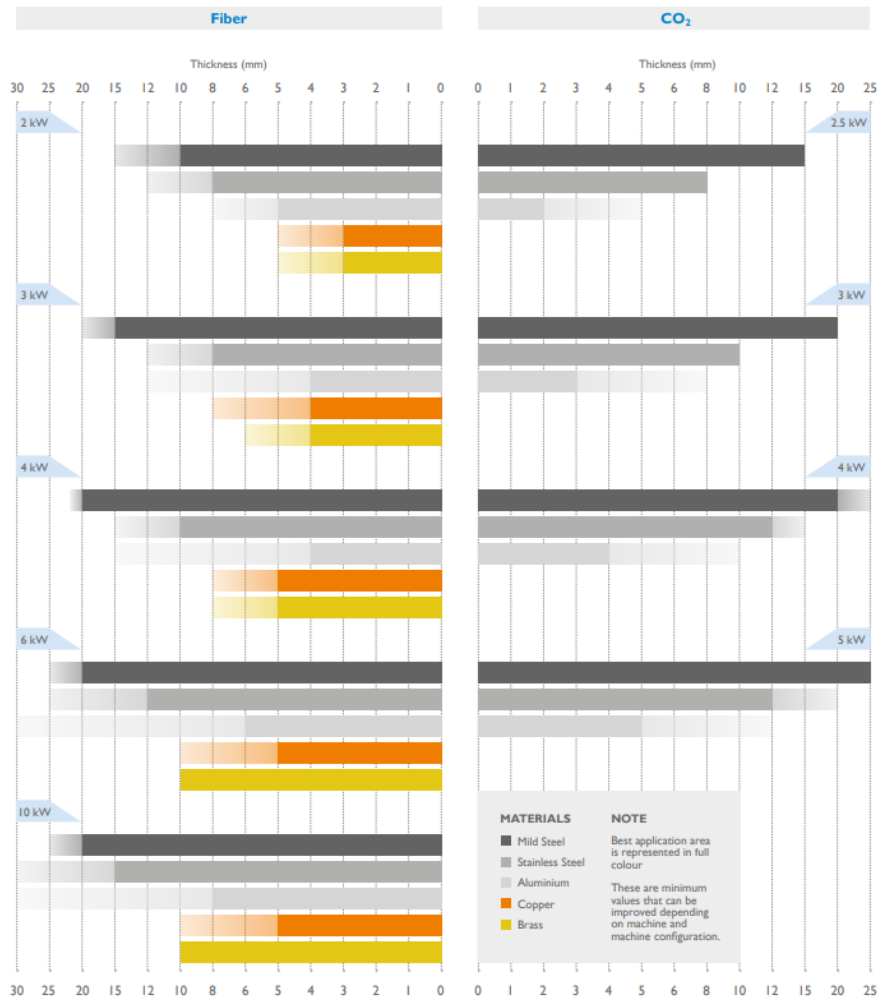


Izvor: Izradio autor

Iz priloženih grafova i tablica možemo doći do zaključka da je u svih četrdeset uzoraka različitih debljina (1,0 mm, 1,5 mm, 2,0 mm i 3,0 mm) rezanih različitim posmičnim brzinama vrijeme potrebno za rezanje jednog uzorka uvijek bilo veće prilikom rezanja CO<sub>2</sub> laserom tj. vrijeme potrebno za rezanje jednog uzorka uvijek je bilo manje na Fiber laseru. Na grafu br.1. prikazano je da vrijeme rezanja prilikom najveće optimalne posmične brzine između CO<sub>2</sub> i Fiber lasera različito za 4,0 s tj. vrijeme rezanja na Fiber-u kraće je 4 s od rezanja na CO<sub>2</sub> laseru. Graf br.2 prikazuje razliku 19 s prilikom rezanja uzorka najvećom optimalnom posmičnom brzinom na CO<sub>2</sub> i Fiber laseru. Grafovi br. 3.i 4.potvrđuju zaključke koji proizlaze-iz grafova 1.i 2., a to je da je brzina rezanja uzorka na Fiber laseru duplo brža nego rezanje na CO<sub>2</sub> laseru.

Svi grafovi mogu nam potvrditi da se razlika u vremenu rezanja CO<sub>2</sub> laserom u usporedbi s Fiber laserom višestruko povećava kada se smanjuje posmična brzina rezanja, pa se može zaključiti da se razlika povećava s debljinom uzorka koji smo rezali. Na grafu br.4.vidljivo je da vrijeme potrebno za izrezati uzorak pri 60,0 % posmične brzine daje razliku od 204,10 s

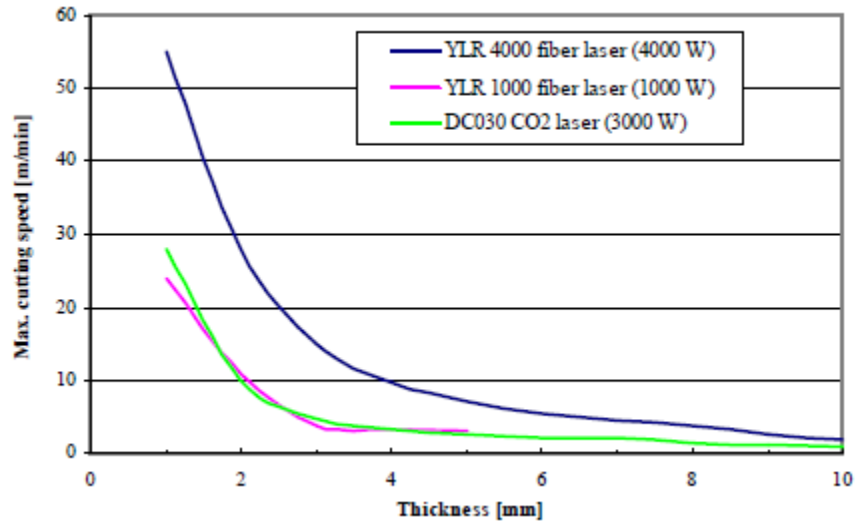
tj. rezanje Fiber laserom brže je od rezanja CO<sub>2</sub> laserom za 204,10 s. Razlike u vremenu rezanja mogu se iščitati i iz drugih grafova sa različitim posmičnim brzinama i uvijek je očigledna razlika u vremenu rezanja uzorka, Fiber laser je u svim slučajevima bio brži nego CO<sub>2</sub> laser. Slika br.18. pokazuje minimalne vrijednosti fiber i CO<sub>2</sub> lasera koje se mogu poboljšati ovisno o stroju i konfiguraciji stroja. Punom bojom označena je najbolje područje primjene stroja.



Slika 19. Područje najbolje primjene fiber i CO<sub>2</sub> lasera<sup>36</sup>

<sup>36</sup> <<https://laserfiber.tech/wp-content/uploads/Prima-Power-lasery-2D.pdf>>. (14.08.2019.)





Slika 20. Usporedba različite brzine rezanja fiber i CO<sub>2</sub> lasera<sup>37</sup>

Slika br.20. prikazuje graf koji uspoređuje maksimalne brzine rezanja fiber i CO<sub>2</sub> lasera. Iz grafa se može iščitati isto što smo i potvrdili u istraživanju u ovom radu, maksimalna brzina opada s povećanjem debljine materijala te se veće brzine rezanja postižu se upotrebom fiber lasera i korištenjem dušika kao pomoćnog plina.

<sup>37</sup> <CO2 Laser cutting parameters>, (29.07.2019.)

## 7. ZAKLJUČAK

Lasersko rezanje je jedan od najraširenijih postupaka koji se koriste za rezanje metala i nemetalnih materijala. U posljednjem desetljeću laserska tehnologija se veoma brzo razvija, a stopa rasta je od 15,0 do 20,0 % svake godine. Napredak laserske tehnologije obrade i strojeva za lasersko rezanje postaje sve više upotrebljavanija metoda obrade metala u budućnosti. Strojevi za rezanje metala laserom donose promjene u procesima obrade cijevi i pločastog materijala. Najveću razliku u odnosu na druge tehnologije čine veoma velika brzina obrade, visoka preciznost, prilagodljivost te automatsko upravljanje. Ulaganje u nove tehnologije i primjena istih veoma je bitna za opstanak poduzeća na tržištu jer omogućava bržu proizvodnju i bolju kvalitetu proizvoda, a samim time i konkurentnost na tržištu.

U eksperimentalnom djelu rada provedeno je rezanje niskougličnih čelika DC 01 i DD 12 uz pomoć lasera Platino fiber i Platino CP 3000. Rezani su uzorci različitih debljina 1,0, 1,5, 2,0 i 3,0 mm sa različitim tehničkim plinovima. Laserom CP 3000 rezani su uzorci s kisikom ( $O_2$ ), dok je kod lasera fiber korišten dušik ( $N_2$ ). U pokusu su se radile usporedbe između lasera. Na oba lasera rezalo se po pet uzoraka za svaku debljinu s različitim plinom, svaki od uzoraka rezan je sa različitom posmičnom brzinom koja se smanjivala za svaki uzorak za po 10,0% i bilježila su se vremena potrebna da laser izreže uzorak te se promatrala kvaliteta rezne površine uzoraka.

Na osnovi provedenog istraživanja može se zaključiti da je u svim slučajevima fiber laser naspram  $CO_2$  lasera dao bolje rezultate u brzini rezanja, tj. vrijeme potrebno da se uzorak u potpunosti izreže. Rezne površine također su bile su bolje kvalitete u svim slučajevima kod fiber lasera, jer se kao tehnički plin koristio dušik koji je inertan plin koji ne podržava gorenje. Nasuprot tome kisik izaziva oksidaciju, eksotermnu reakciju i povećanje temperature rezanja. Dušik sprječava razvoj visoke temperature čime se sprječavaju moguća oštećenja materijala koji se reže. Upotrebom dušika povećava se brzina i snaga rezanja i smanjuje se vjerovatnost nastanka korozivnog reza. Brzina rezanja prilikom upotrebe kisika jednaka je za laserske rezače bili oni snage 1500,0 W ili 6000,0 W.

Naposljetku može se zaključiti da će u skoroj budućnosti prevladavati fiber laseri nad CO<sub>2</sub> laserima zbog boljih reznih sposobnosti kao i zbog veće brzine rezanja, a i razvojem tehnologije počeli su se proizvoditi fiber laseri većih snaga što do sada nije bio slučaj. Naime, na tržištu se već mogu pronaći fiber laseri snage 10,0 kW i više. Važno je napomenuti da se CO<sub>2</sub> laseri neće u potpunosti ukloniti iz industrije, zbog jeftinijeg plina koji koriste kao i zbog toga što potrošnja dušika s debljinom lima raste pa rastu i sami troškovi proizvodnje. Osim toga, potrebni su veći tlakovi, što nije slučaj kod CO<sub>2</sub> lasera koji daju bolje rezultate vremena rezanja kod debljih limova i kod proizvoda kod kojih nije toliko bitna kvaliteta reza i nije potrebna dodatna obrada.

## LITERATURA

### Knjige

1. Silfast, W.: Laser fundamentals, Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
2. Breck Hitz, C. et.al.: Introduction to Laser Tehnology, John Wiley & Sons, New Jersey, 2012.
3. Tarasov L.V.: Laser physics and applications, Mir publishers, Moscow, 1986.
4. Pires Norberto J., Loureiro A., Bolmsjo G.: Welding Robots, Springer, London, 2006.

### Internet izvori

1. <http://www.laserfest.org/lasers/how/ruby.cfm>
2. [https://hr.wikipedia.org/wiki/Gra%C4%91a\\_lasera](https://hr.wikipedia.org/wiki/Gra%C4%91a_lasera)
3. <https://www.racunalo.com/elektromagnetsko-zracenje-utjecaj-na-zdravlje-ljudi-i-regulativa-u-hrvatskoj>
4. <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=59121>
5. <http://www.astro.caltech.edu/~lah/ay105/pdf/Laser-Guide.pdf>
6. <https://perg.phys.ksu.edu/vqm/laserweb/Ch-2/F2s11p1.htm>
7. <http://www.yourarticlelibrary.com/welding/laser-welding/diagram-of-carbon-dioxide-lasers-metallurgy/97400>
8. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Combined-fiber\\_laser\\_diagram.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Combined-fiber_laser_diagram.jpg)
9. <http://www.u-tanklaser.com/en/laser-generator-cst-64p.html>
10. <http://14.ymngy.rund-ums-backen.de/fseg/laser-head-diagram.html>
11. <https://www.machinemfg.com/laser-cutter-components>
12. [https://hr.wikipedia.org/wiki/%C5%BDari%C5%A1na\\_duljina](https://hr.wikipedia.org/wiki/%C5%BDari%C5%A1na_duljina)

13. <http://krasa.hr/galerija.html>

14. <https://f.nordiskemedier.dk/2zbtza0tj3jk28ya.pdf>

15. <https://laserfiber.tech/wp-content/uploads/Prima-Power-lasery-2D.pdf>

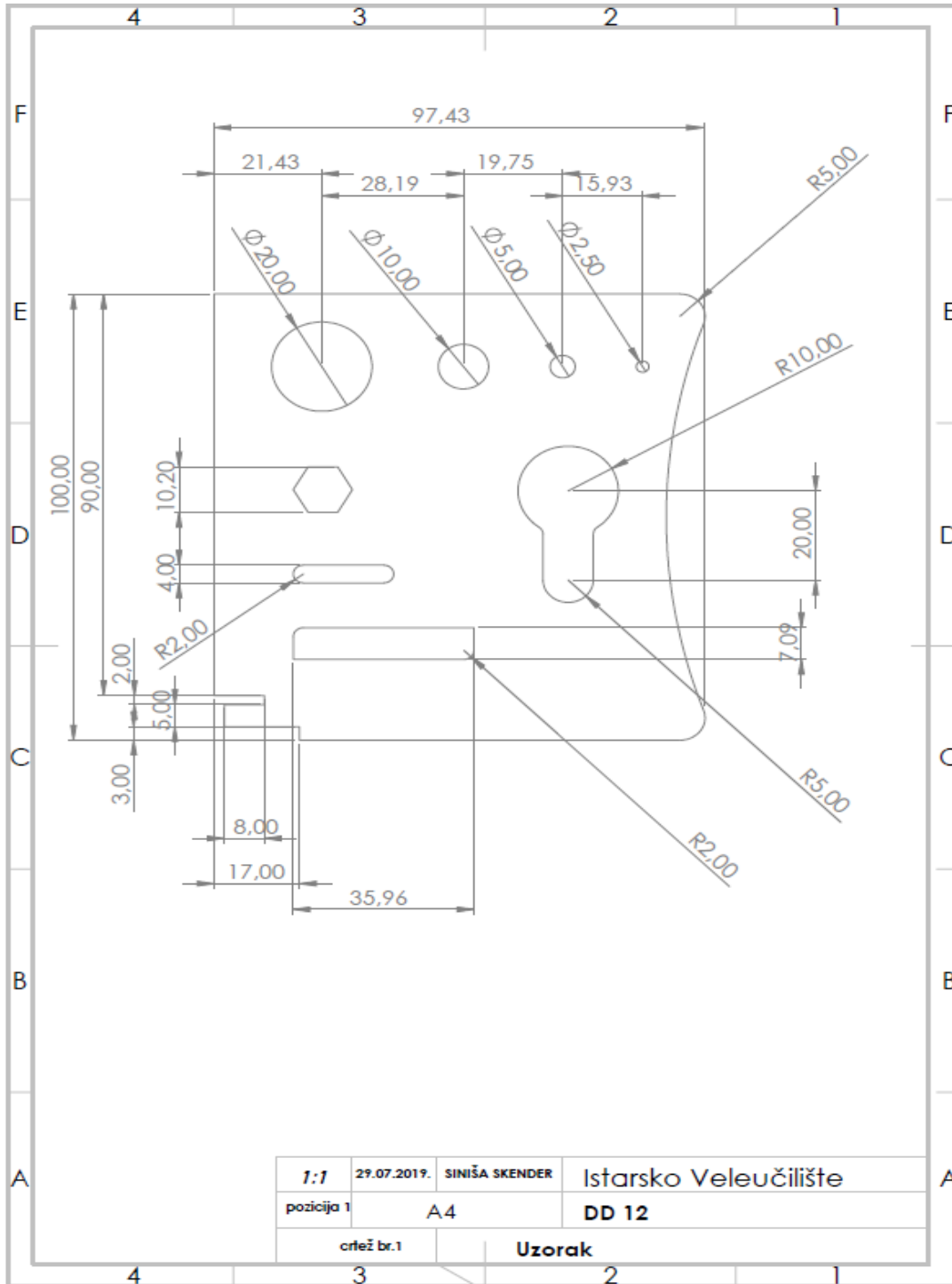
16. <https://www.hgtech-laser.com/>

## **Ostali izvori**

1. Natarajan R.: An experimental and theoretical study of heat transfer effects during a laser-cutting process, Iowa State University, 1990, Ames
2. Hrvoje Skenderović: Laseri, fotonski snopovi, Institut za fiziku, Zagreb
3. Catherine Wandera: Lappeenranta university of technology, Laser cutting of austenitic stainless steel with a high quality laser beam, 2006.


# PRILOZI

Prilog 1. Nacrt uzorka korištenog za lasersko rezanje



Izvor: Izradio autor

Prilog 2. Nesting korišten prilikom obrade uzoraka strojevima za lasersko rezanje

REPORT CAD/CAM MAESTRO NESTING						
	Sheet	1/1	Total Sheets	1	JOB	
	Date	03/08/2019 09:49:37	Machine	PLTHS1530_CP400	probaReport	
	Comments					
*SHT5 --proba.ISO* REPEATING 1						
*SHT5 --proba.ISO* PROPERTIES*						
Material	MS	Thickness	3	Weight(kg)	105.975	
X Dimension	3000(107.7208)	Y Dimension	1500(635.0025)	Intances Num.	1	
Scrap(kg)	104.854	Scrap(%)	98.942	Cutting Time	00:00:01	
*SHT5 --proba.ISO* ICONS						
ID	Icon Name	Quantity	Cuttings	Cutting Time	Description	Weight(kg)
1	PROBA\proba	6	9	00:00:00	proba	0.187

Izvor: Izradio autor