



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN METODE KOREKSI BENTUK
OUTPUT LASER DIODA 450-nm DAN
KARAKTERISASI KEBUTUHAN INTENSITAS
SERTA *BURNING TIME* PADA PROSES *ENGRAVING***

TESIS

LIN PRASETYANI

1506776446

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM MAGISTER TEKNIK**

DEPOK

JUNI 2017



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN METODE KOREKSI BENTUK
OUTPUT LASER DIODA 450-nm DAN
KARAKTERISASI KEBUTUHAN INTENSITAS
SERTA *BURNING TIME* PADA PROSES *ENGRAVING***

TESIS

LIN PRASETYANI

1506776446

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM MAGISTER TEKNIK ELEKTRO

KEKHUSUSAN ELEKTRONIKA DAN FOTONIKA

DEPOK

JUNI 2017

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Lin Prasetyani

NPM : 1506776446

Tanda Tangan :



Tanggal : 02, Juni 2017

LEMBAR PERSETUJUAN

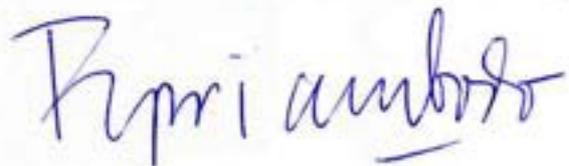
Tesis dengan judul:

**PENGEMBANGAN METODE KOREKSI BENTUK *OUTPUT* LASER
DIODA 450-nm DAN KARAKTERISASI KEBUTUHAN INTENSITAS
SERTA *BURNING TIME* PADA PROSES *ENGRAVING***

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Magister Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Kekhususan Teknik Elektronika dan Fotonika, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan disetujui untuk diajukan dalam Tesis.

Depok, 02 Juni 2017

Dosen Pembimbing



Dr. Ir. Purnomo Sidi Priambodo, M.Sc

NIP: 0407050192

ABSTRACT

Name : Lin Prasetyani

Study Programe : Electro

Title: *450nm Laser Diode Beam Shaping For Repairing Burning Footprint in Engraving Process*

In the process of engraving the use of high-power lasers are rife in use today. The most commonly used high power lasers are gas lasers such as CO₂, Nd: YaG and also semiconductor, laser diodes. Laser diodes have some disadvantages such as wide divergence angles, astigmatism and elliptical beam profile. These deficiencies cause poor beam profile quality. Therefore it is necessary to do beam correction at the output diode to reduce the ratio of the ellipse it has. A common method of correction is to use two cylindrical lenses to correct the horizontal and vertical axes.

In this paper use this ray tracing method for focus setting, the distance on the cylinder lenses and the focusing lens are used to reduce the ellipse ratio and obtain the desired beam size. The experimental results of the beam correction method were observed in two ways; (1) observation of spot burning with digital microscope and (2) calculate the result of photo using MATLAB. The results of both methods show a reduction in the elliptical ratio. The reduction of the ellipse ratio is from 1.43 to 1.14 on the observation of burning. In addition, there is also characterization of the need for intensity to burning time of some material objects.

Keywords: engraving; diode laser; beam profile; beam shape; elliptical; cylindrical lenses

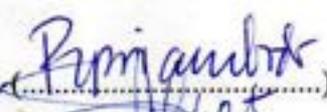
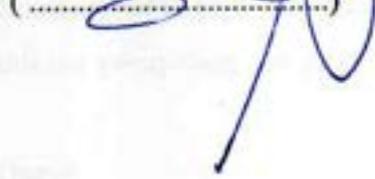
HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh:

Nama : Lin Prasetyani
NPM : 1506776446
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Tesis : Pengembangan Metode Koreksi Bentuk *Output*
Laser Dioda 450-nm dan Karakterisasi Kebutuhan
Intensitas Serta *Burning Time* Pada Proses
Engraving

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Kekhususan Elektronika dan Fotonika, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir.Purnomo Sidi Priambodo, M.Sc. (.....) 
Penguji : Prof.Dr.Ir. Djoko Hartanto, M.Sc (.....) 
Penguji : Prof.Dr.Ir. Harry Sudiby, M.Sc (.....) 
Penguji : Dr.Eng.Arief Udhiarto, S.T., M.T. (.....) 

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : ... Juni 2017

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Lin Prasetyani
NPM : 1506776446
Program Studi : Teknik Elektronika dan Fotonika
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

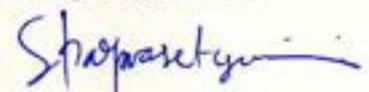
**PENGEMBANGAN METODE KOREKSI BENTUK *OUTPUT* LASER DIODA
450-nm DAN KARAKTERISASI KEBUTUHAN INTENSITAS SERTA *BURNING*
TIME PADA PROSES *ENGRAVING***

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : Depok, 02 Juni 2017

Yang Menyatakan



(Lin Prasetyani)

KATA PENGANTAR

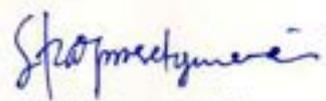
Puji syukur yang sebesar-besarnya atas kehadiran Allah SWT atas karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini. Penulisan Tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik pada Program studi Elaktronika dan Fotonika Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Penulis menyadari tanpa bantuan berbagai pihak, maka Tesis ini akan sulit terselesaikan. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terimakasih kepada:

- 1) Bapak Purnomo Sidi Priambodo, PhD. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mendukung dan mengarahkan dalam penyusunan Tesis ini.
- 2) Dosen – dosen Teknik Elaktro yang telah banyak membantu, bertukar pikiran dan memberikan masukan dalam penulisan Tesis ini.
- 3) Orang tua (alm) dan mertua yang telah memberikan doa pada penyelesaian Tesis ini.
- 4) Winardi Gumilang (suami) dan Khasyiu'rrahman Ibrahim (anak) yang telah banyak membantu dan mendukung dalam penyelesaian Tesis ini.
- 5) Teman-teman seperjuangan di Program Studi Teknik Elektro Kekhususan Elektronika dan Fotonika Universitas Indonesia angkatan 2015.
- 6) Serta seluruh pihak yang turut membantu kelancaran perancangan penelitian ini yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Akhir kata, penulis berharap semoga Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga Tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu Teknik Elektro program studi Elektronika dan Fotonika selanjutnya.

Depok, 02 Juni 2017


(Lin Prasetyani)

ABSTRAK

Nama : Lin Prasetyani

Program Studi : Teknik Elektro

Judul: Pengembangan Metode Koreksi Bentuk *Output* Laser Dioda 450-nm dan Karakterisasi Kebutuhan Intensitas Serta *Burning Time* Pada Proses *Engraving*

Pada proses *engraving* penggunaan laser berdaya tinggi marak digunakan saat ini. Laser daya tinggi yang sering digunakan adalah laser gas seperti CO₂, Nd:YAG dan laser diode. Laser diode memiliki beberapa kekurangan diantaranya sudut divergensi lebar, astigmatisme dan *beam profile* yang tidak ideal yang berbentuk *elips*. Kekurangan tersebut menyebabkan kualitas *beam profile* yang buruk. Oleh karena itu perlu dilakukan koreksi *beam* pada *output* diode untuk mengurangi rasio *elips* yang dimilikinya. Metode koreksi yang umum dilakukan adalah dengan menggunakan dua lensa silinder untuk melakukan koreksi pada sumbu horisontal dan vertikal.

Pada tesis ini telah dikembangkan metode koreksi output beam berbasis pada *ray tracing analysis* untuk menghitung struktur susunan lensa yang meliputi pengaturan fokus dan jarak antara lensa – lensa silinder yang digunakan untuk mengurangi rasio *elips* serta lensa pemfokus untuk mendapatkan ukuran beam yang diinginkan. Hasil experiment terhadap metode koreksi *beam* diamati melalui dua cara yaitu; (1) pengamatan *burning spot* dengan mikroskop digital dan (2) menghitung hasil foto menggunakan MATLAB. Hasil kedua metode ini menunjukkan pengurangan rasio *elips*. Pengurangan rasio *elips* dari 1.43 menjadi 1.14 pada pengamatan *burning spot*. Selain itu, dilakukan pula karakterisasi kebutuhan intensitas terhadap waktu pembakaran beberapa objek material.

Kata kunci: Engraving ; laser dioda; beam profile; lensa silinder

DAFTAR ISI

LAMAN JUDUL.....	II
LAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	III
MBAR PERSETUJUAN	IV
LAMAN PENGESAHAN	V
LAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	VI
TA PENGANTAR	VII
STRAK.....	VIII
STRACT.....	IX
FTAR ISI.....	X
FTAR GAMBAR	XIII
FTAR TABEL.....	XV
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 RUMUSAN MASALAH	2
1.3 TUJUAN PENELITIAN	3
1.4 BATASAN MASALAH	3
1.5 METODOLOGI PENELITIAN	3
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN	4
BAB 2 LANDASAN TEORI DAN <i>STATE OF THE ART</i>	5
2.1. PENGOLAHAN MATERIAL.....	5
2.1.1. <i>Engraving (Pengukiran)</i>	5
2.1.2. <i>Sejarah Proses Engraving (Pengukiran)</i>	6
2.1.3. <i>Mesin CNC Engraving</i>	7
2.1.4. <i>Cutting Kerf</i>	7
2.2. LASER.....	8
2.2.1. <i>Laser Dioda</i>	8
2.2.2. <i>Parameter pada Laser Engraving</i>	9
2.2.3. <i>Lensa Silinder</i>	11
2.2.4. <i>Beam pada Keluaran</i>	11
2.3. PERBAIKAN BENTUK <i>BEAM</i> DAN KOREKSI ASTIGMATISME.....	13
2.3.1. <i>Penggunaan Dua Lensa Silinder</i>	13
2.3.2. <i>Metode Pengukuran Fokus Beam Spot</i>	14
2.4. <i>BEAM PROFILE</i>	15
2.5.1. <i>Parameter Dimensi (β)</i>	15
2.5.2. <i>Beam Waist (w_0)</i>	16
2.5.3. <i>Panjang Rayleigh (Z_0)</i>	17

2.5.4.	<i>Lebar Spot Pembakaran (D_s)</i>	17
2.5.5.	<i>Sudut Divergensi (θ)</i>	17
2.5.	GEOMETRI LENSA	18
2.6.1.	<i>Kurvatur Lensa (R)</i>	18
2.6.2.	<i>Prinsip Fermat</i>	18
3.	BAB 3 RANCANGAN DAN EXPERIMENT	20
3.1	SPESIFIKASI ALAT	20
3.1.1.	<i>Laser Dioda</i>	20
3.1.2.	<i>Mesin CNC Pengukir (Engraving)</i>	20
3.1.3.	<i>Lensa Silinder</i>	22
3.1.4.	<i>Material Objek</i>	23
3.1.5.	<i>Perangkat Pengukuran</i>	23
3.2	PERHITUNGAN GEOMETRI LENSA	25
3.2.1.	<i>Geometri lensa silinder ($L1$ dan $L2$)</i>	26
3.2.2.	<i>Geometri lensa objective</i>	27
3.3	EXPERIMENT	28
3.3.1.	<i>Skema Experiment</i>	28
3.3.2.	<i>Realisasi Experiment</i>	30
3.4	KARAKTERISASI	31
3.4.1.	<i>Parameter Tegangan</i>	31
3.4.2.	<i>Hasil pembakaran laser (burn spot) pada kertas</i>	32
3.4.3.	<i>Variasi Objek Material</i>	32
3.5	PERHITUNGAN BEAM PROFILE DAN GEOMETRI LENSA	32
3.5.1.	<i>Beam Profile</i>	32
3.5.2.	<i>Geometri Lensa</i>	33
3.5.3.	<i>Perbandingan Hasil Perhitungan dan Experiment</i>	34
	BAB 4 HASIL DAN ANALISA	35
4.1	HASIL DAN ANALISA KARAKTERISASI PARAMETER LISTRIK	35
4.1.1	<i>Hasil pengamatan terhadap arus dengan tegangan tetap</i>	35
4.1.2	<i>Analisa hasil pengamatan terhadap pengukuran arus</i>	36
4.2	HASIL DAN ANALISA KARAKTERISASI UKURAN KELUARAN LASER	36
4.2.1.	<i>Hasil pengamatan menggunakan mikroskop digital</i>	36
4.2.2.	<i>Analisa hasil pengamatan menggunakan mikroskop digital</i>	38
4.2.3.	<i>Hasil pengamatan menggunakan bantuan software MATLAB</i>	38
4.2.4.	<i>Analisa hasil menggunakan MATLAB</i>	40
4.2.5.	<i>Analisa Hasil Rasio Elips</i>	41
4.3	HASIL DAN ANALISA KARATERISASI CUT KERF LASER PADA OBJEK MATERIAL	41
4.3.1	<i>Bagian analisa hasil engraving laser</i>	41
4.3.2	<i>Hasil engraving laser</i>	42
4.3.3	<i>Analisa hasil engraving laser</i>	45
4.3.4	<i>Analisa Energi Laser</i>	47
4.4	HASIL DAN ANALISA KARAKTERISASI VARIASI OBJEK MATERIAL	48
4.4.1.	<i>Analisa hasil pembakaran berbagai jenis objek material</i>	49

BAB 5 KESIMPULAN	50
5.1 KESIMPULAN.....	50
DAFTAR ACUAN	XX

DAFTAR GAMBAR

- Gambar 2.1 Interaksi pada material 5*
- Gambar 2.2 Ilustrasi proses engraving 6*
- Gambar 2.3 Cutting Kerf 7*
- Gambar 2.4 Bagian – bagian laser 8*
- Gambar 2.5 Fabry perot laser dioda 9*
- Gambar 2.6 Fokus jauh dan fokus dekat 11*
- Gambar 2.7 Output diode laser 12*
- Gambar 2.8 Perbedaan sudut divergensi pada arah \backslash dan \perp 12*
- Gambar 2.9 (a) Lapisan aktiv sisi horisontal (b) Lapisan aktiv sisi vertikal 14*
- Gambar 2.10 (a) Hasil pembakaran pada kertas (b) Beam laser yang terpantul pada tembok/kertas 14*
- Gambar 2.11 Posisi beam waist 16*
- Gambar 2.12 Sudut Divergensi 17*
- Gambar 2.13 Prinsip Fermat 19*
- Gambar 3.1 Laser diode 20*
- Gambar 3.2 Mesin CNC Pengukir 21*
- Gambar 3.3 Perangkat Lunak Pengontrolan 21*
- Gambar 3.4 Geometri lensa silinder 1 22*
- Gambar 3.5 Geometri lensa silinder ke-2 23*
- Gambar 3.6 Material 23*
- Gambar 3.7 Mikroskop digital 24*
- Gambar 3.8 Perangkat lunak mikroskop digital 24*
- Gambar 3.9 Penggunaan Matlab 25*
- Gambar 3.10 Konfigurasi lensa silinder 25*
- Gambar 3.11 Skema lensa silinder L1 dan L2 26*
- Gambar 3.12 Collimated ray tracing pada lensa silinder L1 dan L2 27*
- Gambar 3.13 Skema pada lensa objective 27*
- Gambar 3.14 Focused ray tracing pada lensa objective 28*

- Gambar 3.15 Skema penempatan lensa pada experiment 28*
- Gambar 3.17 Posisi laser dan lensa dalam experiment 30*
- Gambar 3.18 Pengukuran arus dan tegangan 31*
- Gambar 4.1 Hasil titik pembakaran tanpa melakukan beam shaping 37*
- Gambar 4.2 Titik pembakaran setelah lensa ke-3 37*
- Gambar 4.3 (1) Beam keluaran laser sebelum diatenuasi 38*
- Gambar 4.4 (2) Beam keluaran laser setelah diatenuasi 39*
- Gambar 4.5 (3) Beam keluaran laser setelah lensa silinder 39*
- Gambar 4.6 (4) Beam keluaran laser setelah lensa fokus 40*
- Gambar 4.7 Tampak atas 42*
- Gambar 4.8 Tampak samping 42*
- Gambar 4.9 Hasil Engraving pada kecepatan engraving 1500 mm/mnt 43*
- Gambar 4.10 Hasil Engraving pada kecepatan engraving 500mm/mnt 43*
- Gambar 4.11 Hasil Engraving pada kecepatan engraving 200 mm/mnt 44*
- Gambar 4.12 Grafik analisa kedalaman engraving laser 46*
- Gambar 4.13 Grafik analisa lebar area engraving laser 46*
- Gambar 4.14 Grafik analisa ablasi engraving laser 48*
- Gambar 4.15 Hasil Pembakaran pada berbagai jenis objek material 48*

DAFTAR TABEL

<i>Tabel 2.1 Perkembangan penggunaan laser pada proses engraving</i>	6
<i>Tabel 2.2 Jenis – jenis mesin CNC engraving</i>	7
<i>Tabel 3.1 Hasil perhitungan jarak fokus</i>	29
<i>Tabel 3.2 Hasil perhitungan ukuran beam</i>	32
<i>Tabel 3.3 Hasil perhitungan geometri lensa silinder L1 dan L2</i>	33
<i>Tabel 3.4 Hasil perhitungan geometri lensa objective</i>	34
<i>Tabel 3.5 Hasil perbandingan dan error</i>	34
<i>Tabel 4.1 Hasil karakterisasi arus</i>	35
<i>Tabel 4.2 Perhitungan luas titik pembakaran lensa ke-1</i>	36
<i>Tabel 4.3 Perhitungan luas titik pembakaran lensa ke-2</i>	37
<i>Tabel 4.4 Analisa hasil kalkulasi MATLAB</i>	40
<i>Tabel 4.5 Analisa rasio elips</i>	41
<i>Tabel 4.6 Hasil engraving laser</i>	45
<i>Tabel 4.7 Ablasi pada masing – masing kecepatan</i>	47
<i>Tabel 4.8 Hasil pembakaran laser</i>	49

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada industri manufaktur, pemrosesan material dilakukan menggunakan mesin-mesin seperti *welding* dan *engraving*. Mesin yang digunakan pada awalnya berupa mesin konvensional yang menggunakan alat pemotong (*cutting tool*) dengan material besi ataupun baja. Alat pemotong tersebut perlu diasah supaya tidak tumpul serta hasil yang diperoleh pada proses permesinan tersebut memiliki kualitas yang baik. Semakin lama alat pemotong tersebut semakin pendek dan tidak dapat digunakan lagi. Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan setelah ditemukannya teknologi LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) pada tahun 1970-an maka banyak penelitian yang membuat penggunaan alat pemotong pada pemrosesan material tersebut beralih menggunakan laser berdaya tinggi. Pemanfaatan teknologi laser pada pemrosesan material sebagai alat pemotong memiliki keuntungan yaitu dapat menghemat konsumsi penggunaan alat pemotong karena tidak perlu diasah, memiliki tingkat ketelitian tinggi dan mampu meminimalisir limbah *scrap* yang dihasilkan pada proses konvensional.

Pemanfaatan laser berdaya tinggi pada proses manufaktur *engraving* menjadi hal yang marak dikembangkan saat ini. Pemrosesan material yang akan dibahas pada makalah ini adalah proses mengukir (*engrave*). Proses *engrave* adalah suatu proses untuk mengikis bagian kecil dari suatu material sampai kedalaman tertentu. Laser berdaya tinggi yang sering digunakan pada proses *engraving* yaitu laser gas CO₂, Nd:YAG, dan laser semikonduktor yang berupa laser diode. CO₂ dan Nd:YAG laser biasanya digunakan karena dimanfaatkan sebagai *pulse* laser sehingga dapat dimampatkan dan diatur waktu penggunaannya. Sementara itu laser dioda umum dimanfaatkan karena harganya murah, bentuknya yang mudah diatur dan disesuaikan dengan kebutuhan, mudah dioperasikan dan memiliki efisiensi tinggi. Namun demikian laser diode memiliki beberapa kekurangan yang cukup signifikan diantaranya sudut divergensi yang lebar, astigmatisme dan *beam profile* yang tidak ideal. Seperti halnya laser daya tinggi yang lainnya kekurangan inilah yang menyebabkan bentuk keluaran laser diode tidak ideal (*elips*). Kekurangan tersebut menyebabkan kualitas *beam profile* yang dihasilkan memiliki kualitas kurang baik. Untuk proses manufaktur, khususnya pemotongan dan *engraving* bentuk dari keluaran laser sangat penting. Hal ini berkaitan

dengan hasil pemotongan ataupun *engraving* pada material baik itu lebar ataupun kedalaman *engrave* yang sering disebut dengan istilah *cut kerf*.

Untuk mendapatkan *cut kerf* yang baik, selain tergantung pada material yang digunakan, kecepatan *engrave* juga tergantung pada perbaikan kualitas *beam* yang dihasilkan oleh laser. Perbaikan laser *beam* dapat dilakukan melalui proses pensejajaran dan pemfokusan laser *beam* dengan menggunakan berbagai teknik penggunaan lensa yaitu; penggunaan dua lensa silinder, penggunaan prisma anamorphic, penggunaan lensa mikro silindis dan penggunaan fiber optik single mode. Berdasarkan teknik-teknik tersebut penggunaan dua lensa silinder adalah teknik yang paling umum, biaya rendah dan sederhana untuk dilakukan.

Pada Tesis ini penulis menganalisis kualitas *beam* profile melalui *footprint* yang dihasilkan pada proses pembakaran dari laser dioda. *Footprint* tersebut penulis gunakan sebagai acuan *cut kerf* yang akan terbentuk saat sinar laser pada laser diode yang digunakan mengenai material. Penulis melakukan rekayasa dan analisa perbaikan kualitas *beam* yang dihasilkan oleh laser dioda 450nm. Penggunaan lensa – lensa silinder untuk mengubah bentuk *footprint* yang tidak ideal (*elips*) menjadi lebih ideal (bulat) karena mampu mengurangi sudut divergensi yang terbentuk pada *fast divergent axis*. Bentuk bulat yang diperoleh diharapkan layak digunakan untuk proses *engraving*.

Proses *engraving* akan dilakuakn pada sebuah mesin CNC. Sehingga perlu dilakukan karakterisasi terhadap laser diode yang digunakan karena pada umumnya dioda laser memiliki karakteristik unik seperti toleransi manufaktur besar dibandingkan dengan jenis laser lainnya. Hal tersebut dapat menyebabkan laser dioda dari jenis yang sama dapat berperilaku sedikit berbeda, dalam hal panjang gelombang, daya, *threshold*, ukuran *beam waist*, *divergence*, dan *focusing*. Hal tersebut yang mendasari dilakukannya metode koreksi *beam* dan *ray tracing* pada pengaturan fokus dan jarak lensa untuk mengurangi rasio *elips*. Karakterisasi yang dilakukan berupa kebutuhan intensitas dan waktu pembakaran untuk beberapa jenis objek material dari laser diode yang digunakan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan pada latar belakang yang ada maka dapat dirumuskan beberapa masalah yang dikaji, yaitu:

1. Analisis *beam profile* pada *laser diode*
2. Rekayasa berupa *beam reshaping* untuk mendapatkan *ideal-round beam* dari *original-elliptical beam* pada *laser diode*
3. Karakterisasi intensitas, daya dan waktu pembakaran yg dibutuhkan oleh 450-nm laser diode pada beberapa material

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini adalah:

1. Melakukan koreksi *beam* pada *output* laser dioda 450nm yang digunakan pada proses *engraving* untuk mengurangi rasio *elips*.
2. Karakterisasi intensitas, daya dan waktu pembakaran yg dibutuhkan oleh 450-nm laser diode pada beberapa material

1.4 Batasan Masalah

Agar penulisan Tesis ini menjadi lebih terarah serta dengan dukungan data dan peralatan yang tersedia, maka analisis dan *experiment* pembentukan keluaran laser 450nm untuk menghasilkan *footprint* ideal yang dapat digunakan pada proses *engraving* ini memiliki batasan permasalahan. Analisis proses *engraving* menggunakan laser diode 450-nm yang meliputi proses:

1. Analisis *beam profile* pada *laser diode*
2. Rekayasa berupa *beam reshaping* untuk mendapatkan *ideal-round beam* dari *original-elliptical beam* pada *laser diode*
3. Karakterisasi intensitas, daya dan waktu pembakaran yang dibutuhkan oleh 450-nm laser diode pada beberapa material yaitu hardboard, akrilik dan plastik.

1.5 Metodologi Penelitian

Pada Tesis ini metodologi penelitian yang penulis gunakan adalah:

1. Studi kepustakaan: dilakukan dengan mengumpulkan data dan informasi terkait dari berbagai sumber seperti buku, jurnal, internet dan makalah ilmiah lainnya.

2. *Experiment*: dilakukan dengan melakukan simulasi *experiment* menggunakan perangkat – perangkat yang telah disiapkan.
3. Analisa: melakukan analisa terhadap hasil dari *experiment* yang telah dilakukan dengan membandingkan data yang diperoleh terhadap teori yang ada.

.6 Sistematika Penulisan

Penelitian ini dipaparkan kedalam 5 (Lima) Bab sebagai berikut:

Bab 1 Pendahuluan

Bab ini berisi latar belakang permasalahan, identifikasi masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika penulisan

Bab 2 Landasan Teori dan *State of the Arts*

Bab ini berisi landasan teori yang digunakan dalam melakukan *experiment*

Bab 3 Rancangan dan *Experiment*

Bab ini menjelaskan *set up experiment* yang dilakukan untuk melakukan *beam shaping*

Bab 4 Hasil dan Analisa

Bab ini berisi tentang data hasil *experiment* serta analisa

Bab 5 Kesimpulan

Bab ini memberikan kesimpulan yang diberikan penulis

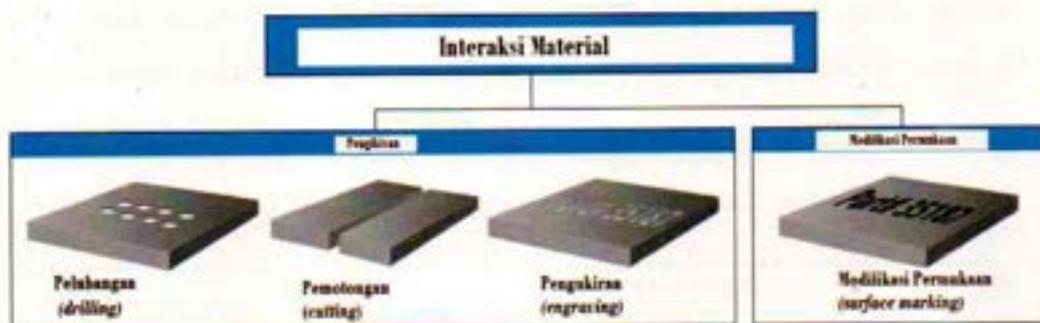
BAB 2

LANDASAN TEORI DAN *STATE OF THE ART*

2.1. Pengolahan Material

Pengolahan material didefinisikan sebagai serangkaian langkah atau "unit operasi" yang digunakan dalam perubahan material baku menjadi barang jadi. Proses pengolahan material pada dasarnya terjadi interaksi antara alat (*tool*) dengan material. Interaksi tersebut dibagi menjadi dua bentuk yaitu: proses pengikisan (*ablation*) dan modifikasi permukaan (*surface modification*).

Proses pengikisan sendiri terdiri dari proses pelubangan (*drilling*), pemotongan (*cutting*), dan *engraving* (*engraving*). Pada Gambar 2.1 berikut perbedaan diantara proses pengolahan material tersebut ditampilkan.



Gambar 2.1 Interaksi pada material

Berdasarkan Gambar 2.1, maka dapat dibedakan interaksi antara *tool* dengan material. Pada mulanya pengolahan material dilakukan dengan menggunakan *tools* yang berbahan dasar besi atau baja. Untuk pembahasan dalam tesis ini interaksi yang dibahas adalah ablasi dalam proses *engraving* dengan menggunakan laser sebagai *tool*.

2.1.1. *Engraving* (Pengkiran)

Engraving adalah proses pengikisan sebagian material dari permukaan sampai pada batas kedalaman tertentu. Bentuk proses *engraving* dengan *tool* laser dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Ilustrasi proses engraving

Berdasarkan Gambar 2.2, pada proses *engraving* terdapat geometri panjang, lebar serta kedalaman yang dilakukan karakterisasi terhadapnya.

2.1.2. Sejarah Proses *Engraving* (Pengukiran)

Proses mulanya, *engraving* dilakukan secara manual menggunakan tangan. Perkembangan teknologi menjadikan proses ini kemudian dilakukan menggunakan mesin dengan besi serta baja sebagai alat potong (*tool*). Setelah ditemukan laser maka banyak *experiment* penggunaan laser pada proses ini. Berdasarkan perkembangannya proses *engraving* menggunakan laser dilihat seperti Tabel 2.1 berikut:

Tabel 2.1 Perkembangan penggunaan laser pada proses *engraving*

Tahun	Tokoh	Keterangan	Tempat
1916	Einstein	Penemuan emisi cahaya	
1954	Arthur Schawlow	Penemuan maser (Microwave ...)	
1958	Townes dan Schawlow	Penemuan Laser (Light ...)	Bell laboratory
1960	Theodore Maiman	Laser ruby -> optik laser pertama	
1977	Gordon Gould	orang pertama yang menggunakan kata "laser"	
1980	Bill Lawson	Mengembangkan laser untuk interaksi material	LM8
1980	Tom "Rudy" zarden	Seniman membeli mesin Bill untuk engrave	
1981	Lyle "Pop" Lehner	Mesin laser engrave pertama diperjual belikan	LM8
2000-an		Digunakan CO ₂ dan Nd:Yag laser untuk engrave	
2004		Mulai digunakan laser dioda pada proses engrave	

Berdasarkan pada perkembangannya maka penggunaan laser sebagai alat potong sebagian besar didominasi oleh penggunaan laser gas diantaranya yaitu, CO₂ dan Nd:YAG. Selain laser gas, semikonduktor laser saat ini mulai marak

digunakan pada *engraving*. Keuntungan penggunaan laser ini adalah bentuknya yang *compact* dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan yang ada.

2.1.3. Mesin CNC Engraving

Mesin CNC (*Computerize Numerical Control*) adalah mesin yang menggunakan program dari komputer sebagai pengontrol yang memberikan perintah mesin. Pada proses *engraving* sendiri, mesin CNC memiliki beberapa tipe yang didefinisikan dalam Tabel 2.2 berikut.

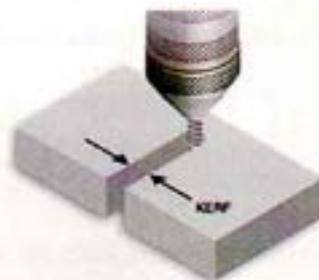
Tabel 2.2 Jenis – jenis mesin CNC *engraving*

Jenis	Nama Mesin CNC	Keterangan
1	Spindle Cartesian	benda kerja (permukaan) diam dan optik laser bergerak di arah X dan Y, mengarahkan sinar laser untuk menggambar vektor.
2	Meja kerja Cartesian	laser optik diam dan benda (meja) kerja bergerak. Kadang-kadang benda kerja bergerak di sumbu Y dan X. Biasanya digunakan untuk benda kerja berbentuk silinder
3	Galvo	laser dan benda yang statis dan cermin galvo melakukan gerakan dan mengarahkan sinar laser ke permukaan benda kerja. Laser engravers menggunakan teknologi ini dapat bekerja dalam modus vektor atau raster ¹⁾

Pada makalah ini mesin yang digunakan adalah mesin CNC dengan jenis spindle Cartesian dimana benda kerja diam sementara spindle yang mencengkram alat potong yang bergerak pada aksis X, Y dan Z.

2.1.4. Cutting Kerf

Cutting kerf didefinisikan sebagai lebar material yang terkikis oleh proses pemotongan. *Cut kerf* juga mendefinisikan lebar dari mata pisau (*tool*) yang digunakan untuk memotong. Keterangan lebih jelasnya pada Gambar 2.3 berikut.

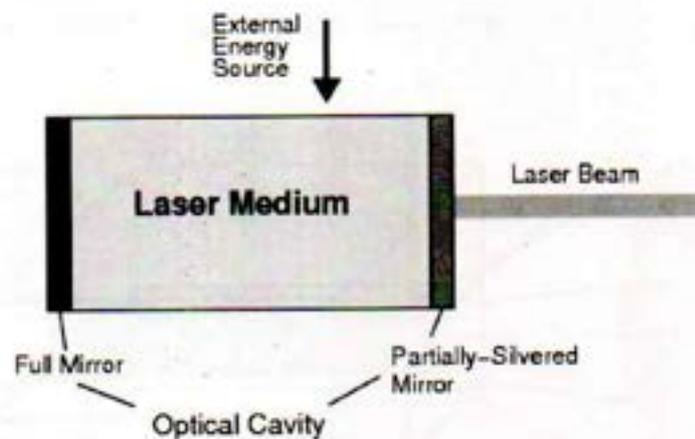


Gambar 2.3 Cutting Kerf

Berdasarkan pada Gambar 2.3 tersebut, jika alat potong diganti dengan menggunakan laser maka *cutting kerf* ditentukan oleh lebar *output* laser yang digunakan.

2.2. LASER

LASER merupakan kependekan dari *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Laser adalah alat yang memancarkan sinar cahaya yang koheren melalui proses amplifikasi optik. Ada banyak jenis laser termasuk laser gas, laser *fiber*, laser *solid state*, laser *dye*, dioda laser dan laser *excimer*. Secara umum, semua jenis laser memiliki bagian – bagian laser seperti dibawah ini:



Gambar 2.4 Bagian – bagian laser

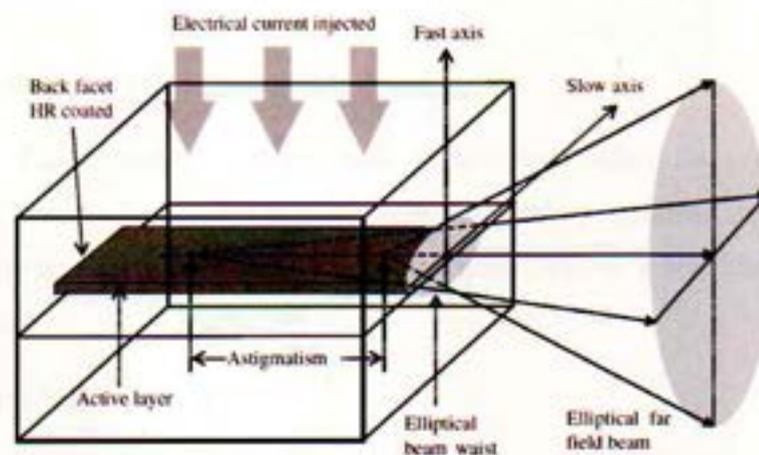
Berdasarkan Gambar 2.4 bagian laser dibagi menjadi empat bagian optik yaitu: (1) *gain* (laser) medium, (2) *pumping* (*external*) gain, (3) full reflector, (4) partial reflector, (5) laser *beam*. Pada Tesis ini, penulis memanfaatkan penggunaan diode laser sehingga pembahasan teori dilakukan lebih mendalam mengenai diode laser. Penjelasan mengenai diode laser ada pada Sub Bab berikutnya.

2.2.1. Laser Dioda

Dioda laser dapat ditemukan pada berbagai aplikasi seperti: komunikasi serat optik, pencatatan/pembacaan data, penginderaan, pengukuran, dan pengolahan material. Hal ini dikarenakan dioda laser dapat dijangkau pada

berbagai pilihan panjang gelombang dari ungu hingga inframerah, diameter *output* kecil, memiliki efisiensi lebih dari 30%, dapat dioperasikan oleh baterai, dan dapat dimodulasi hingga Giga hertz. Namun *output* dioda laser memiliki beberapa kekurangan seperti, divergensi besar, bentuk *output elips* dan astigmatism, sehingga sulit untuk melakukan manipulasi dibandingkan dengan jenis lain.

Beam pada dioda laser dipancarkan dari lapisan aktif, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5. Sisi belakang lapisan aktif dilapisi cermin refleksi tinggi (HR), sisi depan lapisan aktif *uncoated* dengan reflektifitas alami sekitar 0.3. Lapisan aktif memiliki indeks bias lebih tinggi dari indeks bias sebagian besar material aktif di sekitarnya dan bertindak sebagai *waveguide*.



Gambar 2.5 Fabry perot laser dioda

Pada umumnya laser dioda memiliki lapisan aktif (*active layer*) yang tipis. Sinar laser yang dipancarkan pada Gambar 2.5 memiliki mode tunggal, melintang, berbentuk lonjong (*elips*), yang sangat berbeda dan astigmatik. Besarnya diameter *elips* yang ditunjukkan oleh Gambar 2.5 adalah ilustrasi.

2.2.2. Parameter pada Laser Engraving

- a) Operasi pada laser : Pulsa dan Gelombang berjalan (Continuous wave)

Jenis operasi laser memiliki pengaruh pada proses *engraving*. Pada laser sendiri terdapat dua mode operasi. Kedua mode tersebut dikenal dengan

mode pulsa dan mode gelombang berjalan (*continuous wave*, CW). Penggunaan mode ini mempengaruhi proses *engraving* dan kecepatan pengikisan material benda kerja.

Meskipun kecepatan pengikisan tergantung pada daya yang dimiliki laser, namun mode CW dapat dihasilkan kecepatan ablasi yang lebih konstan dibandingkan dengan mode pulsa. Pada mode pulsa dapat dihasilkan kualitas ablasi material yang lebih baik dibandingkan dengan mode CW.

Pada makalah ini laser yang digunakan adalah laser diode dengan mode CW. Hasil yang dianalisa adalah kedalaman pengikisan pada material pada kecepatan *engraving* tertentu dibandingkan dengan waktu pembakaran laser.

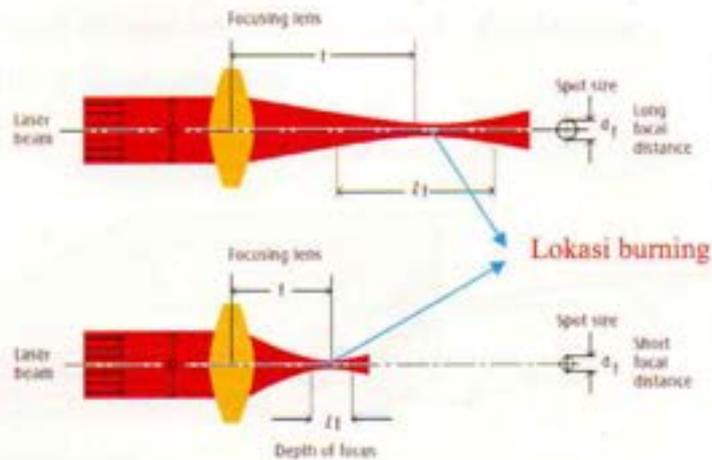
b) Daya pada laser dan intensitas

Pada umumnya sebuah laser terparameter dalam daya yang dimiliki (*watt*). Namun demikian yang berpengaruh dalam pengikisan material adalah konsentrasi dari power pada suatu luas area (watt/m^2) atau disebut dengan intensitas.

c) Panjang fokus pada lensa

Hasil pembakaran ditentukan oleh beberapa parameter diantaranya yaitu jarak titik fokus (f), panjang gelombang laser (λ), diameter sinar sebelum mengenai lensa (D).

Hal ini akan mempengaruhi diameter dari hasil pembakaran pada material. Seperti pada Gambar 2.6. Keuntungan dengan menggunakan fokus dekat maka ukuran hasil pembakaran akan lebih kecil dibandingkan penggunaan fokus jauh.



Gambar 2.6 Fokus jauh dan fokus dekat

Berdasarkan Gambar 2.6, pengaturan fokus lensa sangat mempengaruhi pembentukan lebar diameter beam. Pada proses *engrave* dibutuhkan spot pembakaran kecil.

d) Panjang gelombang sinar laser

Penyerapan *beam* pada material sangat tergantung dari panjang gelombang yang dimiliki oleh laser. Laser dengan panjang gelombang tertentu dapat dikatakan cocok untuk pengikisan suatu material (karena terabsorpsi sempurna) namun tidak untuk material lain. Sebagai contoh material kaca tidak cocok dengan laser pada panjang gelombang *visible* sampai *infrared*, oleh karena itulah perlu dilakukan karakterisasi material.

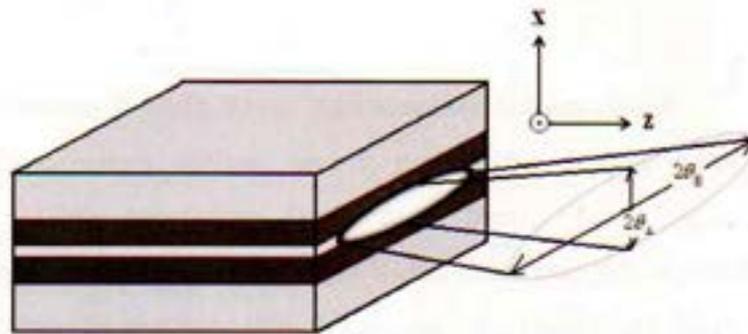
2.2.3. Lensa Silinder

Lensa silinder adalah jenis lensa yang memiliki jari-jari yang berbeda pada sumbu X dan Y. Lensa ini melakukan koreksi pada satu bidang saja dan biasanya digunakan untuk melakukan perbaikan karena astigmatisme.

2.2.4. Beam pada Keluaran

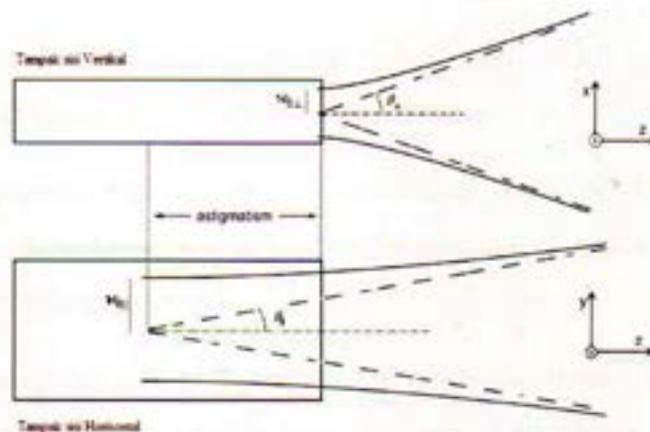
Secara umum semikonduktor laser memancarkan *output* dengan profile *elips* sehingga memiliki sudut divergensi pada dua arah melintang yang berbeda.

Hal ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 dan Gambar 2.8. Bentuk *elips* ini yang mengakibatkan astigmatisme.



Gambar 2.7 Output diode laser

Astigmatisme dikoreksi dengan melakukan pemfokusan pada sistem optik sinar laser pada *spot* kecil. Di sisi lain, untuk aplikasi di mana ekspansi *beam* yang dibutuhkan, *astigmatisme* di tingkat μm dapat diabaikan untuk pensejajaran sinar laser. Gambar 2.8 berikut mendeskripsikan perbedaan sudut divergensi antara sudut pandang sejajar (horizontal) dan tegak lurus (vertical) terhadap lapisan aktif.



Gambar 2.8 Perbedaan sudut divergensi pada arah \parallel dan \perp

Berdasarkan Gambar 2.7 dan 2.8 dapat dilihat bahwa sudut divergen pada fast divergent axis ditulis sebagai θ_{\parallel} sementara sudut divergen pada slow divergent axis ditulis sebagai sudut θ_{\perp} . Karena astigmatisme disebabkan oleh

divergensi *beam* yang berbeda pada dua arah maka untuk membentuk keluaran ideal dilakukan satu per satu pada setiap axis.

2.3. Perbaikan Bentuk *Beam* dan Koreksi Astigmatisme

Pada beberapa aplikasi seperti manufaktur, bentuk bulat *output beam* dioda laser lebih diinginkan dari sebuah bentuk *beam elips*. Hal tersebut menjadikan *Circularizing beam elips* dioda laser menjadi masalah teknis yang perlu dilakukan. Di sisi lain, sebuah astigmatisme pada *beam* dioda laser kadang-kadang menjadi hal yang menguntungkan. Namun demikian beberapa teknik banyak digunakan dapat melakukan perbaikan bentuk *beam* keluaran dari laser diode yang berbentuk *elips* sekaligus koreksi astigmatisme. Teknik yang biasanya dilakukan yaitu;

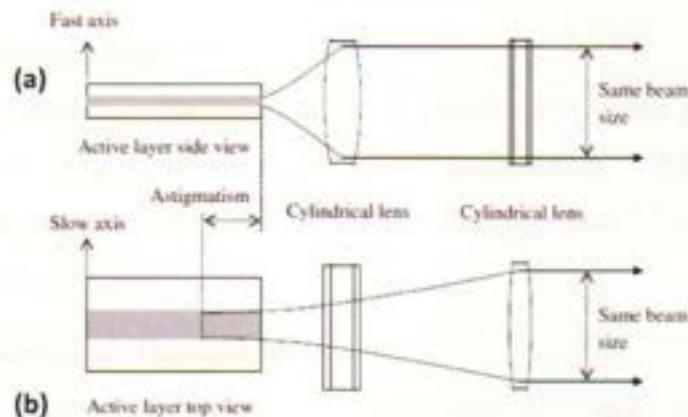
- 1) Menggunakan lensa silinder untuk mensejajarkan dan melakukan pembentukan kembali keluaran laser yang masih *elips* dengan tujuan melakukan koreksi terhadap astigmatisma yang terjadi
- 2) Menggunakan sepasang prisma *anamorphic* dan corong berbentuk lingkaran untuk membulatkan *beam* keluaran
- 3) Menggunakan lensa silinder micro khusus untuk pembentukan kembali keluaran laser yang masih *elips* dengan tujuan melakukan koreksi terhadap astigmatisma yang terjadi.

Pada makalah ini metode penggunaan dua lensa silinder dilakukan sebagai metode *beam shaping* dan koreksi untuk menghasilkan *output* yang lebih bulat. Metode tersebut digunakan untuk melakukan koreksi pada *fast divergent axis* dan diharapkan dapat mereduksi dan mengoreksi ukuran *beam* yang dihasilkan oleh laser dioda.

2.3.1. Penggunaan Dua Lensa Silinder

Berbicara tentang *collimating*, *circularizing* dan mengoreksi *astigmatisme* untuk *beam* pada dioda laser, hal pertama yang umum dilakukan adalah

menggunakan lensa silinder yang ditempatkan secara berurutan. Penempatan lensa-lensa silinder yang digunakan ditunjukkan oleh Gambar. 2.9

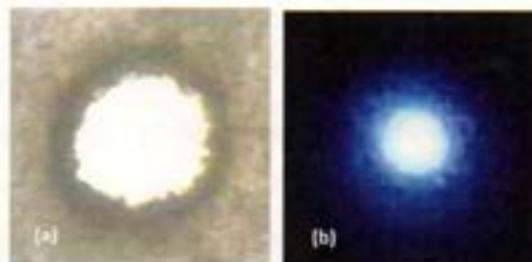


Gambar 2.9 (a) Lapisan aktif sisi horisontal (b) Lapisan aktif sisi vertikal

2.3.2. Metode Pengukuran Fokus Beam Spot

Untuk mengetahui lebar *beam* pada proses pengikisan material terdapat beberapa metode yang umum digunakan, beberapa diantaranya yaitu metode elektronik dan non elektronik.

Pada makalah ini akan dibahas metode yang digunakan adalah metode non elektronik dimana cara yang dilakukan dengan melalui pengamatan visual *beam* laser yang dipantulkan pada material seperti Gambar 2.10 (a) dan 2.10 (b) dan *beam* spot pada pembakaran suatu material.



Gambar 2.10 (a) Hasil pembakaran pada kertas (b) Beam laser yang terpantul pada tembok/kertas

Berdasarkan Gambar 2.10 metode pertama yang penulis gunakan adalah mengamati diameter *beam* pada hasil pembakaran di media kertas. Metode kedua adalah melalui hasil foto yang dianalisa menggunakan perangkat lunak, pada

makalah ini digunakan MATLAB. Kedua hasil tersebut kemudian dibandingkan untuk mengetahui efektifitas proses pembentukan ulang *beam* laser diode.

2.4. *Beam Profile*

Sebelum melakukan perbaikan bentuk *output* laser pada *experiment* yang dilakukan, maka beberapa parameter perlu untuk dihitung nilainya untuk membandingkan hasil sebelum dan setelah pengaturan fokus *beam* laser. Berikut parameter yang digunakan.

2.5.1. Parameter Dimensi (β)

Berdasarkan pada buku laser *beam technique and theory* (Fred M. Dickey), teknik dasar *beam* shaping dibagi menjadi dua bagian yaitu:

1) *Filed mapper*

Dilakukan pada *beam* dengan distribusi *field* yang diketahui seperti pada *single mode beam* dan memiliki sensitivitas tinggi pada *beam alignment* serta dimensinya. *Field mapping* meliputi: teori difraksi, teknik geometrical, optimalisasi teknik.

2) *Beam integrator*

Dilakukan pada *beam* yang koheren dan *multimode*, dimana sensitivitasnya sangat kecil pada *alignment* dan ukuran *beam*. *Beam integrator* meliputi: pendekatan *diffuse*, pendekatan *beam integrator* langsung. Pada makalah ini yang digunakan adalah teknik *field mapping* karena sumber laser diode yang digunakan adalah *single mode*. Sedangkan parameter untuk mengetahui pengukuran kuantitatif dari efek difraksi dan validasi *design* geometri dinyatakan dalam β . Parameter tersebut dirumuskan dalam:

$$\beta = \frac{2w_0w_1}{\lambda \cdot f} \quad \dots (2.1)$$

Dimana β adalah parameter efek difraksi, w_0 adalah *beam waist output* dari lensa yang digunakan, w_1 input dari laser sebelum lensa, λ adalah panjang

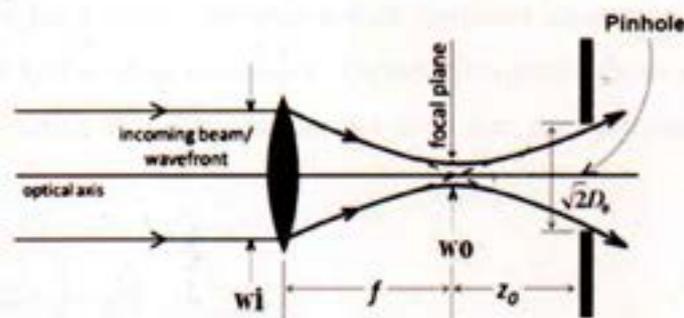
gelombang laser, f jarak fokus. Untuk nilai β yang dihasilkan berdasarkan pada buku teorinya dapat diklasifikasikan menjadi:

- ✓ Jika $\beta < 4$ maka *beam* shaping tidak akan memperoleh nilai yang diinginkan
- ✓ Jika $4 < \beta < 32$ maka efek difraksi sangat signifikan dan hendaknya diikuti sertakan dalam pengembangan system *beam* shaping
- ✓ Jika $\beta > 32$ maka efek difraksi menjadi hal yang tidak signifikan untuk diperhitungkan.

2.5.2. *Beam Waist* (w_0)

Beam waist adalah berkas pinggang (atau berkas fokus) dari sinar laser adalah lokasi sepanjang arah propagasi dimana jari-jari *beam* memiliki nilai radius minimum. Berdasarkan Gambar 2.11 maka *beam waist* dapat dirumuskan dalam persamaan berikut:

$$w_0 = \frac{4\lambda f}{\pi w_i} \quad \dots (2.2)$$



Gambar 2.11 Posisi *beam waist*

Dimana w_i adalah diameter *wavefront* tepat di depan lensa penerima. w_0 adalah diameter pinggang *beam* (*beam waist*) pada titik fokus, f adalah panjang fokus dan λ adalah panjang gelombang. Pada Gambar 2.11 diperlihatkan *beam waist* suatu berkas setelah melewati lensa.

2.5.3. Panjang Rayleigh (Z_0)

Sementara itu, Panjang Rayleigh atau rentang Rayleigh adalah jarak sepanjang arah propagasi *beam* dari pinggang (*waist*) ke tempat di mana area penampang dua kali lipat dapat dirumuskan kedalam persamaan 2 berikut.

$$z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad \dots (2.3)$$

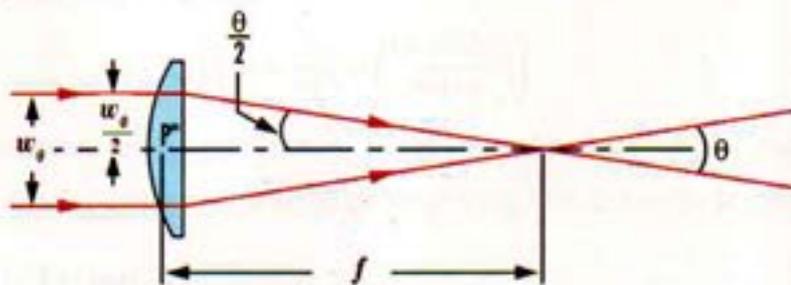
Dimana z_0 adalah panjang Rayleigh, w_0 adalah diameter *wavefront* tepat di depan lensa penerima. λ adalah panjang gelombang laser diode yang digunakan.

2.5.4. Lebar Spot Pembakaran (D_0)

$$D_0 = \frac{4\lambda}{\pi D} f \quad \dots (2.4)$$

2.5.5. Sudut Divergensi (θ)

Beam yang dipancarkan oleh laser terbatas pada sudut yang mengerucut agak sempit. Tapi, ketika *beam* terpancar keluar, perlahan-lahan menyimpang atau menyebar keluar. Untuk elektromagnetik, berkas divergensi adalah ukuran sudut dari peningkatan radius atau diameter dengan jarak dari *aperture* optik dari awal kemunculannya.



Gambar 2.12 Sudut Divergensi

Pada Gambar 2.12 adalah divergensi yang terjadi pada *beam* yang melalui lensa silinder. Berdasarkan Gambar 2.11 tersebut maka dapat diperoleh sudut divergensi dari *beam* yang telah melewati lensa silinder pada persamaan 3.

$$\theta = (\tan^{-1} \frac{w_0}{2f}) : 2 \quad \dots (2.5)$$

Dimana θ adalah sudut difergensi, w_0 adalah diameter wavefront tepat di depan lensa penerima, f adalah panjang fokus. Berdasarkan persamaan tersebut maka kita dapat menentukan diameter *output beam* dari lensa jika menggunakan sistem dua lensa dengan persamaan 6).

$$w_{o(1)} = 2f (\tan(\frac{\theta_1}{2})) \quad \dots (2.6)$$

2.5. Geometri Lensa

Pada proses *beam shaping* pemilihan lensa menjadi hal yang penting. Hal ini mempengaruhi ukuran dari *beam* yang kita hasilkan.

2.6.1. Kurvatur Lensa (R)

Kurvatur atau kelengkungan lensa silinder adalah geometri yang kita butuhkan untuk proses ini. Untuk perhitungan ini digunakan perbedaan index bias pada dua medium yang berbeda yaitu udara (n_1) dan lensa BK7 (n_2). Berikut adalah persamaan yang digunakan:

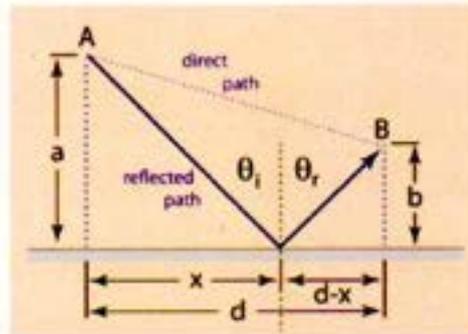
$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left\{ \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \left(\frac{(n - 1)t}{nr_1r_2} \right) \right\} \quad \dots (2.7)$$

Berdasarkan pada persamaan tersebut maka kita dapat melakukan kalkulasi untuk tebal lensa dan jarak antar lensa yang kita *design* pada *experiment*.

2.6.2. Prinsip Fermat

Prinsip Fermat: Cahaya mengikuti jalur yang memiliki waktu paling pendek. Berdasarkan Gambar 2.12 tentu saja garis lurus dari A ke B adalah waktu

singkat, namun hal tersebut terjadi tanpa refleksi. Hukum refleksi dapat diturunkan dari prinsip ini sebagai berikut:



Gambar 2.13 Prinsip Fermat

Berdasarkan Gambar 2.13 tersebut maka kita dapat membuat persamaan untuk jalur cahaya dari titik A ke B yaitu:

$$L = \sqrt{a^2 + x^2} + \sqrt{b^2 + (d-x)^2} \quad \dots (2.8)$$

Persamaan (2.8), digunakan untuk menghitung jarak yang dibutuhkan antara dua lensa. Saat cahaya tersebut telah melewati suatu lensa.

BAB 3 RANCANGAN DAN *EXPERIMENT*

3.1 Spesifikasi Alat

Untuk mendukung apa yang menjadi tujuan penulis maka pada *experiment* yang dilakukan dibutuhkan beberapa peralatan dan material. Berikut spesifikasi peralatan dan material yang digunakan.

3.1.1. Laser Dioda

Laser diode disini digunakan sebagai pengganti *graving tool*. Berdasarkan Gambar 3.1 berikut adalah laser diode yang digunakan:



Gambar 3.1 Laser diode

Berdasarkan pada *datasheet* laser yang ada, laser menggunakan daya sebesar 7.4 volt untuk lasing yang diwakili oleh dua buah baterai sebesar 3.7 volt yang disusun secara seri. Selain itu pada dicantumkan bahwa panjang gelombang (λ) *output* laser adalah 450-nm (*visible blue*). Daya yang diberikan oleh keluaran laser kurang lebih 5 watt. Sementara itu, disebutkan bahwa keluaran laser memiliki dimensi 500 – 10000 μm .

3.1.2. Mesin CNC Pengukir (*Engraving*)

Perangkat keras yang digunakan pada *experiment* ini adalah mesin pengukir CNC sederhana. Mesin tersebut memiliki tiga aksis *spindle* yaitu X, Y, dan Z. Aksis X digunakan untuk pergerakan spindle kanan dan kiri. Aksis Y untuk pergerakan spindle depan dan belakang sedangkan aksis Z adalah pengatur pergerakan spindle keatas dan ke bawah yang nantinya digunakan untuk

pengaturan jarak fokus laser. Gambar 3.2 berikut adalah mesin CNC yang digunakan.



Gambar 3.2 Mesin CNC Pengukir

Berdasarkan Gambar 3.2 tersebut berikut spesifikasi pada mesin:

Type	2D CNC <i>engrave</i>
Dimensi	400mm x 400mm
Sistem control	Mach3 CNC
Driver Motor	5 phase motor steperr
Input tegangan	220 VAC



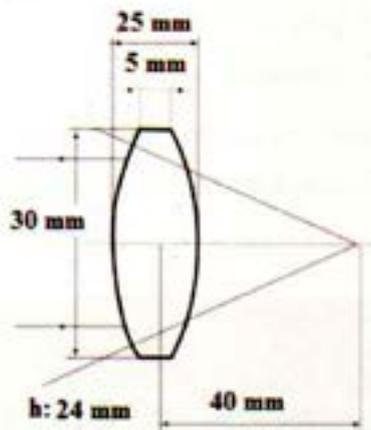
Gambar 3.3 Perangkat Lunak Pengontrolan

Sementara itu untuk melakukan pengontrolan terhadap mesin CNC tersebut dipergunakan perangkat lunak MACH3 pada komputer pengontrolnya. Sebelum program mesin dijalankan pada perangkat Mach3 tersebut maka sketsa Gambar 3.3, tulisan atau vector yang akan dibuat diubah terlebih dahulu ke dalam bahasa mesin (G, M dan S *code*) menggunakan perangkat lunak seperti *Vcard*, *Gerberfile*, dsb. Berikut adalah tampilan perangkat lunak yang digunakan:

3.1.3. Lensa Silinder

Pada *experiment* ini penulis menggunakan dua lensa silinder dengan spesifikasi sebagai berikut:

a) Lensa 1

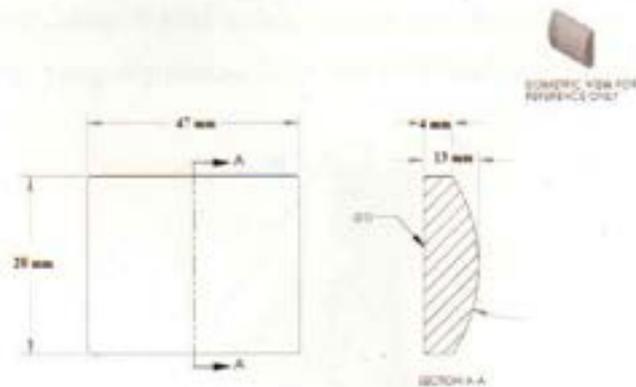


Gambar 3.4 Geometri lensa silinder 1

Berdasarkan Gambar 3.3, lensa yang digunakan adalah lensa cembung cekung. Lensa tersebut digunakan sebagai lensa silinder pertama untuk melakukan penjejajaran pada laser *beam* dengan arah horisontal terhadap active medium.

b) Lensa 2

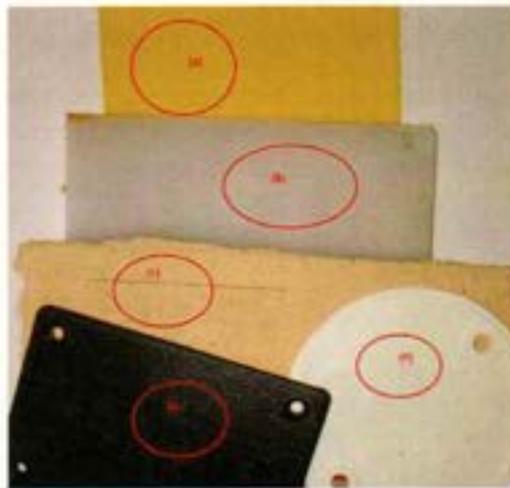
Berdasarkan spesifikasi *output beam* dari laser diode diharapkan *beam* dapat dicover oleh lensa yang memiliki dimensi lebih besar dari pada *beam* yang dikeluarkan laser. Lensa silinder kedua yang digunakan adalah lensa *plano-convex*. Berikut spesifikasi lensa yang digunakan:



Gambar 3.5 Geometri lensa silinder ke-2

3.1.4. Material Objek

Pada *experiment* ini material objek yang dikarakterisasi oleh penulis adalah material plastik, akrilik, dan *hardboard* yang memiliki ketebalan sekitar 2 mm. Gambar 3.6 adalah material yang digunakan pada karakterisasi. Variasi warna dilakukan untuk mengetahui pengaruh absorpsi foton oleh material berwarna dan putih. Sementara itu variasi material dilakukan untuk mengetahui karakteristik laser terhadap suatu material pada proses *engraving*.



Gambar 3.6 Material

3.1.5. Perangkat Pengukuran

Pada proses pengukuran hasil keluaran laser dioda maka digunakan dua proses pengukuran yaitu: (1) pengukuran hasil *footprint* pembakaran pada material dan (2) pengukuran intensitas. Pada pengukuran pertama digunakan alat

bantu berupa mikroskop digital untuk mengetahui luas *footprint* yang dihasilkan. Mikroskop digital yang digunakan yaitu seperti Gambar 3.7 berikut:



Gambar 3.7 Mikroskop digital

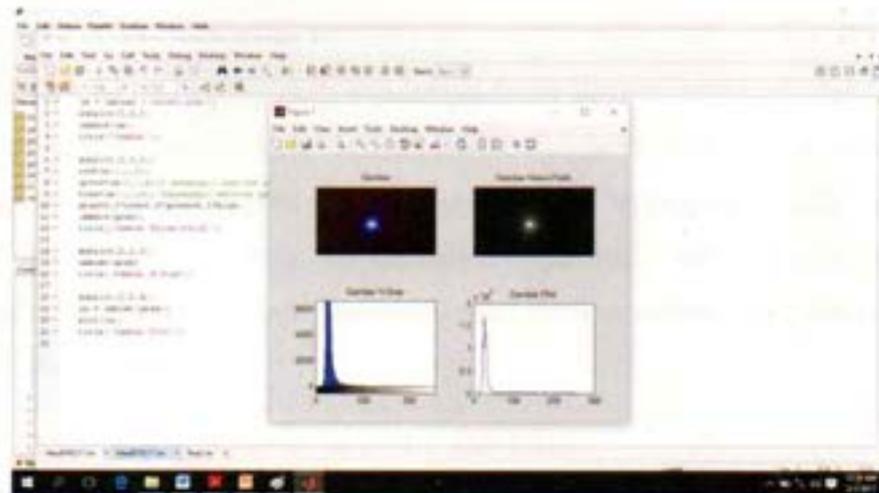
Mikroskop digital yang digunakan adalah seri MD-2800 dengan masukan tegangan 220V. Mikroskop tersebut mampu menampilkan hasil preparat yang diukur pada layar komputer dengan menggunakan koneksi USB (*Universal Serial Bus*) yang tertampil pada sebuah perangkat lunak berikut ini:



Gambar 3.8 Perangkat lunak mikroskop digital

Berdasarkan Gambar 3.8 maka kita dapat memperoleh foto dari *footprint* hasil pembakaran pada material dan menghitung serta menganalisa ukurannya. Untuk pengukuran yang kedua yaitu pengukuran intensitas dilakukan dengan melakukan pemotretan *beam* keluaran pada material kertas saat dengan

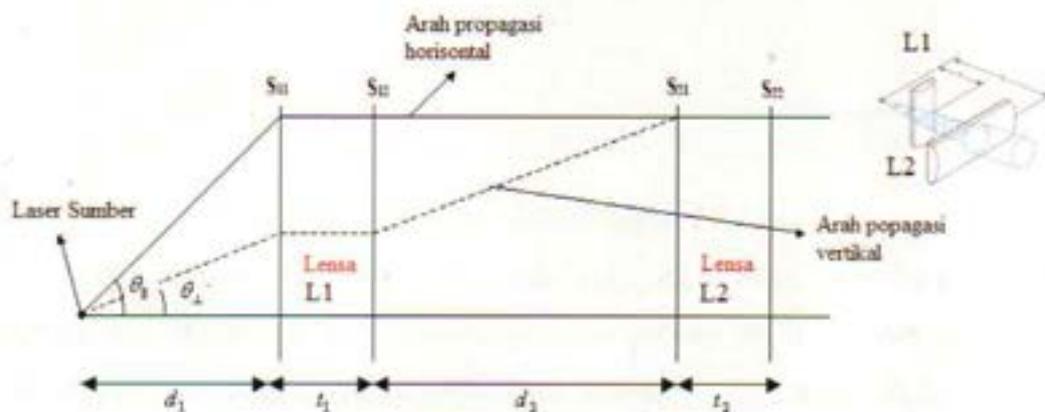
mengurangi masukan tegangan yang diberikan. Gambar 3.8 hasil pemotretan tersebut dianalisa menggunakan perangkat lunak MATLAB sebagai berikut:



Gambar 3.9 Penggunaan Matlab

3.2 Perhitungan Geometri Lensa

Untuk mendapatkan bentuk *beam* yang diinginkan maka penting dilakukan perhitungan geometri supaya mendapatkan lensa yang sesuai. Design ini dilakukan pada dua buah lensa silinder untuk laser dengan $\theta_1 > \theta_2$. Pada Gambar 3.10 adalah beberapa parameter yang harus diketahui pada *design* ini.



Gambar 3.10 Konfigurasi lensa silinder

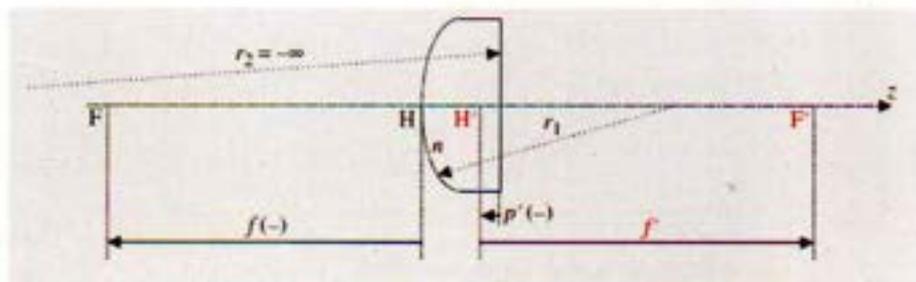
Pada Gambar 3.10, *beam* akan mengalami kolimasi pada arah horizontal dan vertikal pada permukaan lensa pertama (S_{11}) pada bagian ini *beam* masih dalam bentuk *elips* saat terpropagasi. Hanya ketika melewati lensa pada permukaan ke-2 (S_{12}) maka hanya *beam* dengan propagasi horizontal saja yang

diizinkan untuk melewatinya. Kemudian lensa kedua diletakan setelah lensa pertama pada jarak tertentu.

Saat *beam* mengenai permukaan pertama pada lensa kedua (S_{21}) maka *beam* tersebut akan tersejajarkan dan hanya *beam* dengan propagasi vertikal yang diijinkan untuk melewatinya. Setelah *beam* mengenai permukaan kedua pada lensa kedua (S_{22}) maka *beam* akan tersejajarkan dan terpropagasi pada arah tegak lurus saja. Pada *experiment* ini digunakan dua buah lensa silinder sehingga terdapat beberapa perhitungan geometri lensa. Berikut perhitungan geometri lensa yang dilakukan:

3.2.1. Geometri lensa silinder (L1 dan L2)

Perhitungan pertama yaitu geometri lensa silinder yang digunakan untuk melakukan *beam shaping*. Beberapa parameter dan spesifikasi yang digunakan yaitu *output beam* (w_f) yaitu: 0.4 mm. Index refraksi udara (n_0) = 1 dan index refraksi lensa BK7 (n_1) = 1.5095 panjang gelombang laser = 450 nm. Gambar 3.11 adalah skema lensa silinder (L1 dan L2).

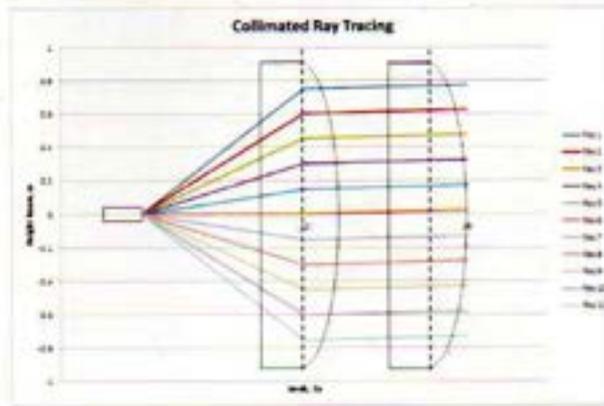


Gambar 3.11 Skema lensa silinder L1 dan L2

Berdasarkan Gambar 3.11 serta parameter yang ada maka untuk menentukan radius curvature lensa digunakan persamaan 7). Karena salah satu permukaan lensa datar maka curvature lensa adalah:

$$r = f \times (n - 1)$$

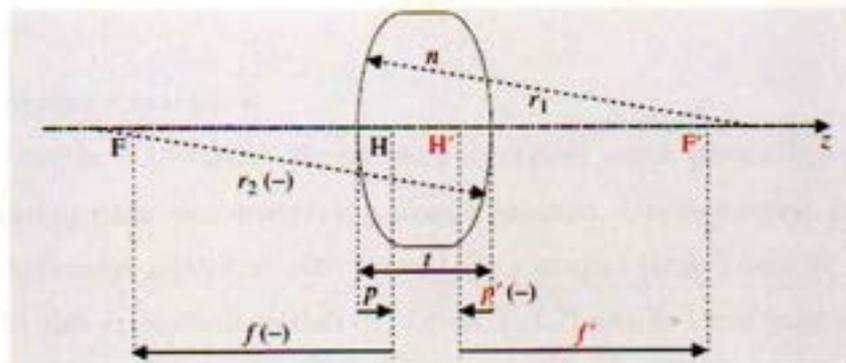
Sehingga diperoleh curvature L1, $r_1 = 25,95$ mm pada jarak fokus (f_1) = 50 mm. Sementara itu curvature L2, $r_2 = 12$ mm pada jarak fokus 25 mm. Berdasarkan pada parameter yang ada maka *ray tracing* laser beam saat melewati lensa L1 dan L2 sebagai berikut ini:



Gambar 3.12 Collimated ray tracing pada lensa silinder L1 dan L2

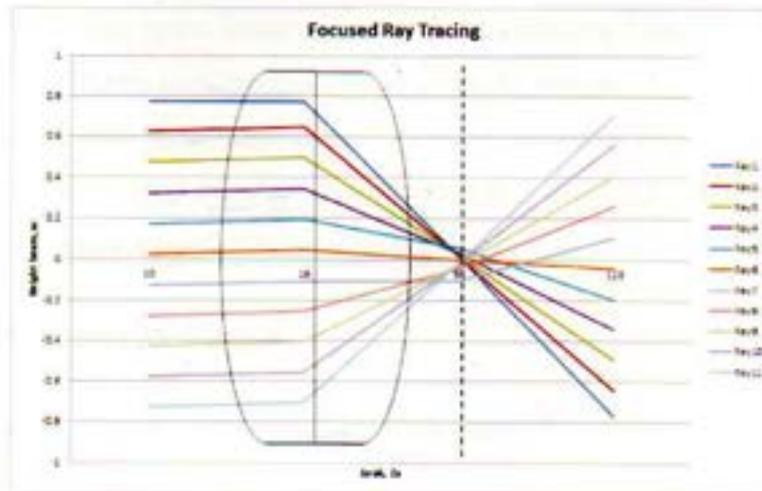
3.2.2. Geometri lensa objective

Lensa objective digunakan untuk melakukan pemfokusan beam yang telah diperbaiki oleh lensa silinder sebelumnya. Gambar 3.13 dibawah ini adalah parameter geometri lensa:



Gambar 3.13 Skema pada lensa objective

Lensa pemfokus adalah lensa yang digunakan untuk melakukan *focusing* dengan diameter kecil (*fast lens*) sehingga f . Berdasarkan persamaan (2.7) dengan asumsi $r_1 = r_2$ maka untuk mendapatkan nilai curvature lensa, r . Sehingga diperoleh nilai $r = 76.8$ mm untuk lensa pemfokus ini. Gambar 3.14 adalah hasil *ray tracing* laser beam yang berasal dari lensa silinder L2:



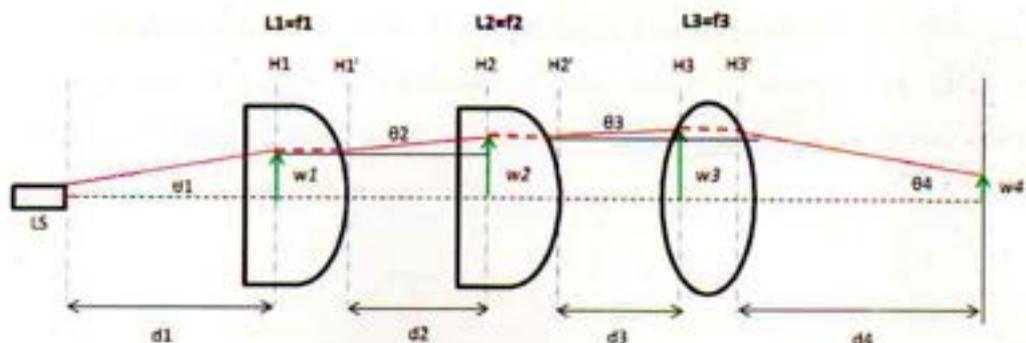
Gambar 3.14 Focused ray tracing pada lensa objective

3.3 Experiment

Experiment dilakukan dengan menggunakan peralatan yang tersedia di laboratorium optoelektronika UI salemba. Berikut adalah skema experiment yang dilakukan:

3.3.1. Skema Experiment

Gambar 3.15 adalah skema yang dilakukan untuk proses *beam shaping* dan *focusing* pada *engraving* yang akan dilakukan. Untuk koreksi *beam* pada sumbu horisontal dilakukan oleh lensa 1 (L1) dengan jarak fokus, f_1 dan jarak antara L1 dan laser diode adalah d_1 . Lensa 2 (L2) adalah lensa yang digunakan untuk melakukan koreksi pada sumbu vertical dengan jarak fokus, f_2 dan jarak terhadap L1 adalah d_2 . Lensa 3 (L3) adalah lensa pemfokus dengan jarak fokus, f_2 dan jarak terhadap lensa ke-dua yaitu d_3 , dan d_4 adalah jarak terhadap objek.



Gambar 3.15 Skema penempatan lensa pada experiment

Berdasarkan pada Gambar 3.15 skema tersebut, dimensi beam (w_1 s.d w_4) sangat ditentukan oleh pengaturan fokus pada masing – masing lensa. Fokus akan mempengaruhi jarak pada d_1 s.d d_4 serta kurvatur dari lensa (persamaan 2.7). Selain nilai – nilai tersebut diperhitungkan pula sudut yang terjadi akibat pembiasan dengan persamaan berikut ini:

$$\theta_r = \sin^{-1}(-w_k/r_k) \quad \dots (3.1)$$

$$\theta_k = \theta_r + \theta_b = \theta_r + \sin^{-1} \left(\frac{n_{k-1}}{n_k} \sin \theta_a \right) \quad \dots (3.2)$$

θ_r adalah sudut yang terjadi akibat pembiasan oleh pemakaian lensa. θ_k adalah total sudut pada lensa ke-k. Sementara itu, untuk memperhitungkan ukuran beam pada persamaan (3.3) berikut ini:

$$w_k = w_{k-1} + (d_{k-1} \times \tan \theta_k) \quad \dots (3.3)$$

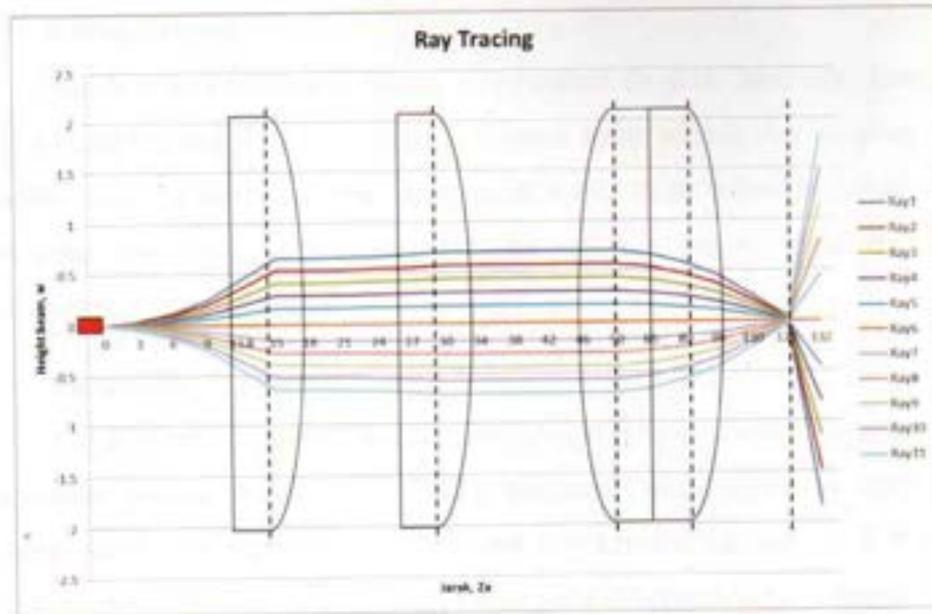
Persamaan 3.3 digunakan untuk menghitung nilai w pada lensa L1 dan L2. Untuk lensa L3 maka pada persamaan 3.3 nilai w_k dikurangi dari jarak dan nilai sudutnya. Untuk mendapatkan dimensi w_4 yang diinginkan (0.4 mm) maka nilai fokus masing - masing lensa terdapat pada Tabel 3.1 berikut:

Tabel 3.1 Hasil perhitungan jarak fokus

Unit (mm)

	1st Cylindrical Lens			2nd Cylindrical Lens			3rd Focusing Lens		
d1	f1	r1	d2	f2	r2	d3	f3	r3=r4	d4
25	50	25.95	50	25	12.975	25	75	76.81112	75

Berdasarkan pada Tabel 3.1 diatas maka nilai fokus lensa $f_1 = 50$ mm, $f_2 = 25$ mm, dan $f_3 = 75$ mm. Berdasarkan pada parameter tersebut dan BK7 ($n = 1.509$), $\lambda = 450$ nm, maka untuk sumbu horizontal dapat diperoleh *ray tracing* sebagai Gambar 3.16 berikut ini:

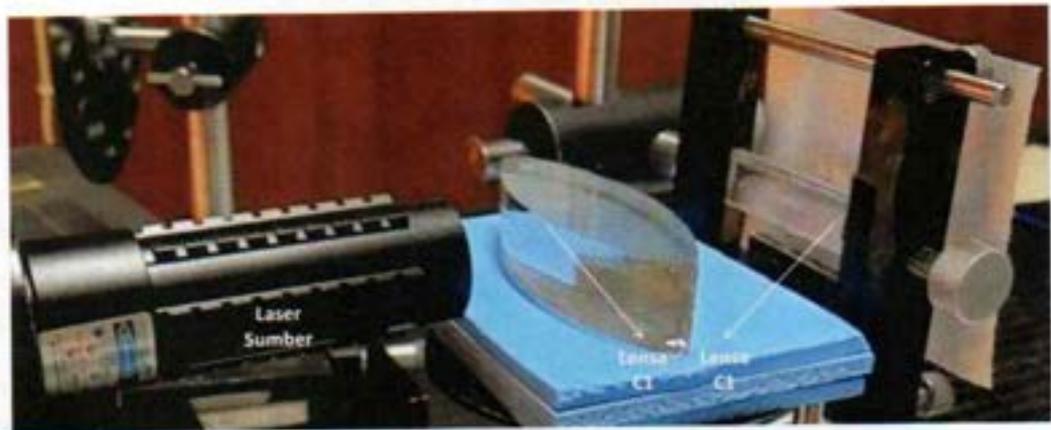


Gambar 3.16 Ray tracing secara keseluruhan

Mengacu pada Gambar 3.16 serta persamaan 3.1 s.d 3.3 maka besar diameter *beam* (w) sangat tergantung pada jarak fokus, antar lensa dan sudut divergensi yang dimiliki laser. Semakin besar fokus dan jarak antar lensa maka semakin besar pula diameter *beam* yang dihasilkan.

3.3.2. Realisasi *Experiment*

Berdasarkan pada skema Gambar 3.17 adalah realisasi pada *experiment* yang dilakukan. Pengaturan fokus, jarak lensa dan objek material mempengaruhi besarnya diameter beam yang dihasilkan pada masing – masing lensa.



Gambar 3.17 Posisi laser dan lensa dalam *experiment*

3.4 Karakterisasi

Karakterisasi dilakukan untuk mengetahui tingkah laku dari laser diode yang digunakan secara umum. Hal ini karena laser adalah device yang sangat spesifik, laser dengan spesifikasi yang sama belum tentu memiliki *behavior* yang sama pula. Karakterisasi dilakukan melalui variasi input tegangan dan variasi objek material yang digunakan.

3.4.1. Parameter Tegangan

Karakterisasi utama dilakukan adalah karakterisasi daya. Namun karena ketersediaan pengukur daya yang belum memadai maka dilakukan karakterisasi terhadap variasi tegangan dan arus. Seperti kita ketahui bahwa $P = V * I$, maka daya akan meningkat saat tegangan dan arus yang diberikan juga meningkat.

Pada *experiment* yang dilakukan yaitu pengaruh variasi sumber tegangan terhadap waktu lasing pada material dengan arus konstan dan material yang sama. Berikut adalah skema pengukuran yang dilakukan.



Gambar 3.18 Pengukuran arus dan tegangan

Pada Gambar 3.18 *experiment* dilakukan pada objek material kertas putih dengan ketebalan 0.5 mm. Arus yang diberikan pada objek material adalah arus konstan sebesar 0.7A. Berdasarkan *experiment* diperoleh hasil:

Input tegangan diberikan mulai 3.5 volt sesuai karakteristik *driver* yang digunakan oleh laser diode pada umumnya. Sementara itu batas maksimum karakterisasi pada tegangan 7.4 volt sesuai tegangan kerja yang diberikan oleh datasheet laser diode.

Jika diamati pada Tabel 3.2 maka terdapat perbedaan signifikan saat sumber tegangan sudah mencapai 6 volt. Namun laser mulai melakukan proses pembakaran pada tegangan 5 volt. Hal ini menjadikan penulis memberikan sumber 5 volt pada variasi proses *engrave* untuk mengukur arus yang terjadi.

3.4.2. Hasil pembakaran laser (*burn spot*) pada kertas

Untuk mengetahui perumaterial diameter hasil pembakaran sebelum dan setelah lensa maka dilakukan *experiment* pembakaran pada material kertas supaya dapat dilakukan analisa ukuran serta luas hasil pembakaran menggunakan mikroskop digital.

3.4.3. Variasi Objek Material

Karakterisasi selanjutnya yaitu variasi terhadap objek material. Variasi objek material meliputi material plastik, akrilik dan *hardboard* untuk mengetahui interaksi antara material dengan laser. Untuk melihat pengaruh warna material dan material terhadap absorpsi foton dari sumber laser diode maka pada variasi material tersebut dilakukan *experiment* pada material berwarna (hitam, kuning) dan material putih.

3.5 Perhitungan *Beam Profile* dan Geometri Lensa

3.5.1. *Beam Profile*

Berdasarkan pada skema asumsi *experiment* diatas maka dengan melakukan substitusi nilai – nilai yang dimiliki laser dioda pada persamaan (2.1) sampai dengan (2. 6) pada Bab 2, maka diperoleh nilai seperti tertera pada Tabel 3.2 berikut sebagai hasil perhitungan. Dimana $\lambda = 0.45 \mu\text{m}$, $d1=25000 \mu\text{m}$, $d2=100000 \mu\text{m}$, $d3=130000 \mu\text{m}$, $d4= 75000 \mu\text{m}$, $ws=500-10000 \mu\text{m}$.

Tabel 3.2 Hasil perhitungan ukuran *beam*

LD	Pada d2			
	$w_{01}(\mu\text{m})$	$z_0(\text{mm})$	$\theta (..^\circ)$	B
20000	0.160	2560027	0.008	711.1149

Pada d3			
w_{02} (mm)	z_0 (mm)	θ (.. ^o)	B
0.320	40.960	0.008	5.68895
Pada d4			
D_0 (mm)	z_0 (mm)	θ (.. ^o)	B
0.480	92.160	0.008	6.826739

Berdasarkan perhitungan *beam profile* diatas *output beam* setelah lensa fokus adalah sebesar **0.48 mm**.

3.5.2. Geometri Lensa

Berdasarkan pada perhitungan yang dilakukan pada sub Bab 3.2 sebelumnya, maka diperoleh beberapa parameter untuk posisi lensa pertama dan kedua sebagai berikut.

a) Lensa Silinder Pertama (L1 dan L2)

Berdasarkan perhitungan pada 3.2. maka diperoleh parameter geometri lensa silinder yg pertama seperti ditunjukkan oleh Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Hasil perhitungan geometri lensa silinder L1 dan L2

No	Parameter	Ket.	Nilai (mm)
1	d1	Jarak Laser dengan L1	25
2	d2	Jarak L1 dengan L2	50
3	R	Radius curvature	25.9
4	f1	Fokus L1	50
5	f2	Fokus L2	25

b) Lensa Objectiv sebagai pemfokus

Berdasarkan perhitungan pada 3.2.3 dan 3.2.4 maka diperoleh parameter geometri lensa silinder yg pertama seperti ditunjukkan oleh Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Hasil perhitungan geometri lensa objective

No	Parameter	Ket.	Nilai (mm)
1	d3	Jarak lensa C2 ke lensa fokus	25
2	d4	Jarak lensa fokus ke bidang image	75
3	r1 = r2	Kurvatur lensa objective	76

3.5.3. Perbandingan Hasil Perhitungan dan *Experiment*

Berdasarkan hasil perhitungan dan *experiment* maka diperoleh nilai untuk beam waist seperti Tabel 3.5 berikut ini:

Tabel 3.5 Hasil perbandingan dan *error*

Beam Waist w_0 (μm)		Error (%)
Perhitungan	<i>Experiment</i>	
160.00	750.00	
320.00	525.00	
480.00	400.00	16.67%

Berdasarkan Tabel 3.5 terdapat perbedaan antara hasil perhitungan dan *experiment* yang dilakukan. Perbedaan (*error*) tersebut dalam range 1/100 μm .

BAB 4 HASIL DAN ANALISA

1 Hasil dan Analisa Karakterisasi Parameter Listrik

Untuk mengetahui daya laser pada material maka dilakukan pengukuran berupa parameter listrik seperti arus dan tegangan. *Experiment* dilakukan pada lama 10 kali secara random. Hal ini dilakukan untuk mengetahui rata – rata arus yang mengalir dalam melakukan satu proses *engraving* oleh laser.

1.1 Hasil pengamatan terhadap arus dengan tegangan tetap

Untuk mengetahui rata - rata daya yang dikeluarkan oleh laser dapat digunakan alat ukur berupa *optikal power meter*. Namun karena ketidakterersediaan alat tersebut untuk spesifikasi laser diode yang digunakan maka digunakan yang lainnya yaitu dengan menghitung rata – rata power pada efisiensi 80%. Berdasarkan pada *experiment* yang telah dilakukan maka diperoleh hasil seperti diunjukkan pada table 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Hasil karakterisasi arus

Karakterisasi Parameter Listrik			
Percobaan	Tegangan (V)	Arus (A)	Power (watt)
1	5.040	0.782	3.153
2	5.040	0.800	3.226
3	5.100	0.747	3.048
4	5.090	0.702	2.859
5	5.100	0.707	2.885
6	5.100	0.811	3.309
7	5.100	0.856	3.492
8	5.090	0.887	3.612
9	5.150	0.908	3.741
10	5.160	0.912	3.765
Rata-rata	5.097	0.811	3.309

Berdasarkan Tabel 4.1 tersebut tegangan yang diberikan pada laser bersifat konstan, yaitu pada kisaran 5 VDC. Sementara itu arus yang terukur mengalami

perubahan antara 0.7 sampai 0.9 Ampere. Pada *experiment* ini diperoleh rata – rata arus sebesar 0.811 Ampere.

4.1.2 Analisa hasil pengamatan terhadap pengukuran arus

Berdasarkan pada besar arus dan tegangan yang diperoleh maka dapat dihitung nilai daya yang dikeluarkan oleh laser. Pada *experiment* ini diambil nilai efisiensi sebesar 80%. Sehingga daya rata – rata yang terhitung adalah sebesar 3.309 watt.

4.2 Hasil dan Analisa Karakterisasi Ukuran Keluaran Laser

Karakterisasi titik pembakaran dilakukan pada media kertas untuk mengetahui luas area pembakaran sebelum dilakukan pengaturan fokus beam dan setelah dilakukan pengaturan.

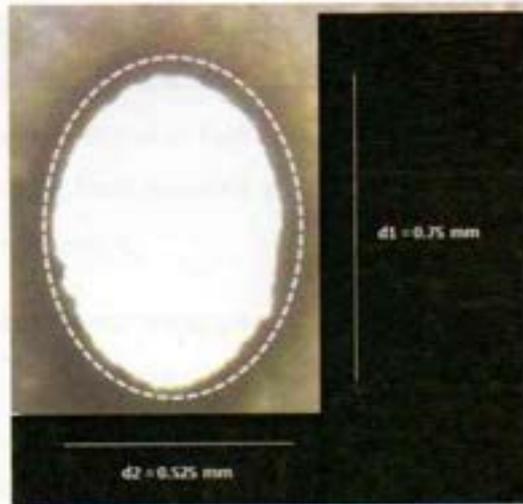
4.2.1. Hasil pengamatan menggunakan mikroskop digital

Berdasarkan pada *experiment*, maka diagonal mayor (d1) pada sisi horizontal dan diagonal minor (d2) pada sisi vertikal yang diperoleh pada pembakaran kertas dengan detail hasil dimensi pembakaran pada Tabel 4.2 sebagai berikut ini:

Tabel 4.2 Perhitungan luas titik pembakaran lensa ke-1

d1	0.75	mm
d2	0.525	mm
μ	3.14	
L(29mm)	0.618	mm ²

Gambar 4.1 adalah hasil pembakaran laser setelah melalui sebelum dilakukan pengaturan fokus saat dilihat menggunakan mikroskop digital. Setelah melalui lensa pertama titik pembakaran masih *elips* (tidak ideal). Hal ini ditunjukkan dengan perbedaan diagonal-1 dan 2 yang cukup besar.



Gambar 4.1 Hasil titik pembakaran tanpa melakukan beam shaping

Berdasarkan pada *experiment* maka diagonal mayor (d_1) pada sisi horizontal dan diagonal minor (d_2) pada sisi vertikal yang diperoleh pada pembakaran kertas sebagai berikut ini:

Tabel 4.3 Perhitungan luas titik pembakaran lensa ke-2

d_1	0.35 mm
d_2	0.4 mm
μ	3.14
$L(29\text{mm})$	0.220 mm^2

Sementara itu, untuk hasil pembakaran laser setelah melalui pengaturan fokus beam ditunjukkan pada Gambar 4.2. Jika dilihat untuk pembakaran kertas (material kayu) terdapat arang yang menjadi sisa pembakaran.



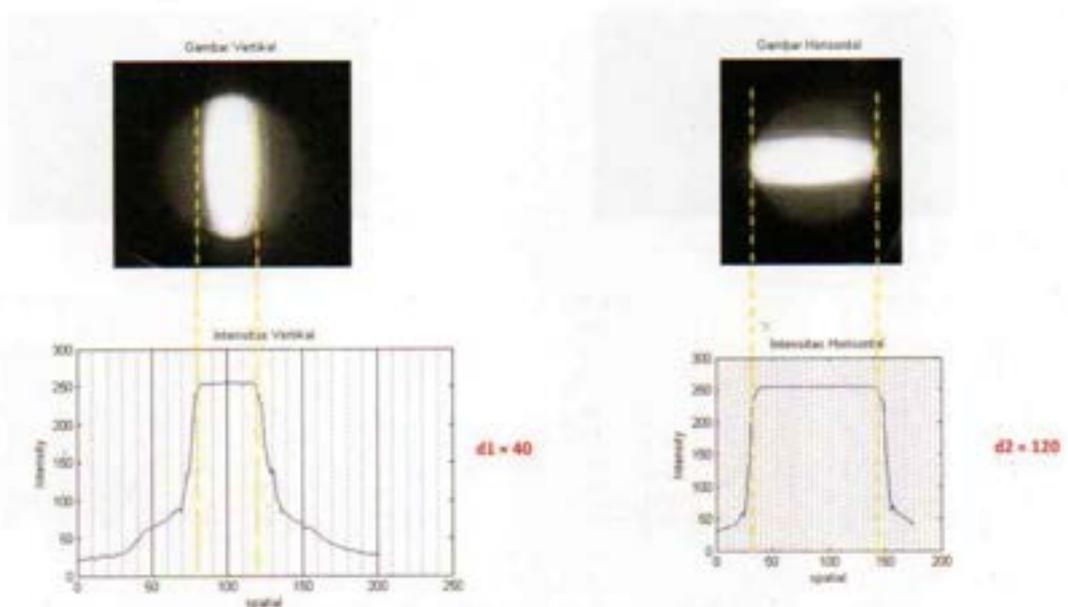
Gambar 4.2 Titik pembakaran setelah lensa ke-3

4.2.2. Analisa hasil pengamatan menggunakan mikroskop digital

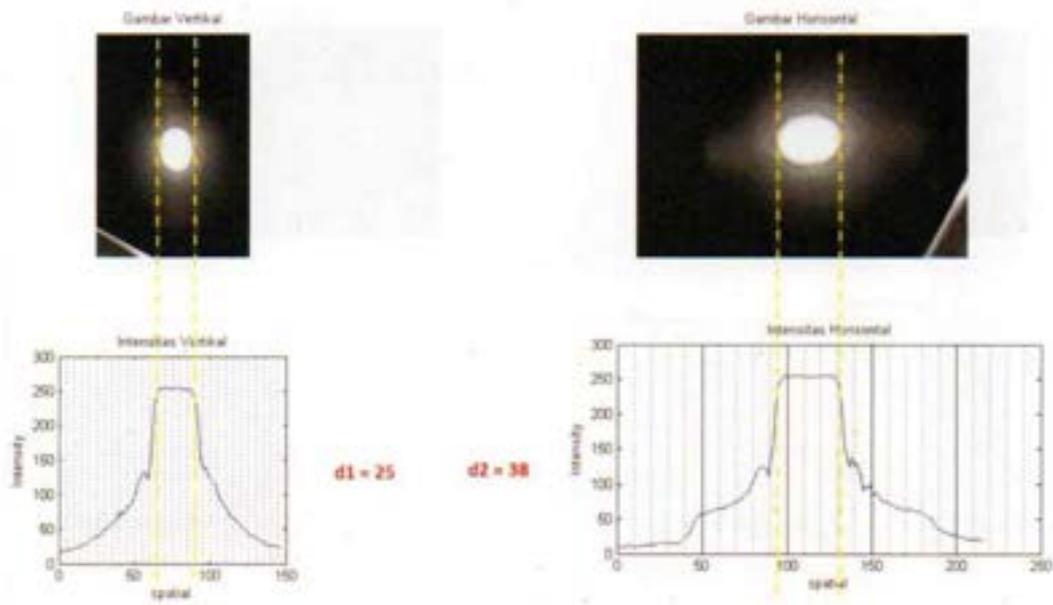
Berdasarkan pada hasil karakterisasi titik pembakaran pada material kertas dapat dilihat bahwa ada penurunan luas area pembakaran dari 0.618 mm^2 menjadi 0.220 mm^2 . Berdasarkan hasil tersebut maka terdapat 67% pengurangan ukuran beam dari kondisi sebelumnya.

4.2.3. Hasil pengamatan menggunakan bantuan software MATLAB

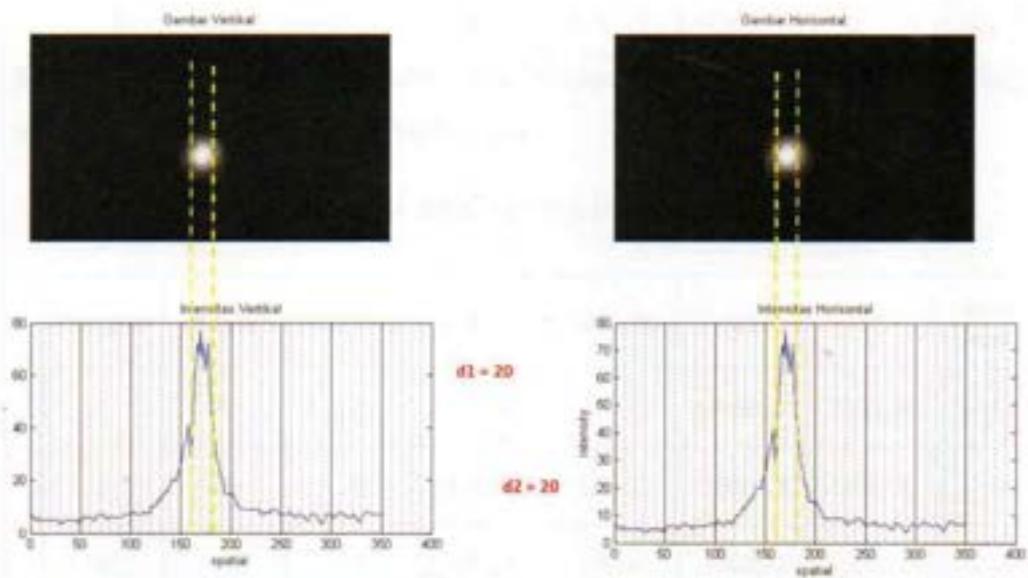
Pengamatan selanjutnya menggunakan bantuan perangkat lunak MATLAB. Pada proses ini dilakukan foto terhadap *beam* keluaran laser. Keluaran laser yang difoto adalah *beam* dari laser sebelum diatenuasi tanpa beam shaping pada Gambar 4.3 (1), beam setelah atenuasi ada pada Gambar 4.4 (2), Sementara Gambar 4.5 (3) adalah hasil dengan menggunakan beam shaping. Gambar 4.6 (4) adalah gambar setelah pemfokus. Berikut adalah hasil pengamatan menggunakan MATLAB:



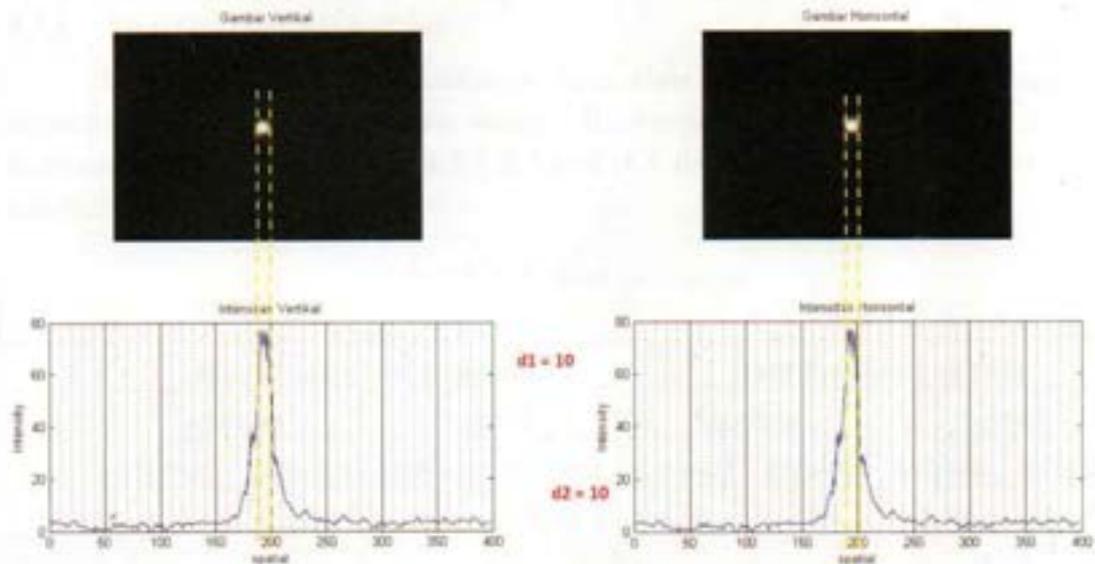
Gambar 4.3 (1) Beam keluaran laser sebelum diatenuasi



Gambar 4.4 (2) Beam keluaran laser setelah diatenuasi



Gambar 4.5 (3) Beam keluaran laser setelah lensa silinder



Gambar 4.6 (4) Beam keluaran laser setelah lensa fokus

4.2.4. Analisa hasil menggunakan MATLAB

Berdasarkan pada Gambar 4.3 s.d 4.6, (1) sampai dengan (4) maka dapat disimpulkan data yang diperoleh data dengan diagonal mayor ($d1$) dan diagonal minor ($d2$) sebagai Tabel 4.4 berikut ini:

Tabel 4.4 Analisa hasil kalkulasi MATLAB

Gambar	d1 (gbr)	d2 (gbr)	Skala (P)	Skala (I)	d1	d2	Luas (mm ²)
1	40	120	150.00	60.00	18000.00	2400.00	67.82
2	25	38	120.00	100.00	4560.00	2500.00	17.90
3	20	20	88.24	75.00	1764.71	1500.00	4.16
4	10	10	85.71	75.00	857.14	750.00	1.01

Berdasarkan pada Tabel 4.4 maka hasil Gambar (2) sebagai *beam* hasil dari keluaran laser sebelum dilakukan pengaturan fokus *beam* adalah 17.9 mm². Sementara itu, *beam* hasil pengaturan pada fokus Gambar (3) adalah 4.16 mm². Sehingga dapat disimpulkan bahwa proses pengaturan *beam* diperoleh pengurangan luasan *beam* sebesar 74.46%.

4.2.5. Analisa Hasil Rasio *Elips*

Untuk mengetahui perbandingan rasio *elips* yang diperoleh maka dapat dibandingkan antara rasio sumbu mayor (d_1) dengan rasio sumbu minor (d_2). Berdasarkan hasil pada Tabel 4.2 s.d Tabel 4.4 dapat disimpulkan rasio *elips* tersebut pada Tabel 4.5 berikut ini.

Tabel 4.5 Analisa rasio *elips*

	Hasil Pembakaran Kertas				Hasil Perhitungan Foto			
	Sebelum		Setelah		Sebelum		Setelah	
	$d_1(\text{mm})$	$d_2(\text{mm})$	$d_1(\text{mm})$	$d_2(\text{mm})$	$d_1(\text{mm})$	$d_2(\text{mm})$	$d_1(\text{mm})$	$d_2(\text{mm})$
	0.75	0.525	0.4	0.35	4.56	2.50	1.76	1.50
Rasio	1.43		1.14		1.82		1.18	

Berdasarkan Tabel 4.5 maka untuk pembakaran kertas terjadi pengurangan rasio *elips* dari 1.43 menjadi 1.14 yaitu sebesar 20%. Sementara itu, untuk perhitungan intensitas pada hasil foto diperoleh pengurangan rasio *elips* dari 1.82 menjadi 1.18 yaitu sebesar 35.5%.

Berdasarkan dua metode pengamatan hasil pengamatan menggunakan mikroskop digital pada *burn spot* lebih akurat karena langsung pada daerah yang terabslasi dibandingkan pada pengamatan melalui hasil foto.

4.3 Hasil dan Analisa Karakterisasi *Cut Kerf* Laser pada Objek Material

Pada karakterisasi ini material yang digunakan adalah material akrilik berwarna kuning. Untuk material lainnya akan dilakukan pada karakterisasi selanjutnya.

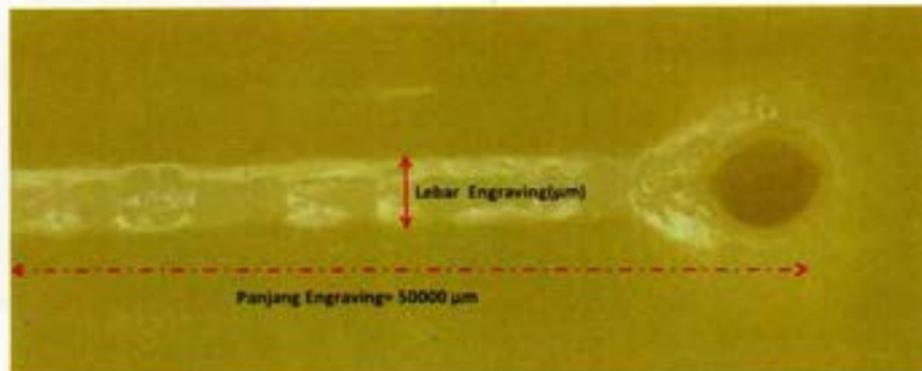
4.3.1 Bagian analisa hasil *engraving* laser

Karakterisasi geometri pada material ini meliputi kedalaman serta lebar *engraving* yang dilakukan laser pada material. Karakterisasi ini dilakukan dengan membuat garis lurus sepanjang 50000 μm pada material.

Pada kecepatan yang berbeda yaitu: 200 mm/mnt, 500 mm/mnt dan 1500 mm/mnt akan dilihat pengaruhnya pada lebar *engraving* serta kedalaman *engraving* dari laser. Gambar 4.7 adalah tampak atas dari material yang sudah

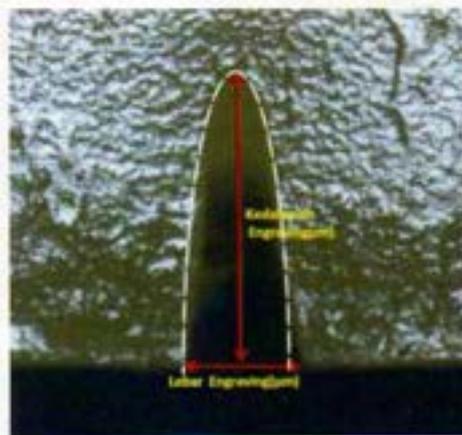
dilakukan *engrave* jika dilihat menggunakan mikroskop digital, untuk mengamati lebar *engrave*.

Pada Gambar 4.7 berikut ini adalah tampak *engrave* dari sisi atas:



Gambar 4.7 Tampak atas

Sementara itu, untuk mengetahui kedalaman pada Gambar 4.8. seperti ditunjukkan berikut ini:

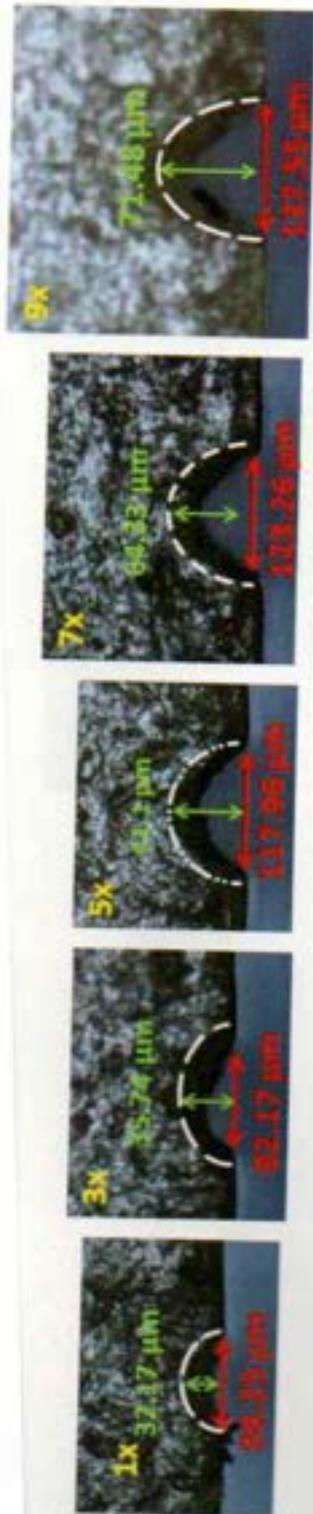


Gambar 4.8 Tampak samping

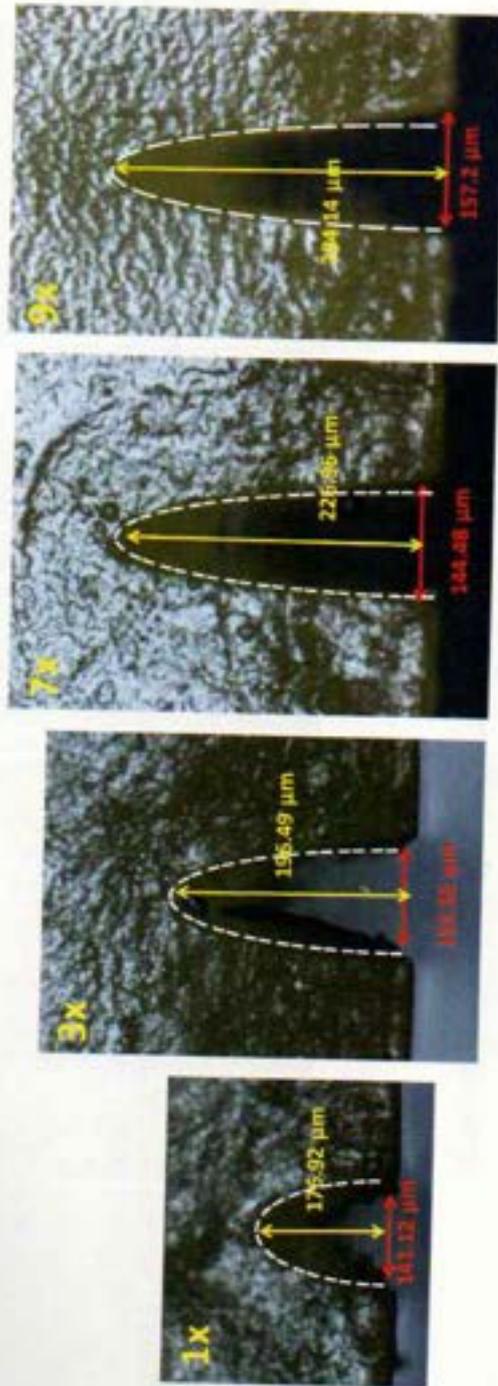
Karakterisasi waktu pembakaran dilakukan dengan melakukan *engrave* berulang pada tempat yang sama selama beberapa kali.

4.3.2 Hasil *engraving* laser

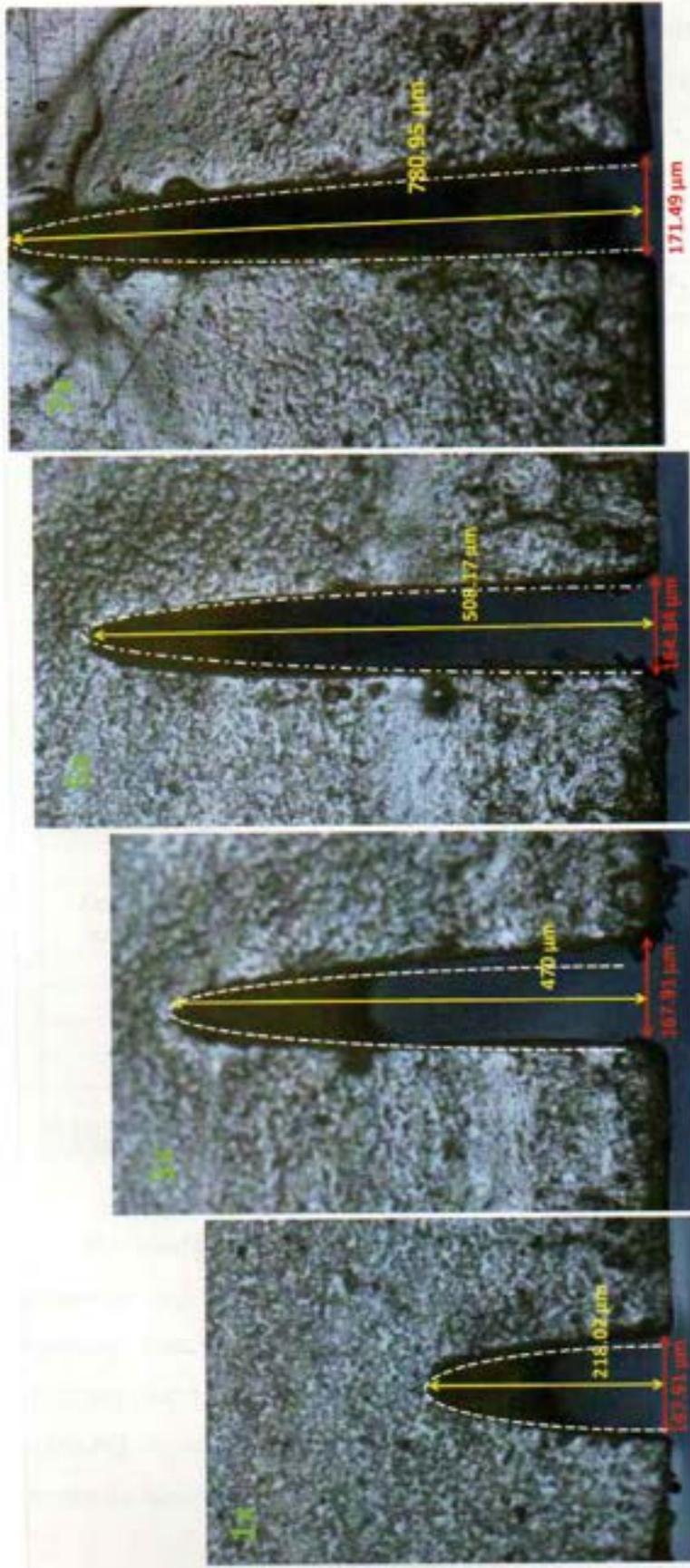
Berikut ini adalah hasil *engraving* menggunakan laser pada material akrilik pada Gambar 4.9 dengan kecepatan *engraving* 1500 mm/menit, Gambar 4.10 dengan kecepatan 500 mm/mnt, dan Gambar 4.11 dengan kecepatan 200 mm/mnt.



Gambar 4.9 Hasil Engraving pada kecepatan engraving 1500 mm/mnt



Gambar 4.10 Hasil Engraving pada kecepatan engraving 500mm/mnt



Gambar 4.11 Hasil Engraving pada kecepatan engraving 200 mm/mint

4.3.3 Analisa hasil *engraving* laser

Berdasarkan pada hasil *engraving* pada Gambar 4.9 sampai dengan 4.11 perbedaan waktu *engraving* disimbolkan dengan 1x, 3x, 5x dst. Maka hasil tersebut disimpulkan pada Tabel 4.6 berikut ini.

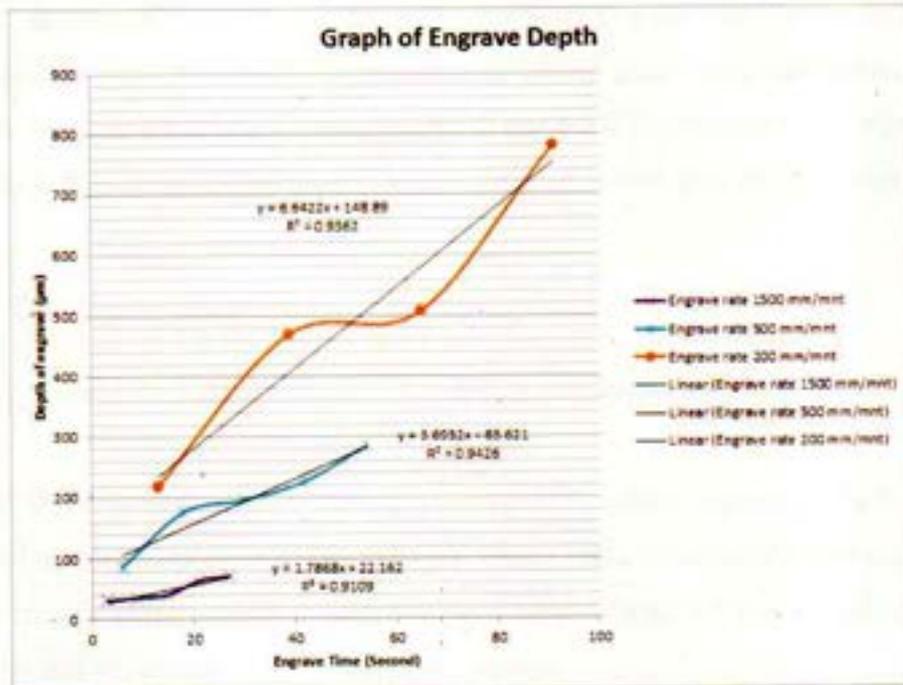
Tabel 4.6 Hasil *engraving* laser

Kecepatan <i>Engrave</i> 200 mm/mnt			
Kedalaman Area (μm)	Jumlah <i>Engrave</i>	Waktu Pemakanan (detik)	Lebar area (μm)
218.02	1x	13	167.91
470	3x	39	167.91
508.17	5x	65	164.34
780.95	7x	91	171.49
Rata-rata			167.9125
Kecepatan <i>engrave</i> 500 mm/mnt			
Kedalaman Area (μm)	Jumlah <i>Engrave</i>	Waktu Pemakanan (detik)	Lebar area (μm)
87.57	1x	6	141.12
176.92	3x	18	153.52
196.49	5x	30	144.69
226.96	7x	42	146.48
284.14	9x	54	157.2
Rata-rata			148.602
Kecepatan <i>engrave</i> 1500 mm/mnt			
Kedalaman Area (μm)	Jumlah <i>Engrave</i>	Waktu Pemakanan (detik)	Lebar area (μm)
32.17	1x	3	98.25
35.74	3x	9	102.17
41.1	5x	15	105.12
64.33	7x	21	107.96
71.48	9x	27	117.26
Rata-rata			106.152

Berdasarkan pada Tabel 4.6, tersebut maka dapat dianalisa untuk kedalaman *engraving* material pada laser jenis ini dipengaruhi oleh kecepatan *engraving* dan juga waktu. Semakin lama waktu *engraving* maka kedalaman *engraving* akan semakin besar. Namun sebaliknya semakin kecil kecepatan *engraving* maka kedalaman *engraving engraving* material semakin besar. Sementara lebar area *engraving* lebih terpengaruh pada kecepatan *engraving*. Hal

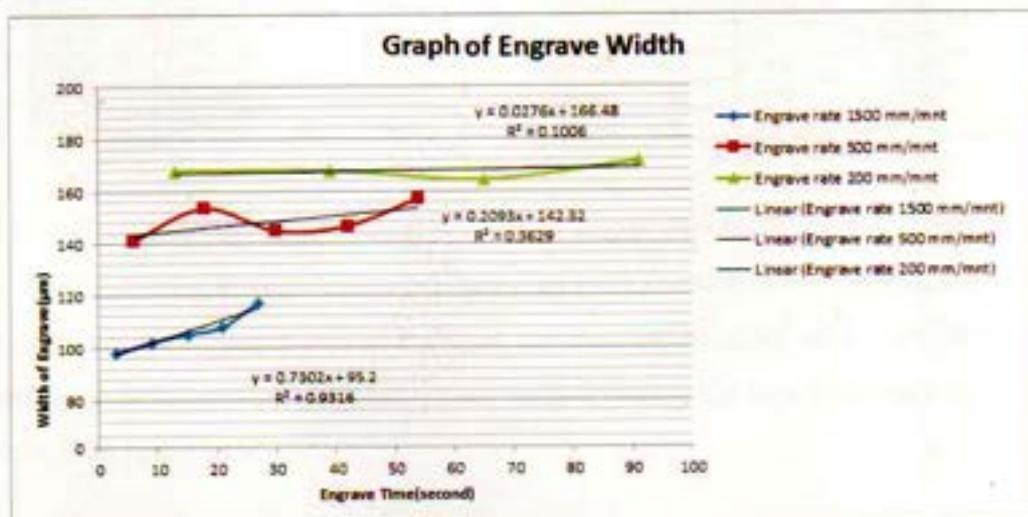
ini terlihat dari perumaterial waktu yang tidak mengubah lebar area secara sigifikan.

Berdasarkan Tabel 4.6 maka karakterisasi kedalaman *engraving* material dapat dilihat sebagai grafik pada Gambar 4.12 berikut.



Gambar 4.12 Grafik analisa kedalaman engraving laser

Sementara itu, untuk mengetahui karakteristik *engraving* laser terhadap lebar area *engraving* dapat dilihat pada Gambar 4.13 berikut.



Gambar 4.13 Grafik analisa lebar area engraving laser

Berdasarkan pada Gambar Grafik 4.12 dan 4.13 dapat dilihat bahwa pengaruh waktu terhadap kedalaman dan lebar *engraving*. Untuk kedalaman *engraving* pengaruh waktu terlihat sangat signifikan, sementara lebar *engraving* lebih terpengaruh pada kecepatan pemakanan dibandingkan dengan waktu.

4.3.4 Analisa Energi Laser

Berdasarkan hasil pengamatan daya (P) pada 4.1 serta luas area pembakaran pada 4.2 maka dapat dihitung energi laser yang dihasilkan dalam satuan luas (dose). Pada kecepatan *engraving* 1500 mm/menit = 25 mm/ detik dengan lebar area pembakaran = 0.4 mm diepoleh luasan area 10 mm². Sehingga:

$$\text{Energy} = P \times t = 3.3 \text{ watt s} = 3.3 \text{ J}$$

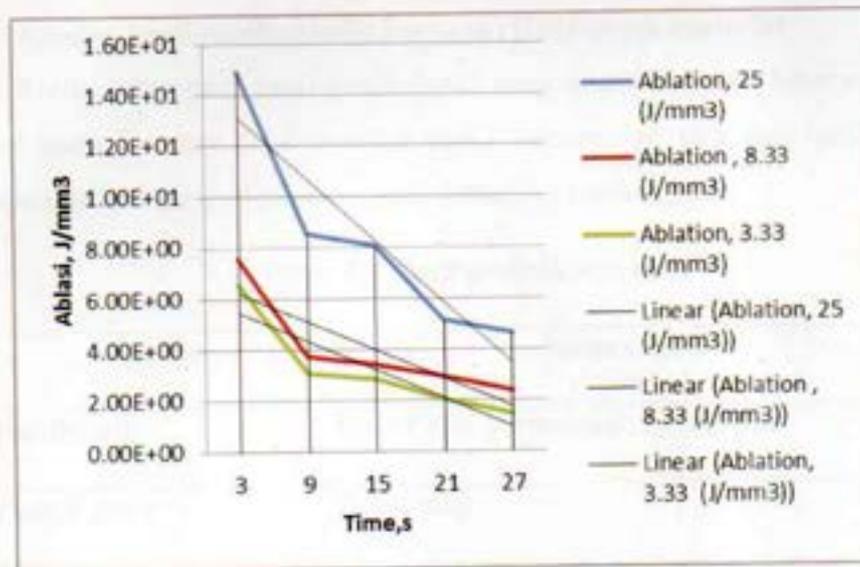
$$\text{Dose (Joule/cm}^2\text{)} = \text{energy/ luas area pembakaran} = 30.27 \text{ J/mm}^2.$$

Berdasarkan pada hasil karakterisasi kedalaman *engrave* pada 4.3 maka dapat diperoleh kecepatan ablasi sebagai berikut pada kedalaman 0.003 mm maka besar energy untuk *ablation* adalah 1100 J/ cm³. Tabel 4.7 berikut adalah hasil perhitungan ablasi untuk tiap kecepatan *engrave*:

Tabel 4.7 Ablasi pada masing – masing kecepatan

Engrave rate: 3.33 mm/s			Engrave rate: 8.33 mm/s			Engrave rate: 25 mm/s		
Depth Area (mm)	Ablation, 3.33 (J/mm ²)	Time (s)	Depth Area (mm)	Ablation, 8.33 (J/mm ²)	Time (s)	Depth Area (mm)	Ablation, 25 (J/mm ²)	Time (s)
2.18E-01	6.58E+00	13	3.76E-02	7.56E+00	6	2.22E-02	1.49E+01	3
4.70E-01	3.05E+00	39	1.77E-01	3.74E+00	18	3.87E-02	8.54E+00	9
5.08E-01	2.82E+00	65	1.96E-01	3.37E+00	30	4.11E-02	8.05E+00	15
6.07E-01	2.02E+00	78	2.27E-01	2.92E+00	42	6.43E-02	5.14E+00	21
7.81E-01	1.43E+00	91	2.84E-01	2.33E+00	54	7.15E-02	4.63E+00	27

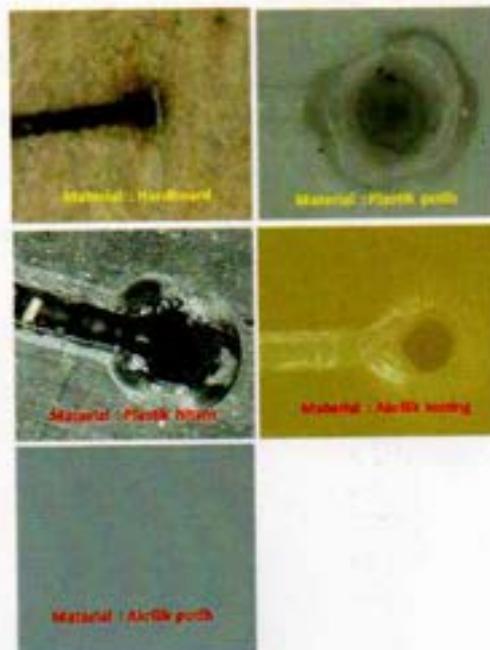
Berdasarkan pada Tabel 4.7 maka dapat diperoleh grafik ablasi pada masing – masing kecepatan yang ditunjukkan pada Gambar 4.14. Jika dilihat pada grafik maka kecepatan *engrave* sangat mempengaruhi ablasi dari material yang terablasi. Rata – rata kecepatan ablasi yang terjadi pada tiga kecepatan tersebut yaitu 0.28 mm³/detik.



Gambar 4.14 Grafik analisa ablasi engraving laser

4.4 Hasil dan Analisa Karakterisasi Variasi Objek Material

Pada analisa ini digunakan beberapa jenis material yaitu *hardboard*, plastik, dan akrilik. Hasil karakterisasi pembakaran berbagai jenis objek material dapat dilihat pada Gambar 4.14 berikut.



Gambar 4.15 Hasil Pembakaran pada berbagai jenis objek material

4.4.1. Analisa hasil pembakaran berbagai jenis objek material

Berdasarkan pada hasil pembakaran yang dilakukan pada beberapa variasi material pada Gambar 4.14 tersebut maka kesimpulan terhadap hasil engrave beberapa material yang digunakan pada Tabel 4.8 berikut ini:

Tabel 4.8 Hasil pembakaran laser

Material	Keterangan
Hardboard	Modifikasi permukaan, <i>engraving</i>
Plastik putih	<i>Engraving</i>
Plastik hitam	<i>Engraving</i>
Akrilik kuning	<i>Engraving</i>
Akrilik putih	Tidak terjadi perumaterial

Berdasarkan pada *experiment*, diperoleh hasil bahwa interaksi pembakaran laser pada material *hardboard* menyebabkan adanya modifikasi pada permukaan yang ditandai dengan berubahnya warna dasar dari material. Pada material plastik interaksi laser dengan material dapat terjadi proses *engraving* (*engraving*) tanpa mengubah warna dasar material. Pada material akrilik yang berwarna kuning interaksi material terjadi *engraving* namun demikian pada akrilik berwarna putih tidak terjadi *engraving*.

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pada perhitungan dan *experiment*, telah dilakukan analisis *beam profile* pada *laser diode*. Analisis tersebut meliputi ukuran *footprint* dari *beam* yang terbentuk pada *output* laser diode. Berdasarkan *experiment* dengan menggunakan metode dua buah silinder untuk melakukan koreksi *beam* dan melakukan *ray tracing* terhadap struktur dan jarak lensa yang digunakan disimpulkan bahwa:

- 1) Pada pengamatan luas area keluaran laser melalui *burning spot* pada kertas menggunakan mikroskop digital diperoleh pengurangan luas *burning spot* dari 0.618 mm^2 menjadi 0.220 mm^2 . Jika dihitung berdasarkan pengurangan rasio *elips* dari 1.43 menjadi 1.14.
- 2) Pada karakterisasi hasil *cut kerf engraving* mengenai kedalaman dan lebar *engraving* pada tiga kecepatan yang berbeda (200 mm/mnt, 500 mm/mnt dan 1500 mm/mnt) diperoleh hasil bahwa untuk kedalaman *engrave* linear terhadap kecepatan. Namun, untuk lebar *engrave* tidak terjadi perubahan yang signifikan (sedikit perubahan) pada kecepatan yang berbeda. Pada karakterisasi pembakaran beberapa jenis material yang digunakan diperoleh bahwa pada akrilik, plastik (hitam) dan hardboard terjadi *engrave*

Karakterisasi intensitas, tegangan dan *burning time* yg dibutuhkan oleh 450-nm laser diode pada beberapa material telah dilakukan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui performansi dari *laser diode* terhadap beberapa material.

DAFTAR ACUAN

- [1] Kristin Huff, "The *Engravers Journal*", (ONLINE). Available: <https://www.engraversjournal.com/article.php/2244/index.html>. [Accessed: March 2017]
- [2] Zhaolou Cao, Keyi Wang, Qinglin Wu "Aspherical anamorphic lens for shaping laser diode beam", *Journal of Optic Communication, China*: May 2013, vol.305, pp.53-56
- [3] Daxin Luo, Baiqin Zhao, Xuele Chen, "Laser beam shaping with an ellipsoidal lens", *Journal of Optic, China*: Dec 2011, Vol.201, pp.565-569
- [4] Haiyin Sun, "Laser Diode Beam Basics Manipulation, and Characterizations". Springer, New York, 2012.
- [5] Purnomo Sidi Priambodo, Uruk Darusalam, Eko Tjipto Rahardjo, "Free-Space Optical Propagation Noise Suppression by Fourier Optics Filter Pinhole" *International Journal of Optics and Applications, Indonesia* 2015, Vol.5(2), pp.27-32
- [6] Haiyin Sun, "A Practical Guide to Handling Laser Diode Beams". Springer, ChemImage Corporation, Pittsburgh, PA.USA.2015.
- [7] Fukushima T., Miyahara K., Nakata N., "Beam Shaping of Laser Dioda Using Lloyd's Mirror Interference", *IEEE transl.Shanghai, China*: Sept.2009.
- [8] Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, *Fundamentals of Photonics*. John Wiley & Sons, Inc, 2001
- [9] Fred M. Dickey, Scott C. Holswade, *Laser Beam Shaping Theory and Technique*, Marcel Dekker, Inc, 2000.
- [10] Lin Li, "The Advance and Characteristic of high-power diode laser materials processing", *Optic and Laser Engineering, Manchester,UK*.2000
- [11] Hira Nasim, Yasir Jamil, "Dioda Laser: From Laboratory to Industry", *Journal of Optic and Laser Technology*, 2014
- [12] Fredrich Bachmann, "Industrial Application of High Power Diode Lasers in Materials Processing", *Jurnal of Applied Surface Science*, 2003.
- [13] Breck Hitz, J.J. Ewing, Jeff Hecht, "Introduction to Laser Technology", *The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc*.2001
- [14] Elijah Kannatey-Asibu, Jr., "Principles of Laser Materials Processing", *Jhon Wiley and sons, New Jersy*, 2009.
- [15] Peter Werth, "Introduction to Industrial Laser Material Processing", *Rofin*, 2004.
- [16] William M. Steen, "Laser Material Processing", Springer, Germany, 1991.
- [17] "BeamShaping with Cylindrical Lenses", Newport
- [18] Hiroshi Nakajima "Optical Design Using Excel", *Jhon wiley and son, Singapore*, 2015.