



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS FABRIKASI PERANGKAT MIKROFLUIDIK
PADA MATERIAL ACRYLIC
MENGUNAKAN LASER CO₂ DAYA RENDAH**

TESIS

**KGS. M. ISMAIL
1006788510**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
DEPOK
JULI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS FABRIKASI PERANGKAT MIKROFLUIDIK
PADA MATERIAL ACRYLIC
MENGUNAKAN LASER CO₂ DAYA RENDAH**

TESIS

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik
program studi Teknik Mesin**

**KGS. M. ISMAIL
1006788510**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JULI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Tesis dengan judul :

**ANALISIS FABRIKASI PERANGKAT MIKROFLUIDIK
PADA MATERIAL ACRYLIC
MENGUNAKAN LASER CO₂ DAYA RENDAH**

adalah karya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah kami nyatakan dengan benar.

Nama : KGS. M. ISMAIL

NPM : 1006788510

Tanda Tangan : 


Tanggal : 16 Juli 2012

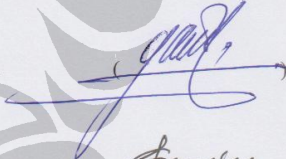
HALAMAN PENGESAHAN

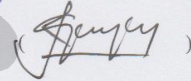
Tesis ini diajukan oleh :
Nama : KGS. M. Ismail
NPM : 1006788510
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Tesis : Analisis Fabrikasi Perangkat Mikrofluidik pada
Material Acrylic Menggunakan Laser CO₂ Daya
Rendah

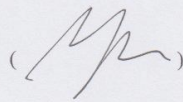
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ario Sunar Baskoro, S.T., M.T., M. Eng. ()

Penguji : Dr. Ir. Gandjar Kiswanto, M. Eng. ()

Penguji : Jos Istiyanto, S.T., M.T., Ph.D. ()

Penguji : Yudan Whulanza, S.T., M.Sc., Ph.D. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Juli 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat dan rahmat-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul "*Analisis Fabrikasi Perangkat Mikrofluidik pada Material Acrylic Menggunakan Laser CO₂ Daya Rendah*" ini tepat pada waktunya. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada program studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

Tesis ini membahas mengenai analisis parameter yang ada pada mesin Laser CO₂, yaitu power laser, dan kecepatan pergerakan laser atau kecepatan pemakanan dan pengulangan pemotongan (pass). Dari setiap sampel yang dibuat dari pengujian dilakukan pengukuran di Laboratorium Metrologi Departemen Teknik Mesin FTUI. Hasil dari pengujian ini adalah nilai dari tiga macam variabel untuk aplikasi pembuatan mikrofluidik. Melalui variabel parameter mesin ini selanjutnya saya lakukan pengujian bertahap untuk mendapatkan setingan parameter mesin, hingga seberapa detail bentuk yang mampu dibuat oleh mesin Laser CO₂ ini.

Tulisan ini sangat berguna bagi saya pribadi khususnya, terutama karena dalam proses yang saya lakukan baik dalam bimbingan, pengujian maupun dalam penulisan banyak ilmu yang saya dapatkan.

Saya sadar bahwa dalam pelaksanaan dan penyusunan tesis ini banyak pihak yang telah membantu saya. Oleh karena itu saya ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ibu dan Bapak tercinta yang selalu mendoakan dan telah memberikan dukungan baik moril maupun materiil;
2. Adik-adikku tersayang, Nyayu Izzah Umami (Nani), Nyayu Mariyam (Nelda) dan Nyayu Saphira Evani (phira) yang selalu setia mendoakan dari jauh. Terima kasih adikku semua yang telah membantu jalannya kuliahku;
3. Bapak Dr. Ario Sunar Baskoro, S.T., M.T., M. Eng. selaku dosen pembimbing yang telah berkenan meluangkan waktu dan memberikan bimbingannya, menyemangati dan menginspirasi saya dalam penyusunan skripsi ini;

4. Bapak Dr. Ir. Gandjar Kiswanto, M.Eng. Bapak Dr. Jos Istiyanto, S.T., M.T., Ph.D., dan Bapak Yudan Whulanza, S.T., M.Sc., Ph.D yang telah memberikan arahan untuk pelaksanaan proses dan metode fabrikasi perangkat mikrofluidik. Yang juga sebagai dosen penguji yang telah berkenan meluangkan untuk menguji dan memberikan masukan pada saat sidang skripsi, sehingga tulisan ini bisa menjadi lebih baik;
5. Teman-teman “Geng Anak Soleh” Pak Suwarsono, Bu Dede, Bu Aida, Pak Diandono, Pak Bawek, Riki, Pak Azka yang telah menjadi teman seperjuangan dan banyak membantu dalam proses penyelesaian tesis.
6. Rekan sebidang, Agus Siswanta yang telah banyak membantu berkaitan dengan tema tesis ini, serta rekan S1 yang menjadi teman lembur dalam pengerjaan tesis.
7. Teman-teman satu angkatan Pasca Sarjana Teknik Mesin 2010 yang telah banyak membantu dalam proses pembelajaran untuk setiap mata kuliah.
8. Senior-senior di STPI-curug yang telah banyak memberikan support dan bantuan untuk penyelesaian tugas belajar.
9. Serta segenap pihak yang telah membantu, yang tidak dapat saya sebutkan satu-persatu yang telah membantu saya.

Tesis ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu saya mengharapkan kritik dan sarannya untuk penulisan yang lebih baik. Akhirnya saya selaku penulis berharap, semoga karya ini dapat bermanfaat bagi segenap pembacanya.

Depok, 16 Juli 2012

Penulis,

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

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

Nama : KGS. M. ISMAIL
NPM : 1006788510
Program Studi : Pasca Sarjana Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tesis

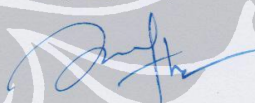
demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

*ANALISIS FABRIKASI PERANGKAT MIKROFLUIDIK
PADA MATERIAL ACRYLIC
MENGUNAKAN LASER CO₂ DAYA RENDAH*

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/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 : 16 Juli 2012
Yang menyatakan,



(KGS. M. ISMAIL)

ABSTRAK

Nama : KGS. M. Ismail
Program Studi : Pasca Sarjana / Magister Teknik DTM UI
Judul : Analisis Fabrikasi Perangkat Mikrofluidik pada Material Acrylic Menggunakan Laser CO₂ Daya Rendah

Mikrofluidik merupakan ilmu yang mengacu pada bidang sains dan teknologi untuk memanipulasi fluida dalam suatu jaringan di dalam *channel* yang dimensinya antara 5 - 500 μm . Tahapan proses yang dilakukan pada teknologi *microfabrication* yaitu desain, *microstructuring* dan *back-end processes*. Desain adalah bentuk dari *channel* yang diinginkan. *Microstructuring* adalah metode teknologi yang digunakan untuk pembentukan mikrofluidik, sedangkan *back-end processes* merupakan proses untuk *joining* material yang telah dilakukan pembentukan *channel*. Dalam penelitian ini, proses desain *channel* menggunakan *software autodesk inventor*. Untuk proses *microstructuring* menggunakan laser CO₂ daya rendah. Penggunaan laser CO₂ sebagai alat pemotong untuk pembentukan mikrofluidik pada material *acrylic* menggunakan beberapa parameter yang dapat mempengaruhi hasil pemotongan, yaitu daya laser, kecepatan pemotongan dan pengulangan pemotongan (*pass*), kemudian dilakukan pengamatan terhadap hasil pemotongan tersebut yaitu kekasaran permukaan (*surface roughness*) *microchannels*. Tahapan terakhir dari *microfabrication* adalah *back-end processes*, proses *joining* dengan menggunakan metode *thermal bonding* untuk membuat mikrofluidik yang dibentuk dapat berfungsi dengan baik. Dari hasil penelitian pembentukan perangkat mikrofluidik dan percobaan pengaliran cairan pada *channel* yang merupakan bagian dari perangkat mikrofluidik telah berhasil dilakukan.

Kata kunci:

Microfabrication, microstructuring, back-end processes, mikrofluidik, laser CO₂, acrylic, thermal bonding.

ABSTRACT

Name : KGS. M.Ismail
Major : Post Graduate / Master of Engineering DTM UI
Title : Analysis of Microfluidics Device Fabrication on Acrylic
by Low Power CO₂ Laser

Microfluidics is the science which refers to the analysis and technology for manipulating fluid inside the microchannels that dimensions 5 – 500 µm. There are three process steps of microfabrication technology for microfluidics device which are design, microstructuring and back-end processes. Design is the process to produce shape of microchannels. while back-end processes is joining process for material have been fabricated of channel. Microstructuring is a method that used for microfluidics device fabrication. In this research, a low power CO₂ laser is applied for microstructuring process. CO₂ laser cutting for microfluidics device fabricated on acrylic was applied by three parameters: power of laser, cutting speed and cutting repetition (number of pass). In the result of cutting is observed surface roughness of microchannels. The last steps is back-end processes, to joining materials by thermal bonding method. The result of this research, microfluidics device was successfully fabricated and the fluid could flow in the microchannels of the microfluidics device.

Keyword:

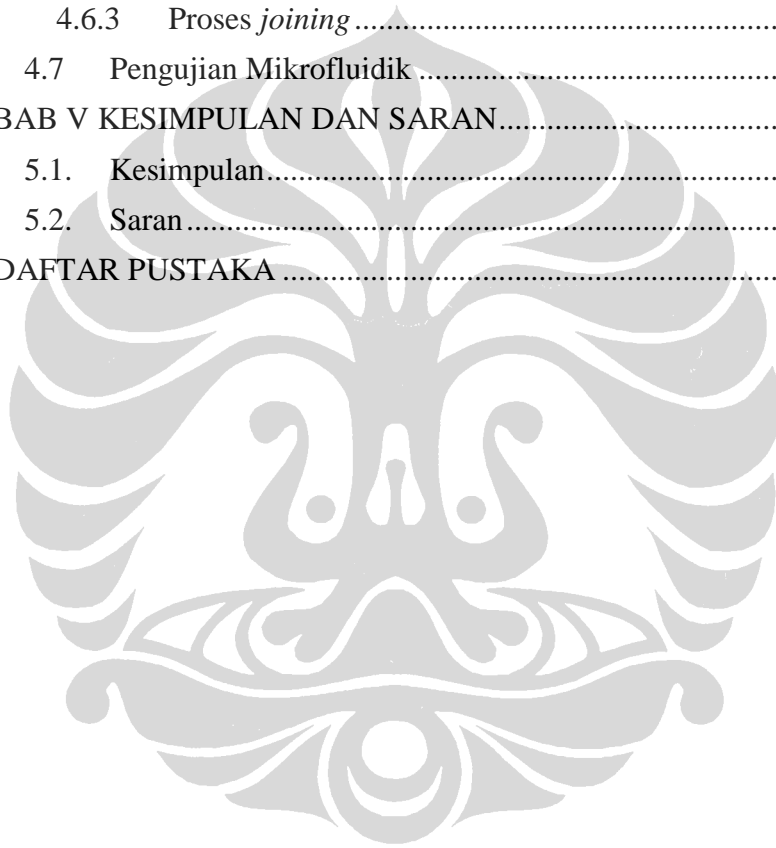
Microfabrication, microstructuring, back-end processes, microfluidics device, CO₂ laser, acrylic, thermal bonding.

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Batasan Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Mikrofluidik.....	5
2.1.1 Karakteristik Mikrofluidik.....	6
2.1.2 Fungsi Mikrofluidik.....	7
2.1.2.1 Kontrol Aliran.....	7
2.1.2.2 Manipulasi Partikel Dan Sel.....	7
2.1.2.3 Injeksi Zat Cair.....	8
2.1.3 <i>Microchannels</i>	9
2.1.3.1 Fungsi <i>Microchannels</i>	9
2.1.3.2 Karakteristik <i>Microchannels</i>	9
2.2 <i>Microfabrication</i>	11
2.2.1 <i>Injection Molding</i>	11
2.2.2 <i>Casting</i>	12
2.2.3 <i>Laser Ablation</i>	13
2.3 Laser.....	13
2.3.1 Prinsip Kerja Laser.....	13
2.3.2 Laser CO ₂	14
2.3.3 Mesin Laser Cutting CO ₂	16

2.4	<i>Acrylic</i>	18
2.5	Analisis Varian (ANOVA).....	19
2.5.1	ANOVA 1 Arah	20
2.5.2	ANOVA 2 Arah tanpa interaksi.....	21
2.5.3	ANOVA 2 Arah dengan interaksi	23
BAB III METODE PENELITIAN.....		25
3.1	Studi Literatur.....	26
3.2	Pengaturan Mesin Laser CO ₂	26
3.3	Desain Lintasan Pemotongan	27
3.4	Proses Pemotongan.....	28
3.5	Analisis Data	30
3.6	Fabrikasi Mikrofluidik.....	30
3.6.1.	Desain Channel	31
3.6.2.	Microstructuring.....	31
3.6.3.	Back-end Processing	32
3.7	Pengujian Mikrofluidik	32
BAB IV PEMBAHASAN.....		33
4.1.	Persiapan Benda Kerja dan Laser CO ₂	33
4.2.	Jarak Fokus Mesin Laser	33
4.3.	Pembuatan Alas Meja Kerja Baru	34
4.4.	Hasil Pemotongan.....	36
4.4.1	Pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan	40
4.4.2	Pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan.....	42
4.4.3	Pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan	45
4.5.	Analisis Hasil Pemotongan.....	47
4.5.1	Analisis of Varians (ANOVA).....	47
4.5.1.1.	Pengaruh daya dan kecepatan terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan.....	47
4.5.1.2.	Pengaruh kecepatan dan pengulangan pemotongan (pass) terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan.....	49
4.5.1.3.	Pengaruh pengulangan pemotongan (pass) dan daya terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan	50
4.5.2.	Friedman Test.....	52

4.5.2.1	Pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap surface roughness hasil pemotongan.....	52
4.5.2.2	Pengaruh parameter pengulangan pemotongan dan daya terhadap surface roughness hasil pemotongan.....	54
4.5.2.3	Pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap surface roughness hasil pemotongan.....	56
4.5.3	Analisis Response Surface Methodology (RSM)	58
4.6.	Pembentukan Mikrofluidik.....	61
4.6.1	Pembentukan Desain <i>Channel</i>	61
4.6.2	Microstructuring.....	61
4.6.3	Proses <i>joining</i>	62
4.7	Pengujian Mikrofluidik	64
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		65
5.1.	Kesimpulan.....	65
5.2.	Saran.....	66
DAFTAR PUSTAKA		67



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1	Channel menyerupai pembuluh kapiler (a), channel untuk analisis aliran Au NPs dan $C_{10}SO_4$ (b)	1
Gambar 2. 1	Karakteristik ukuran dari mikrofluidik	5
Gambar 2. 2	Kontur dinding dan permukaan beberapa bentuk mikrofluidik	6
Gambar 2. 3	Range dimensi channel dalam berbagai sistem (Kandlikar and Steinke (2003)).....	10
Gambar 2. 4	Microfabrication dengan metode injeksi molding	12
Gambar 2. 5	Proses Casting pada material PDMS.....	12
Gambar 2. 6	Sealed-tube CO_2 laser with longitudinal discharge	15
Gambar 2. 7	Mesin laser <i>cutting</i> CO_2	16
Gambar 2. 8	Mekanisme mesin laser <i>cutting</i> CO_2 untuk memotong material .	16
Gambar 3. 1	Diagram alur metode penelitian	25
Gambar 3. 2	Pengaturan parameter mesin laser CO_2 melalui komputer	26
Gambar 3. 3	MPC 6535	27
Gambar 3. 4	Software untuk pembuatan desain lintasan potong mesin laser CO_2	28
Gambar 3. 5	Skema Proses pemotongan.....	29
Gambar 3. 6	Alat ukur <i>surface roughness</i> , stylus untuk pengukuran permukaan material (a), tampilan untuk besaran nilai <i>roughness</i> /Ra (b).....	30
Gambar 3. 7	Diagram proses <i>microfabrication</i> pada polymer	31
Gambar 3. 8	Desain pembentukan channels	31
Gambar 3. 9	Proses bonding metode <i>thermal bonding</i>	32
Gambar 4. 1	Grafik pengaruh jarak sumbu Z terhadap Kedalaman dan lebar hasil pemotongan	34
Gambar 4. 2	Grafik kedataran arah sumbu X	35
Gambar 4. 3	Grafik data kedataran arah sumbu Y.....	35
Gambar 4. 4	Alas meja kerja baru.....	36
Gambar 4. 5	Grafik pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap <i>surface roughness</i> pada 1 kali pengulangan pemotongan.....	40
Gambar 4. 6	Grafik pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap <i>surface roughness</i> pada 2 kali pengulangan pemotongan.....	40
Gambar 4. 7	Grafik pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap <i>surface roughness</i> pada 3 kali pengulangan pemotongan.....	41
Gambar 4. 8	Grafik pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap <i>surface roughness</i> pada 4 kali pengulangan pemotongan.....	41
Gambar 4. 9	Grafik pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap <i>surface roughness</i> pada 5 kali pengulangan pemotongan.....	42
Gambar 4. 10	Grafik pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap <i>surface roughness</i> pada daya 4,8 watt	42

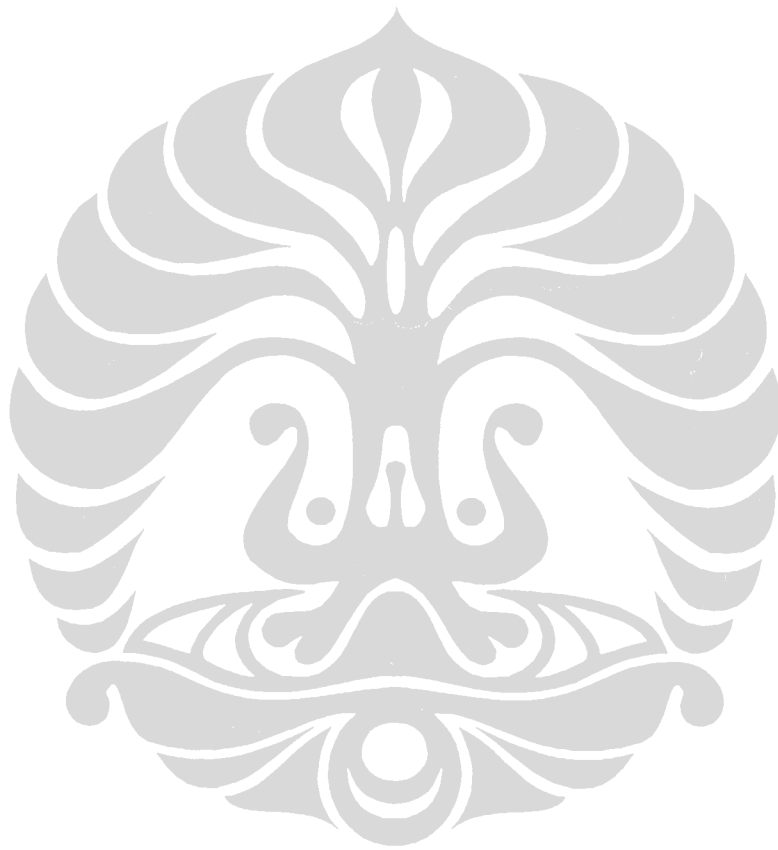
Gambar 4. 11	Grafik pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap <i>surface roughness</i> pada daya 5,4 watt.....	43
Gambar 4. 12	Grafik pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap <i>surface roughness</i> pada daya 6 watt.....	43
Gambar 4. 13	Grafik pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap <i>surface roughness</i> pada daya 6,6 watt.....	44
Gambar 4. 14	Grafik pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap <i>surface roughness</i> pada daya 7,2 watt.....	44
Gambar 4. 15	Grafik pengaruh parameter pengulangan pemotongan dan daya terhadap <i>surface roughness</i> pada kecepatan 5 mm/s.....	45
Gambar 4. 16	Grafik pengaruh parameter pengulangan pemotongan dan daya terhadap <i>surface roughness</i> pada kecepatan 10 mm/s.....	45
Gambar 4. 17	Grafik pengaruh parameter pengulangan pemotongan dan daya terhadap <i>surface roughness</i> pada kecepatan 15 mm/s.....	46
Gambar 4. 18	Grafik pengaruh parameter pengulangan pemotongan dan daya terhadap <i>surface roughness</i> pada kecepatan 20 mm/s.....	46
Gambar 4. 19	Grafik pengaruh parameter pengulangan pemotongan dan daya terhadap <i>surface roughness</i> pada kecepatan 25 mm/s.....	47
Gambar 4. 20	Pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan pada satu kali pemotongan.....	52
Gambar 4. 21	Pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan pada dua kali pemotongan.....	52
Gambar 4. 22	Pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan pada tiga kali pemotongan.....	53
Gambar 4. 23	Pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan pada empat kali pemotongan.....	53
Gambar 4. 24	Pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan pada lima kali pemotongan.....	53
Gambar 4. 25	Pengaruh pengulangan pemotongan dan daya terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan pada kecepatan 5 mm/s.....	54
Gambar 4. 26	Pengaruh pengulangan pemotongan dan daya terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan pada kecepatan 10 mm/s.....	54
Gambar 4. 27	Pengaruh pengulangan pemotongan dan daya terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan pada kecepatan 15 mm/s.....	55
Gambar 4. 28	Pengaruh pengulangan pemotongan dan daya terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan pada kecepatan 20 mm/s.....	55
Gambar 4. 29	Pengaruh pengulangan pemotongan dan daya terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan pada kecepatan 25 mm/s.....	55
Gambar 4. 30	Pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan pada daya 4,8 watt.....	56

Gambar 4. 31	Pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan pada daya 5,4 watt.....	57
Gambar 4. 32	Pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan pada daya 6 watt.....	57
Gambar 4. 33	Pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan pada daya 6,6 watt.....	57
Gambar 4. 34	Pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan pada daya 7,2 watt.....	58
Gambar 4. 35	Grafik pengaruh daya dan pengulangan pemotongan (<i>pass</i>) terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan	59
Gambar 4. 36	Grafik pengaruh daya dan kecepatan terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan	60
Gambar 4. 37	Grafik pengaruh layer dan kecepatan terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan	60
Gambar 4. 38	Desain bentuk dan dimensi <i>channel</i>	61
Gambar 4. 39	Hasil pembentukan <i>channel</i>	61
Gambar 4. 40	Multitester temperatur.....	62
Gambar 4. 41	<i>Heat gun</i>	62
Gambar 4. 42	Material yang telah dibentuk <i>channel</i> (a) material penutup (b) material setelah dilakukan <i>joining</i> (c)	63
Gambar 4. 43	Hasil pengujian mikrofluidik	64

DAFTAR TABEL

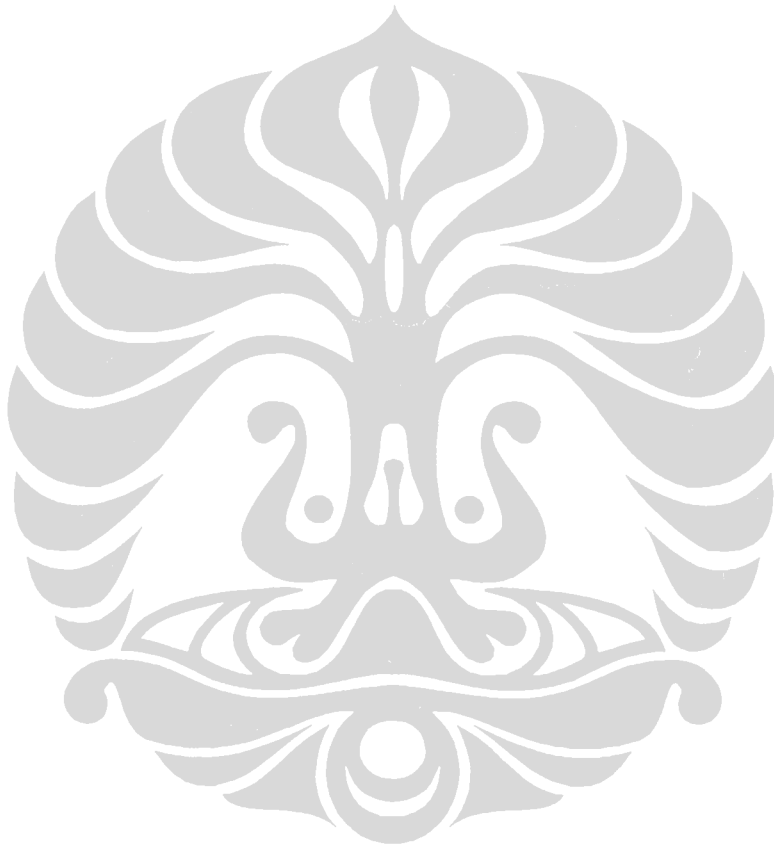
Tabel 1. 1	Perbandingan material untuk <i>microstructuring</i>	2
Tabel 2. 1	Skema klasifikasi dimensi channel	11
Tabel 2. 2	Properties <i>acrylic</i>	18
Tabel 2. 3	Data ANOVA 1 arah.....	20
Tabel 2. 4	ANOVA 1 arah.....	20
Tabel 2. 5	ANOVA 2 arah tanpa interaksi.....	21
Tabel 2. 6	ANOVA 2 arah tanpa interaksi.....	22
Tabel 2. 7	Data ANOVA 2 arah dengan interaksi	23
Tabel 2. 8	ANOVA 2 arah dengan interaksi.....	23
Tabel 3. 1	Spesifikasi mesin laser CO ₂	27
Tabel 4. 1	Data pengaruh jarak sumbu Z terhadap kedalaman dan lebar hasil pemotongan	34
Tabel 4. 2	Data surface roughness hasil pemotongan berdasarkan parameter daya dan kecepatan pada 1 <i>pass</i>	37
Tabel 4. 3	Data surface roughness hasil pemotongan berdasarkan parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan pada daya 6 watt.....	37
Tabel 4. 4	Data surface roughness hasil pemotongan berdasarkan parameter pengulangan pemotongan dan daya pada kecepatan 10 mm/s.....	38
Tabel 4. 5	Data pengaruh <i>surface roughness</i> antara parameter daya laser dan kecepatan pemotongan pada 1 <i>pass</i>	47
Tabel 4. 6	Analisis varian <i>surface roughness</i> hasil pemotongan berdasarkan data pada tabel 4.5	48
Tabel 4. 7	Data pengaruh <i>surface roughness</i> antara parameter kecepatan pemotongan dan pengulangan pemotongan (pass) pada daya 4.8 watt.....	49
Tabel 4. 8	Analisis varian <i>surface roughness</i> hasil pemotongan berdasarkan data pada tabel 4.7	49
Tabel 4. 9	Data <i>surface roughness</i> antara parameter daya laser dan kecepatan pemotongan.....	50
Tabel 4. 10	Analisis varian <i>surface roughness</i> hasil pemotongan berdasarkan data pada tabel 4.9	51
Tabel 4. 11	Chi kuadrat P value untuk pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan	54
Tabel 4. 12	Chi kuadrat dan P value untuk pengaruh parameter jumlah pengulangan dan daya terhadap <i>surface roughness</i> hasil pemotongan.....	56

Tabel 4. 13 Chi kuadrat P value untuk pengaruh parameter kecepatan dan jumlah pengulangan pemotongan terhadap *surface roughness* hasil pemotongan 58



DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1.	DATA SURFACE ROUGHNESS HASIL PENGUKURAN HASIL PEMOTONGAN	69
LAMPIRAN 2.	DATA HASIL PERHITUNGAN ANALISIS METODE ANOVA.....	73
LAMPIRAN 3.	ALGORITMA PERHITUNGAN ANALISIS FRIEDMAN TEST	85
LAMPIRAN 4.	ALGORITMA PERHITUNGAN PROSES ANALISIS RESPONSE SURFACE METHODOLOGY (RSM)	94

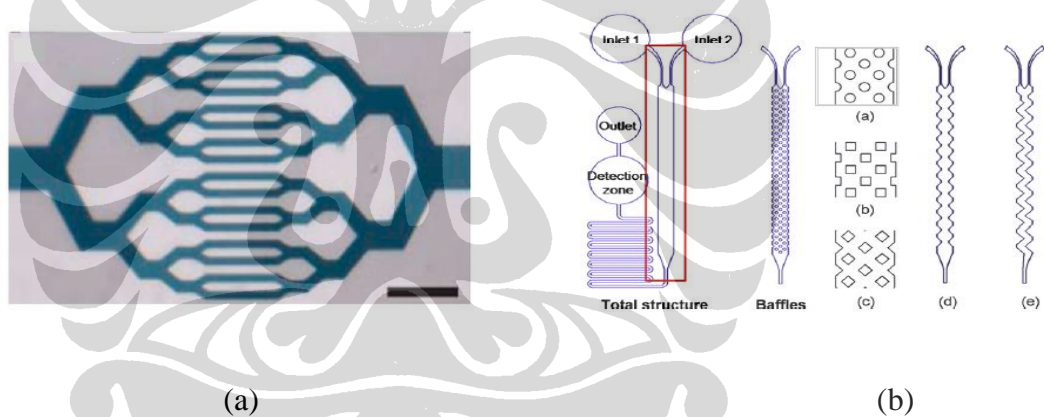


BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Penelitian yang dilakukan untuk pembentukan mikrofluidik telah banyak dilakukan, karena pemanfaatannya dapat digunakan pada berbagai bidang ilmu diantaranya bidang biomedical dengan salah pembentukan kanal channel yang menyerupai jaringan pembuluh kapiler, biochemical untuk pengamatan karakteristik aliran Au NPs dan $C_{60}SO_4$ untuk bentuk channel yang bervariasi, dan masih banyak lagi bidang-bidang ilmu yang lain. Untuk pembentukan mikrofluidik terdapat hal-hal yang harus diperhatikan yaitu sifat-sifat material yang digunakan dan teknologi pembentukannya.



Gambar 1. 1 Channel menyerupai pembuluh kapiler (a) [1]
channel untuk analisis aliran Au NPs dan $C_{60}SO_4$ (b) [2]

Pada penelitian awal untuk pembentukan mikrofluidik, material yang banyak digunakan adalah silicon [3] dan glass [4] karena material tersebut memiliki sifat fisik, elektrik dan optik material yang baik, tetapi memiliki kekurangan pada proses manufaktur yaitu biaya yang diperlukan besar. Sedangkan dengan penggunaan material polymer untuk pembentukan mikrofluidik dapat mengurangi biaya dan dapat menggunakan proses manufaktur yang sederhana jika dibandingkan dengan material silicon dan glass.

Perbandingan beberapa material untuk *microstructuring* terlihat pada tabel 1.1 Beberapa contoh material yang termasuk dalam polymer adalah PolyMethyl Methacrylate (PMMA), Polycarbonate, dan Poly DimethylSiloxane (PDMS).

Tabel 1. 1 Perbandingan material untuk *microstructuring* [5]

	Silicon	Glass	Technical thermoplastics (e.g. PMMA, PC, PEEK)	Thermoset polymers	Elastomers
Microfabrication Structuring processes	Easy-medium Wet and dry etching	Easy-medium Wet etching, photostructuring	Easy Injection molding, hot embossing, thermoforming, laser ablation	Medium Casting, lithography, etching	Easy Casting
Possible geometries	Limited, 2D	Limited, 2D	Many, 2D, 3D	Mostly 2D, 3D possible	Mostly 2D, 3 D possible
Assembly	Easy	Medium	Easy	Medium	Easy
Interconnections	Difficult	Difficult	Easy	Easy	Easy-medium
Mechanical stability	High	High	Low-medium	High	Very low
Temperature stability	High	High	Low-medium	Medium	Low
Acid stability	High	High	High	High	High
Alkaline stability	Limited	High	High	High	High
Organic solvent stability	High	Medium-high	Low-medium	Medium-high	Low
Optical transparency	No	High	Mostly high	Partly	High
Material price	Medium	Medium-high	Low-medium	Medium	Low

Beberapa teknik pembentukan mikrofluidik yang banyak dilakukan, untuk material silicon dan glass adalah etching [6], dan photolithography. Sedangkan untuk material polymer teknik pembentukan yang dapat digunakan adalah *hot embossing* [7], *injection molding* [8], *soft lithography* [9] dan *laser ablation* [10]. Penggunaan laser telah dilakukan sejak 40 tahun yang lalu, baik penggunaan laser sebagai cutting, drilling dan welding. Sedangkan metode pembentukan mikrofluidik menggunakan laser telah banyak dilakukan, dengan berbagai macam jenis laser yang digunakan, khususnya untuk penggunaan mesin laser CO₂ [11]. Penggunaan laser pada penelitian ini dimaksudkan untuk melanjutkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan diantaranya adalah penggunaan laser diode untuk proses sintering dan pemotongan pada material *acrylic* dan penggunaan laser CO₂ untuk aplikasi biomedical dengan pengamatan hasil pemotongan laser CO₂ pada material gypsum [12]. Untuk penelitian ini digunakan mesin laser cutting CO₂ untuk mengetahui karakteristik dan beberapa parameter-parameter yang akan mempengaruhi hasil pemotongan terhadap material *acrylic* serta kemampuan mesin potong laser CO₂ dalam pembentukan mikrofluidik. Langkah awal yang dilakukan adalah analisis hasil pembentukan mikrofluidik untuk mengetahui karakteristik hasil pemotongan dengan beberapa parameter yang diberikan, sehingga dapat mempermudah langkah berikutnya

distribusi pada perhitungan model simulasi, yang terutama adalah untuk yaitu penggunaan mesin laser CO₂ untuk pembentukan mikrofluidik yang diinginkan.

1.2. Perumusan Masalah

Dalam pembentukan mikrofluidik, hal pertama yang harus diperhatikan adalah pembentukan channel atau yang disebut tahapan *microstructuring*. Perlu dilakukan analisis terlebih dahulu terhadap hasil dari pembentukan microchannels pada *acrylic* dengan menggunakan mesin laser CO₂, karena beberapa pengaturan parameter laser akan mempengaruhi hasil pemotongan. Pada penelitian ini, hasil yang diinginkan adalah untuk mengetahui karakteristik dan kemampuan parameter laser cutting CO₂ seperti daya laser yang digunakan, kecepatan proses pemotongan dan pengulangan pemotongan pada daerah yang sama (*pass*) terhadap *surface roughness* hasil pembentukan *channel*. Setelah pembentukan *channel* dapat dilakukan dilanjutkan dengan proses *joining* agar mikrofluidik yang dibentuk dapat berfungsi dengan baik.

1.3. Tujuan Penelitian

Dalam tugas akhir ini, penelitian yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui karakteristik dan kemampuan pembentukan mikrofluidik pada *acrylic* dengan menggunakan laser CO₂ daya rendah.

Berikut ini adalah beberapa hal yang dilakukan pada penelitian ini:

- Melakukan percobaan secara langsung proses pemotongan pada material *acrylic* menggunakan laser CO₂, untuk memperoleh data-data hasil pemotongan
- Analisis hasil pemotongan berdasarkan data-data yang diperoleh dari proses pemotongan
- Melakukan pembentukan *channels* dilanjutkan dengan proses *joining* pada material yang telah dibentuk channels dengan material yang sama.
- Pengujian terhadap hasil dari pembentukan mikrofluidik.

1.4. Batasan Penelitian

Dalam penelitian ini dilakukan pembatasan permasalahan yang mencakup:

- Menggunakan mesin laser CO₂ di laboratorium teknologi manufaktur dan otomasi Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia
- Untuk proses pemotongan menggunakan material *acrylic*.
- Parameter input yang digunakan adalah daya laser, kecepatan pemotongan dan pengulangan pemotongan (*pass*)
- Parameter hasil yang dilakukan pengamatan adalah *surface roughness* hasil pemotongan

1.5. Sistematika Penelitian

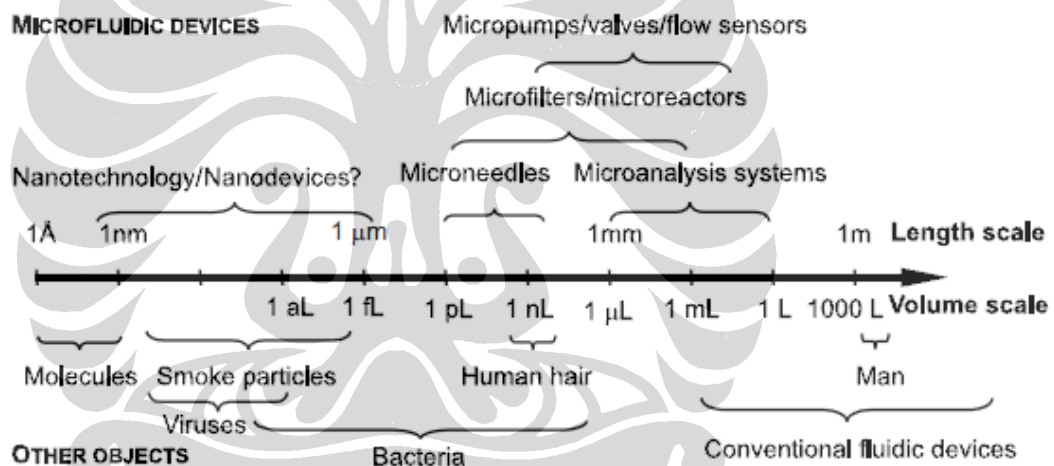
Penelitian ini dibahas secara berurutan dan disusun dalam lima bab dengan sistematika sebagai berikut.

- Bab I : Pendahuluan
Memberikan penjelasan mengenai latar belakang masalah, tujuan penulisan, manfaat penelitian, batasan penelitian dan sistematika pembahasan.
- Bab II : Tinjauan Pustaka
Pembahasan teori mengenai mikrofluidik, microfabrication, laser dan material *acrylic*.
- Bab III : Metode Penelitian
Membahas tentang metodologi dan pelaksanaan penelitian.
- Bab IV : Pembahasan
Membahas hasil percobaan yang dilakukan, proses pembentukan mikrofluidik dan pengujian mikrofluidik.
- Bab V : Kesimpulan dan Saran
Menjelaskan tentang kesimpulan dan saran yang diambil setelah proses penelitian.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mikrofluidik

Perangkat mikrofluidik adalah suatu alat yang di dalamnya terdiri dari satu atau lebih saluran kecil dengan dimensi kurang dari 1 mm. Mikrofluidik secara bahasa *microfluidics* yaitu ilmu pengetahuan dan sistem rekayasa di mana karakter suatu zat cair berbeda dari teori aliran konvensional terutama karena skala dimensi yang lebih kecil. Cairan yang umum digunakan pada perangkat mikrofluidik adalah sampel darah, suspensi sel bakteri, solusi protein atau antibodi dan berbagai jenis buffer.



Gambar 2. 1 Karakteristik ukuran dari mikrofluidik [13]

Penggunaan perangkat mikrofluidik untuk melakukan penelitian pada bidang biomedis dan menciptakan teknologi yang berguna pada bidang kesehatan memiliki sejumlah keuntungan yang signifikan. Pertama, karena volume cairan dalam saluran ini sangat kecil, biasanya hanya beberapa nanoliters, jumlah reagen dan analit yang digunakan cukup kecil. Hal ini sangatlah penting untuk reagen yang harganya mahal.

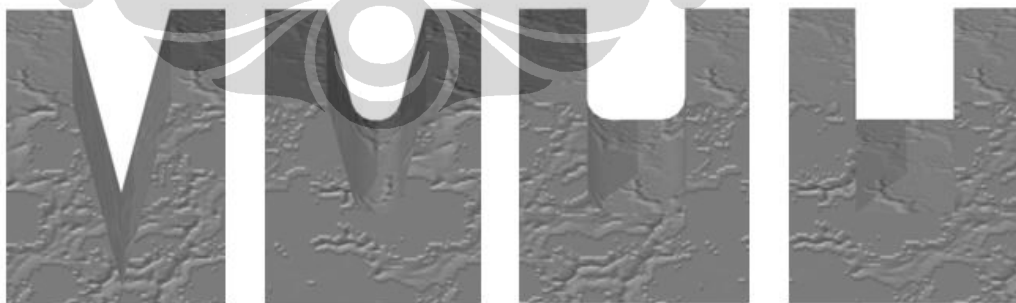
Teknik-teknik rekayasa digunakan untuk membangun perangkat mikrofluidik, dibahas secara lebih mendalam, secara umum untuk membuat perangkat ini

dengan biaya yang relatif murah. Dengan cara ini diharapkan dapat memenuhi sifat perangkat mikro, yaitu sistem yang rumit dan bertingkat serta kompleks. Dengan cara yang sama dengan mikroelektronik, teknologi mikrofluidik memungkinkan pembuatan perangkat yang sangat terintegrasi untuk melakukan beberapa fungsi yang berbeda pada chip substrat yang sama. Salah satu tujuan jangka panjang di bidang mikrofluidik ini adalah untuk menciptakan sistem yang terintegrasi, perangkat diagnostik klinis portable untuk rumahan, sehingga dapat mempercepat analisis dan juga menghilangkan waktu prosedur analisis laboratorium yang lama.

2.1.1 Karakteristik Mikrofluidik

Mikrofluidik merupakan ilmu yang mengacu pada bidang sains dan teknologi untuk memanipulasi fluida dalam suatu jaringan di dalam channel yang dimensinya antara 5 - 500 μm . Fluida yang digunakan dalam pengujian di mikro fluida ini beragam, dari karakter fluida itu sendiri dan juga volume yang digunakan dalam skala femtoliter ($10^{-15}l$) hingga mikroliter ($10^{-6}l$).

Mikrofluidik dapat dibuat dengan bermacam-macam material dan proses pengerjaan, di antaranya adalah material silicon dan glass. Namun ada pula yang dibuat dengan beberapa jenis polymer, seperti Poly Methyl Methacrylate (PMMA), Polycarbonate dan Co-polyesters, dan Poly Dimethylsiloxane (PDMS). Karakter permukaan channel juga berbeda pada material yang berbed



Gambar 2. 2 Kontur dinding dan permukaan beberapa bentuk mikrofluidik

2.1.2 Fungsi Mikrofluidik

Fungsi mikro fluida sangat luas, tergantung dari ukuran dan variasi model jalur alirannya. Secara umum, fungsi tersebut dapat digolongkan dalam 3 hal, yaitu kontrol aliran, manipulasi partikel dan sel serta injeksi cairan.

2.1.2.1 Kontrol Aliran

Perangkat mikrofluidik difokuskan penggunaannya terutama pada kontrol aliran zat cair, yaitu pada penyesuaian komponen fungsi termasuk pemompaan, pengisolasian, pemindahan, pengukuran, dan pencampuran. Ada banyak metode pendekatan untuk memompa mikrofluidik, dan metode pendekatan yang paling umum adalah aliran yang dikendalikan oleh tekanan dan aliran elektro-osmotik.

Fungsi lain perangkat mikrofluidik yang sangat mendasar adalah kontrol laju aliran fluida dengan isolasi atau switching. Fungsi ini sering dilakukan oleh semacam proses pembentukan kembali permukaan, tetapi kemungkinan juga termasuk pendekatan dengan kondisi tanpa gerakan berdasarkan perbedaan perilaku hidrodinamik atau tegangan permukaan.

Katup mikro yang berdasarkan pada diafragma atau permukaan belokan lainnya sering menguntungkan untuk kompatibilitas dengan lapisan berbasis microfabrication. Tetapi ada berbagai macam dari pendekatan lain yang juga termasuk komponen yang bergeser atau berputar. Aplikasi mikrofluidik juga melibatkan analisis pada sampel khusus yang dikontrol untuk dialirkan kedalam larutan buffer, atau lebih dari satu macam sampel cairan harus terjadi interaksi. Jadi ada banyak inovasi dalam metode injeksi pencampuran dan aliran yang telah dikembangkan. Mode aliran yang konsisten dan stabil merupakan kondisi yang sangat penting untuk berbagai aplikasi analisis sampel.

2.1.2.2 Manipulasi Partikel Dan Sel

Salah satu fungsi mikrofluidik yang penting dalam analisis kimia dan biokimia adalah pemisahan partikel seperti makromolekul, protein, dan konstituen lainnya yang mungkin terkandung dalam suatu cairan. Untuk aplikasi analisis ini,

tidak hanya partikelnya yang harus dipisahkan, tetapi fungsi penyaringan dan pra-konsentrasi biasanya juga diperlukan sebagai langkah prasyarat.

Pada skala partikel yang lebih besar, pengurutan akan lebih menarik dibandingkan dengan penyaringan. Partikel difokuskan pada area spasial yang sempit untuk analisis pada resolusi tinggi. Salah satu aplikasi yang bermanfaat dari analisis partikel yang berfokus adalah pada aliran sitometri untuk menghitung jumlah partikel atau sel dalam arus cairan.

Perangkat paling menarik dari fungsi mikrofluidik pada aplikasi biologis adalah manipulasi langsung dari sel-sel hidup. Berbagai fungsi manipulasi sel yang meliputi tidak hanya pemisahan, penempatan, dan pembatasan sel, tetapi juga operasi yang bersifat destruktif seperti aplikasi tegangan mekanikal, dan penyelidikan neurofisiologi.

2.1.2.3 Injeksi Zat Cair

Berbeda dengan kontrol aliran dalam volume terbatas dan manipulasi partikel dan sel dalam fluida, aplikasi sistem mikro fluida ini melibatkan pemancaran aliran dalam bentuk tetesan, tembakan bertekanan (jet), dan semprotan.

Fungsi yang paling sesuai dengan mikrofluidik di mana sistem tersebut melibatkan arus eksternal adalah pembangkitan tetesan untuk pencetakan gambar di atas kertas dengan *ink-jet*. Fungsi ini telah komersial dalam bidang pencetakan gambar selama bertahun-tahun dan telah menjadi hal begitu biasa sehingga tidak dianggap lagi dalam judul mikrofluidik. Namun, ukuran tetesan dan karakteristik dimensi dari komponen dalam mesin pencetakannya masih dalam kisaran mikro, dan apabila dilakukan pengukuran maka hukum yang terkait dengan faktor-faktor seperti tegangan permukaan, adhesi kapiler, dan saluran sangat relevan.

Selain itu, metode *ink-jet* telah berkembang tidak sekedar pada pencetakan gambar model dua dimensi (2D), namun juga sudah masuk dalam pencetakan objek dengan model tiga dimensi (3D) dan juga aplikasi biologi.

Fungsi penting mikrofluidik lainnya adalah pembuatan semprotan halus, khususnya dengan metode pancaran listrik. Jet mikrofluidik di udara umumnya tidak layak karena ketidakstabilan ikatannya dibandingkan dengan

tegangan permukaan. Tetapi fluida bertekanan (jet) dapat digunakan untuk menyuntikkan cairan ke dalam reservoir cairan yang direkayasa untuk mendapatkan kecenderungannya. Aplikasi fungsi mikrofluidik ini sepenuhnya berbeda dari yang dibutuhkan oleh aplikasi biologi atau kimia.

2.1.3 Microchannels

Aliran fluida dalam saluran adalah inti dari sistem baik yang alami ataupun buatan manusia. Pada sistem biologis, transfer panas dan massa yang terjadi di dalam saluran, seperti otak, paru-paru, ginjal, usus, dan pembuluh darah. Begitupun pada sistem buatan manusia, seperti heat exchanger, reaktor nuklir, desalinasi unit, dan satuan pemisahan udara. Secara umum, proses transportasi terjadi di dinding saluran. Sedangkan sebagian besar aliran berlangsung melalui penampang dari saluran. Dimana penampang saluran berfungsi sebagai penghubung cairan transportasi ke dan dari dalam saluran.

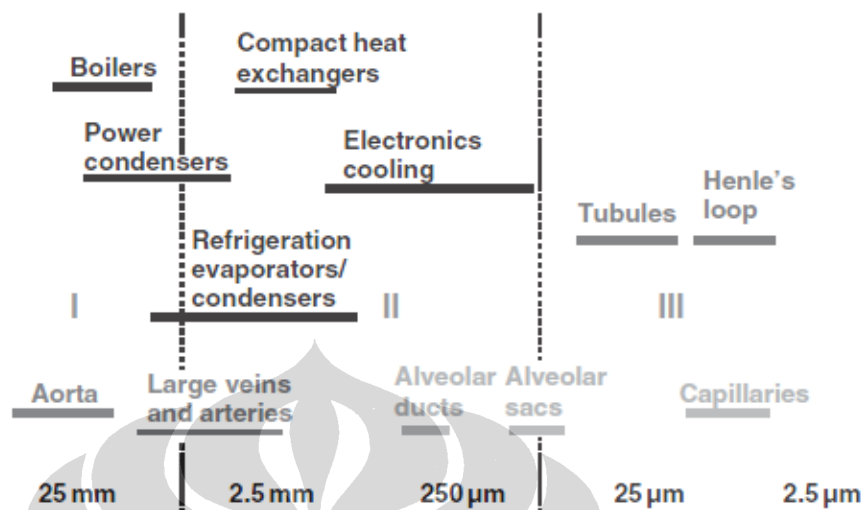
2.1.3.1 Fungsi Microchannels

Saluran berfungsi untuk mencapai dua tujuan yaitu : (i) membawa cairan ke inti kontak melalui dinding saluran dan (ii) membawa cairan ke dinding dan dapat menghapus cairan di dinding setelah proses transfer dicapai. Kecepatan proses transfer tergantung pada luas permukaan, yang bervariasi dengan diameter d untuk tabung melingkar, sedangkan laju aliran tergantung pada luas penampang, bervariasi yang linear dengan D^2 . Dengan demikian, luas permukaan tabung untuk rasio volume bervariasi sebagai $1/D$. jelas, ketika diameter berkurang, luas permukaan untuk rasio volume meningkat

2.1.3.2 Karakteristik Microchannels

Pada Gambar 2.3 ditunjukkan klasifikasi dimensi channel yang digunakan dalam berbagai sistem. Dalam sistem biologis, proses transfer massa menggunakan dimensi yang jauh lebih kecil, sedangkan pada saluran yang lebih besar yang digunakan untuk transfer cairan. Sejak dimensi dianggap penting, untuk kisaran puluhan atau ratusan micrometers, penggunaan istilah “microscale”

telah diterima untuk ilmu pengetahuan dan teknologi yang terkait dengan proses pada skala ini .



Gambar 2. 3 Range dimensi channel dalam berbagai sistem
(Kandlikar and Steinke (2003))

Klasifikasi menurut mehendale et al . (2000) dibagi menjadi :

- 1 untuk 100 μm disebut microchannels
- 100 μm sampai 1 mm disebut meso-channels
- 1 mm sampai 6 mm disebut compact passage , dan
- lebih dari 6 mm disebut conventional passage.

Pada sistem biologis, aliran dalam kapiler terjadi pada bilangan Reynolds yang sangat rendah. Diperlukan sebuah model pendekatan yang berbeda dalam kasus ini. Dikarenakan juga, pengaruh kekuatan electrokinetic yang sudah dianggap penting. Aliran two-Phase di saluran di bawah 10 mikrometer belum diterjemahkan, sehingga skema klasifikasi awal Kandlikar dan Grande (2003) sedikit dimodifikasi, dan skema lebih umum yang didasarkan pada dimensi saluran terkecil yang disajikan dalam tabel 2.1. Skema klasifikasi ini pada dasarnya digunakan untuk kemudahan dalam terminologi; penerapan kontinum teori atau slip aliran kondisi aliran gas perlu diperiksa untuk kondisi operasi yang sebenarnya di setiap saluran.

Tabel 2. 1 Skema klasifikasi dimensi channel [14]

Conventional channels	$> 3 \text{ mm}$
Minichannels	$3 \text{ mm} \geq D > 200 \mu\text{m}$
Microchannels	$200 \mu\text{m} \geq D > 10 \mu\text{m}$
Transitional Microchannels	$10 \mu\text{m} \geq D > 1 \mu\text{m}$
Transitional Nanochannels	$1 \mu\text{m} \geq D > 0.1 \mu\text{m}$
Nanochannels	$0.1 \mu\text{m} \geq D$

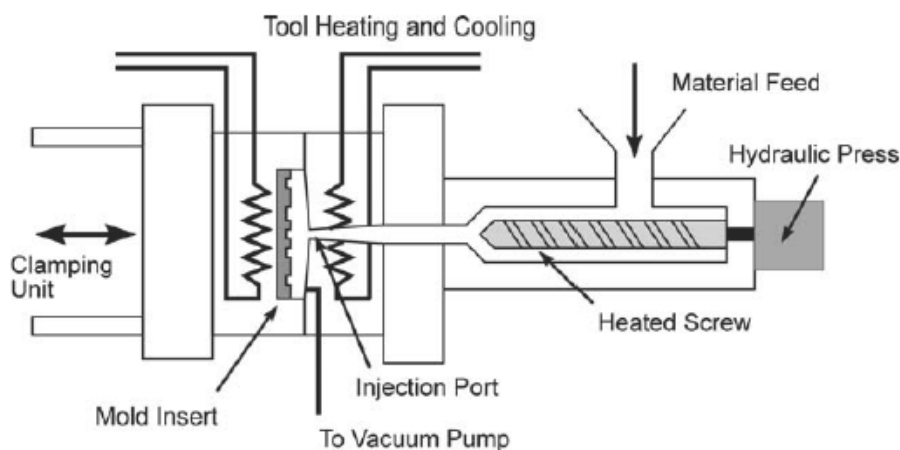
D: smallest channel dimension

2.2 *Microfabrication*

Ada beberapa teknologi microfabrication yang umum digunakan untuk pembentukan mikrofluidik, teknik pembentukan mikrofluidik sangat berpengaruh pada material yang digunakan, untuk material silicon dan glass teknik yang sering digunakan adalah photolithography dan etching, sedangkan untuk material polymer adalah injection molding, hot embossing, casting, thermoforming dan laser ablation. Pada bab ini akan menjelaskan beberapa metode pembentukan pada material polymer yang dapat dijadikan perbandingan antar metode.

2.2.1 *Injection Molding*

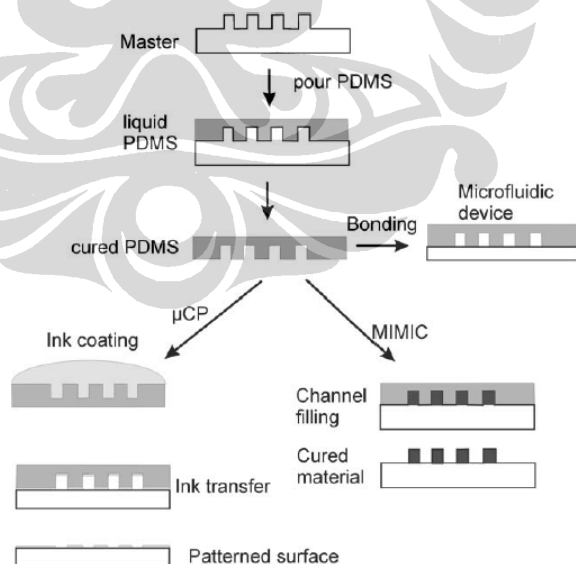
Injection molding adalah proses untuk berbagai macam mikrofluidik, injection molding dapat digunakan untuk material polimer termasuk polimide konduktif yang dapat berfungsi pengalir listrik ataupun mekanik sebagai katup mikrofluidik. injection molding memerlukan master sebagai cetakan bentuk yang diinginkan. Kata injeksi, yaitu metode yang digunakan untuk mentransfer material dari mold cavity (gambar 2.4).



Gambar 2. 4 Microfabrication dengan metode injeksi molding [5]

2.2.2 Casting

Pembentukan mikrofluidik dengan metode Casting, material yang sering digunakan adalah PMMA, tetapi bisa juga untuk material lain seperti PC, PI, PETPVC, etc. pada microfabrication, untuk mold terbuat dari material yang kaku seperti silicon atau metal. Untuk tahapan metode ini cukup sederhana seperti pada gambar 2.5 Material yang dimasukkan kedalam cetakan dalam keadaan cair.



Gambar 2. 5 Proses Casting pada material PDMS [5]

2.2.3 *Laser Ablation*

Metode lain yang sering digunakan untuk microfabrication adalah direct writing, dimana metode ini memiliki proses yang lebih sederhana jika dibandingkan dengan metode-metode yang dijelaskan sebelumnya. Salah satu metode direct writing yang digunakan adalah laser ablasi, dimana pembentukan permukaan material dengan memanfaatkan sinar laser. dan jenis yang paling umum digunakan dalam laser ablasi adalah laser excimer, laser Neodymium-yttrium aluminum garnet (Nd-YAG) dan laser karbon dioksida (CO₂).

- Excimer lasers with ultraviolet wavelengths (351, 308, 248, 193 nm)
- Nd:YAG lasers with near infrared, visible, and UV wavelengths (1,067, 533, 355, 266 nm)
- CO₂ lasers with deep infrared wavelength (10.6 μm).

2.3 **Laser**

Laser adalah suatu divais yang memancarkan gelombang elektromagnetik melewati suatu proses yang dinamakan emisi spontan. Istilah laser merupakan singkatan dari *light amplification by stimulated emission of radiation*. Berkas laser umumnya sangat koheren, yang mengandung arti bahwa cahaya yang dipancarkan tidak menyebar dan rentang frekuensinya sempit (*monochromatic light*). Laser merupakan bagian khusus dari sumber cahaya. Sebagian besar sumber cahaya, emisinya tidak koheren, spektrum frekuensinya lebar, dan phasanya bervariasi terhadap waktu dan posisi. Daerah kerja divais laser tidak terbatas pada spektrum cahaya tampak saja tetapi dapat bekerja pada daerah frekuensi yang luas, Oleh karena itu, divais tersebut dapat berupa laser infra red, laser ultra violet, laser X-ray, atau laser visible.

2.3.1 **Prinsip Kerja Laser**

Laser dihasilkan dari proses relaksasi elektron. Pada saat proses ini maka sejumlah foton akan di lepaskan berbeda sengan cahaya senter emisi pada laser terjadi dengan teratur sedangkan pada lampu senter emisi terjadi secara acak. Pada laser emisi akan menghasilkan cahaya yang memiliki panjang gelombang

tertentu. berbeda dengan lampu senter emisi akan menghasilkan cahaya dengan banyak panjang gelombang. proses yang terjadi adalah elektron pada keadaan ground state (pada pita valensi) mendapat energy kemudian statusnya naik menuju pita konduksi (keadaan eksitasi) kemudian elektron tersebut kembali ke keadaan awal (ground state) diikuti dengan beberapa foton yang terlepas kemudian agar energi yang dibawa cukup besar maka dibutuhkan sebuah resonator resonator ini dapat berupa lensa atau cermin yang sering digunakan adalah lensa dan cermin. ketika di dalam resonator maka foton-foton tersebut akan saling memantul terhadap dinding resonator sehingga cukup kuat untuk meninggalkan resonator tersebut. laser cukup kuat digunakan sebagai alat pemotong misalnya adalah laser CO₂, laser yang kuat adalah tingkat pelebarannya rendah dan energi fotonnya tinggi.

Laser dapat beroperasi pada modus kontinu (*continuous wave*) dengan amplitudo keluaran konstan atau dalam bentuk pulsa. Laser pulsa dapat dihasilkan dengan teknik Q-switching, mode terkunci (*modelocking*) atau gain switching. Laser dalam bentuk pulsa dapat menghasilkan daya yang sangat besar. Dalam mode operasi kontinu, berkas laser yang dihasilkan relatif konstan terhadap waktu. Proses tersebut dihasilkan dari populasi inversi yang berlangsung terus-menerus menggunakan sumber pemompa energi yang stabil. Sedangkan dalam mode operasi pulsa, berkas laser yang dihasilkan berubah terhadap waktu secara bolak-balik dengan mode on dan off. Laser pulsa biasanya dibuat dengan tujuan untuk menghasilkan power laser yang sangat besar dengan waktu radiasi yang singkat.

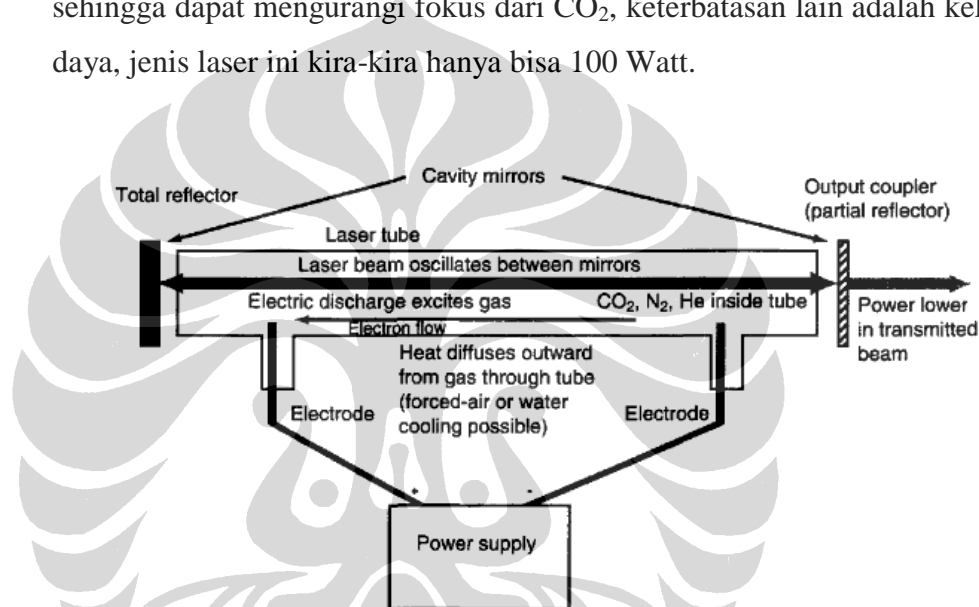
2.3.2 Laser CO₂

Dari beberapa jenis laser yang ada, laser CO₂ (Laser Karbon Dioksida) adalah yang paling banyak digunakan terutama dalam bidang industri dan biomedical. Hal-hal keunggulan yang dimiliki laser CO₂ adalah kombinasi antara efisiensi yang tinggi dan keluaran daya yang tinggi juga. Biasanya berkisar antara 5 - 20 % dari daya masukan untuk sinar yang dihasilkan, ini merupakan nilai tertinggi jika dibandingkan dengan jenis laser gas yang lain. Laser CO₂ memancarkan panjang gelombang antara 9 – 11 μm, tetapi lebih banyak yang

menyimpulkan bahwa panjang gelombang laser CO₂ adalah 10.6 μm. Dengan panjang gelombang tersebut laser CO₂ dapat digunakan untuk material organik, keramik, dll.

Beberapa jenis dari laser CO₂ :

1. *Sealed-tube CO₂ laser* dengan pelepasan sepanjang tube yang kemudian pada ujung tube diletakkan kaca agar terjadi resonansi, seperti pada gambar 2.6, jenis laser ini merupakan jenis laser yang paling sederhana, tetapi memiliki keterbatasan yaitu proses pelepasannya dapat memisahkan molekul CO₂ sehingga dapat mengurangi fokus dari CO₂, keterbatasan lain adalah keluaran daya, jenis laser ini kira-kira hanya bisa 100 Watt.



Gambar 2. 6 Sealed-tube CO₂ laser with longitudinal discharge [15]

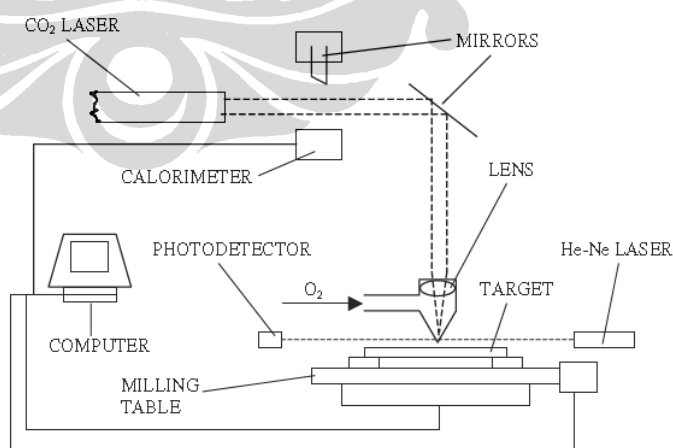
2. *Waveguide CO₂ laser*, laser ini merupakan variasi dari *sealed CO₂ laser*. Dimana pelepasan dan gas laser terkonsentrasi pada laser yang dihasilkan yang disebut panjang gelombang 10.6 μm, seperti yang ditunjukkan pada gambar 11, jenis laser ini memiliki keunggulan karena ukuran yang sama, efisiensi yang tinggi dan biaya yang rendah. Untuk daya keluarannya sama seperti *sealed CO₂ laser* hanya 100 Watt.

2.3.3 Mesin Laser Cutting CO₂

Mesin laser merupakan alat bantu dalam berkreasi yang memiliki banyak keunggulan jika dibandingkan dengan alat potong lainnya seperti CNC Router dan gergaji. Laser memotong dengan menggunakan energi panas. Karena itu material yang akan dipotong tidak akan menerima tekanan jika dibandingkan dengan alat potong lainnya. Selain itu, jika memotong material plastik seperti *acrylic*, maka hasil potong akan mulus dan dapat langsung digunakan. Selain itu pengoperasian mesin laser sangat mudah.



Gambar 2. 7 Mesin laser *cutting* CO₂



Gambar 2. 8 Mekanisme mesin laser *cutting* CO₂ untuk memotong material [16]

Beberapa kemampuan dari mesin laser adalah:

- **Memotong (cutting)**
Sinar laser diatur agar menembus material sehingga potongan yang dibutuhkan terlepas, sehingga dapat menggunakan negatif atau positifnya. Memotong dilakukan dengan kecepatan sedang dan kekuatan besar.
- **Menggores (marking)**
Sinar laser hanya akan 'merusak' bagian permukaan material sehingga meninggalkan tanda berupa goresan. Menggores dilakukan dengan kecepatan tinggi dan kekuatan rendah.
- **Gravir/etsa (engraving)**
Sinar laser diatur sehingga menggores permukaan material dengan kedalaman yang berbeda-beda, sehingga gambar/huruf yang digravir dapat dikenali. Gravir dilakukan dengan kecepatan rendah dan kekuatan sedang.
- **Melubangi (perforating/punching)**
Sinar laser diatur agar melubangi material dalam bentuk bulatan-bulatan kecil. Perforasi dilakukan dengan kecepatan tinggi dan kekuatan sedang.

Ada banyak material yang dapat dipotong dengan menggunakan laser, antara lain:

- *Acrylic* (bahan plastik, ada yang transparan maupun tidak)
- MDF (terbuat dari serbuk kayu yang dilem dan dipadatkan)
- Tripleks/Multipleks
- Melamin (multipleks atau MDF yang diberi lapisan melamin)
- Kayu
- Veneer (bahan pelapis yang diambil dari kayu asli)
- Cork (gabus yang umumnya digunakan untuk pack barang)
- Karet
- Kulit
- Karton/kertas
- Kain (kain tertentu)

Pemotongan dengan laser merupakan suatu proses pemotongan yang memiliki kelebihan bila dibandingkan dengan pemotongan tradisional dan lainnya. Proses pemotongan laser ini memiliki kelebihan diantaranya adalah:

- Tidak menimbulkan keretakan;
- Tidak menimbulkan tegangan sisa;
- Tidak menimbulkan panas;
- Tidak adanya beram atau chip (sisa pemotongan);
- Tidak menghasilkan debu;
- Tidak ada getaran.

2.4 *Acrylic*

Acrylic adalah bahan syntetis yang biasa berbentuk lembaran. Bahan ini akan menjadi elastis bila dikenai suhu 60° C. *Acrylic* juga memiliki beberapa ukuran, ketebalan dan aneka warna, sehingga produk yang dihasilkan menjadi lebih menarik. *Properties acrylic* ini dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 2. 2 *Properties acrylic*

<i>Mechanical Properties</i>		
<i>Properties</i>	<i>Value</i>	<i>Unit</i>
<i>Young Modulus</i>	3.2	Gpa
<i>Tensile strength</i>	35-62	Mpa
<i>Elongation</i>	5-70	%
<i>Compressive strength</i>	28-97	Mpa
<i>Yield strength</i>	48-97	Mpa
<i>Physical Properties</i>		
<i>Properties</i>	<i>Value</i>	<i>Unit</i>
<i>Thermal expansion</i>	48-80	$e-6/^{\circ}$ C
<i>Thermal conductivity</i>	0.000729	W/m. $^{\circ}$ K
<i>Specific heat</i>	5.344	J/kg. $^{\circ}$ K
<i>Melting temperature</i>	1103.15	$^{\circ}$ K
<i>Density</i>	1190	Kg/m ³

2.5 Analisis Varian (ANOVA)

Analisis varian (ANOVA) adalah suatu metode untuk menguraikan keragaman total data menjadi komponen-komponen yang mengukur berbagai sumber keragaman. ANOVA digunakan apabila terdapat lebih dari dua variabel. Dalam literatur Indonesia metode ini dikenal dengan berbagai nama lain, seperti analisis ragam, sidik ragam, dan analisis variansi. Ia merupakan pengembangan dari masalah Behrens-Fisher, sehingga uji-F juga dipakai dalam pengambilan keputusan. Analisis variansi pertama kali diperkenalkan oleh Sir Ronald Fisher, bapak statistika modern. Dalam praktek, analisis variansi dapat merupakan uji hipotesis (lebih sering dipakai) maupun pendugaan (estimation, khususnya di bidang genetika terapan).

Secara umum, analisis variansi menguji dua variansi (atau ragam) berdasarkan hipotesis nol bahwa kedua variansi itu sama. Variansi pertama adalah variansi antarcontoh (among samples) dan variansi kedua adalah variansi di dalam masing-masing contoh (within samples). Dengan ide semacam ini, analisis variansi dengan dua contoh akan memberikan hasil yang sama dengan uji-t untuk dua rerata (mean). Supaya sah (valid) dalam menafsirkan hasilnya, analisis variansi menggantungkan diri pada empat asumsi yang harus dipenuhi dalam perancangan percobaan:

1. Data berdistribusi normal, karena pengujiannya menggunakan uji F-Snedecor;
2. Variansi atau ragamnya homogen, dikenal sebagai homoskedastisitas, karena hanya digunakan satu penduga (estimate) untuk variansi dalam contoh;
3. Masing-masing contoh saling independen, yang harus dapat diatur dengan perancangan percobaan yang tepat;
4. Komponen-komponen dalam modelnya bersifat aditif (saling menjumlah).

Analisis variansi relatif mudah dimodifikasi dan dapat dikembangkan untuk berbagai bentuk percobaan yang lebih rumit. Selain itu, analisis ini juga masih memiliki keterkaitan dengan analisis regresi. Akibatnya, penggunaannya sangat luas di berbagai bidang, mulai dari eksperimen laboratorium hingga eksperimen periklanan, psikologi, dan kemasyarakatan.

2.5.1 ANOVA 1 Arah

Sampel dibagi menjadi beberapa kategori dan ulangan.

Kolom = kategori

Baris = ulangan / replika.

Contoh: terdapat 4 metode diet, dan 14 orang digunakan sebagai sampel.

Tabel 2.3 Data ANOVA 1 arah

	Metode-1	Metode-2	Metode-3	Metode-4
Member#1	Ali	Badu	Cici	Didi
Member#2	Eno	Fifi	Gina	Hadi
Member#3	Ina	Juli	Kiki	Lilo
Member#4	-----	Mimi	-----	Nike

Metode-1 diulang 3 kali, Metode-2 diulang 4 kali, Metode-3 diulang 3 kali, Metode-4 diulang 4 kali.

Catatan: Dalam banyak kasus untuk mempermudah perhitungan, ulangan untuk setiap kategori dibuat sama banyak.

Tabel 2.4 ANOVA 1 arah

Sumber Keragaman (SK)	Jumlah Kuadrat (JK)	derajat bebas (db)	Kuadrat Tengah (KT)	F hitung	F tabel
Rata-rata Kolom	JKK	db numerator = k-1	$s^2K = KTK = JKK/k-1$	F hitung = KTK/KTG	$\alpha =$ db numer = db denum = F tabel =
Galat	JKG	db denominator = N-k	$s^2G = KTG = JKG/N-k$		
Total	JKT	N-1			

$$JKT = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}^2 - \frac{T^{*2}}{N}$$

$$JKK = \sum_{i=1}^k \frac{T_{*i}^2}{n_i} - \frac{T^{*2}}{N}$$

$$JKG = JKT - JKK$$

Keterangan :

k : banyaknya kolom

N : banyaknya pengamatan keseluruhan data

n_i : banyaknya ulangan dikolom ke-i

x_{ij} : data pada kolom ke-i ulangan ke-j

T_{*i} : total (jumlah) ulangan pada kolom ke-i

T^{**} : total (jumlah) seluruh pengamatan

2.5.2 ANOVA 2 Arah tanpa interaksi

Dalam kategori, terdapat blok / sub-kelompok.

Kolom = kategori-1

Baris = blok, kategori-2.

Contoh: terdapat 4 metode diet, dan tiap metode dibagi menjadi 3 blok. Blok berupa kelompok umur.

Tabel 2.5 ANOVA 2 arah tanpa interaksi

metode kel.umur	Metode-1	Metode-2	Metode-3	Metode-4
< 20 tahun	√	√	√	√
20 – 40 tahun	√	√	√	√
>40 tahun	√	√	√	√

Pada rancangan percobaan dengan ANOVA jenis ini, setiap kategori mempunyai banyak blok yang sama, sehingga jika banyak kolom = k, dan banyak baris/blok = r, maka banyak data = $N = r \times k$.

Tabel 2.6 ANOVA 2 arah tanpa interaksi

Sumber Keragaman (SK)	Jumlah Kuadrat (JK)	derajat bebas (db)	Kuadrat Tengah (KT)	F hitung	F tabel
Rata-rata Baris	JKB	db numer1 = r-1	$s^2B = KTB = JKB/r-1$	F hitung = KTB/KTG	$\alpha =$ db numer1 = db denum = F tabel =
Rata-rata Kolom	JKK	db numer2 = k-1	$s^2K = KTK = JKK/k-1$	F hitung = KTK/KTG	$\alpha =$ db numer 2= db denum = F tabel =
Galat	JKG	db denum = (r-1)(k-1)	$s^2G = KTG = JKG/(r-1)(k-1)$		
Total	JKT	r.k-1			

$$JKT = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}^2 - \frac{T_{**}^2}{rk}$$

$$JKB = \sum_{i=1}^r \frac{T_{i*}^2}{k} - \frac{T_{**}^2}{rk}$$

$$JKK = \sum_{j=1}^k \frac{T_{*j}^2}{r} - \frac{T_{**}^2}{rk}$$

$$JKG = JKT - JKB - JKK$$

Keterangan :

- k : banyaknya kolom
- r : banyaknya baris/blok
- x_{ij} : data pada baris ke-i, kolom ke-j
- T_{i*} : total (jumlah) baris ke-i
- T_{*j} : total (jumlah) kolom ke-j
- T_{**} : total (jumlah) seluruh pengamatan

2.5.3 ANOVA 2 Arah dengan interaksi

Dalam kategori, terdapat blok/sub-kelompok.

Kolom : kategori-1

Baris : blok, kategori-2

Setiap blok diulang, satu sel berisi beberapa data. Dengan pengulangan dalam tiap blok seperti, interaksi antara kolom dan baris dapat diketahui.

Contoh: terdapat 4 metode diet dan tiap metode dibagi menjadi 3 blok, dan tiap blok diulang 3 kali.

Tabel 2.7 Data ANOVA 2 arah dengan interaksi

kel.umur	metode		Metode-1	Metode-2	Metode-3	Metode-4
< 20 tahun,	member#1		√	√	√	√
	member#2		√	√	√	√
	member#3		√	√	√	√
20 – 40 tahun,	member#1		√	√	√	√
	member#2		√	√	√	√
	member#3		√	√	√	√
>40 tahun,	member#1		√	√	√	√
	member#2		√	√	√	√
	member#3		√	√	√	√

Tabel 2.8 ANOVA 2 arah dengan interaksi

Sumber Keragaman (SK)	Jumlah Kuadrat (JK)	derajat bebas (db)	Kuadrat Tengah (KT)	F hitung	F tabel
Nilai tengah Baris	JKB	db numer1 = r-1	$s^2B = KTB =$ JKB/r-1	F hitung = KTB/KTG	$\alpha =$ db numer1 = db denum = F tabel =
Nilai tengah Kolom	JKK	db numer2 = k-1	$s^2K = KTK =$ JKK/k-1	F hitung = KTK/KTG	$\alpha =$ db numer 2= db denum = F tabel =
Interaksi [BK]	JK[BK]	db numer3 = [r-1][k-1]	$s^2K = KT[BK] =$ JK[BK]/[r-1][k-1]	F hitung =	$\alpha =$ db numer 3=

				KT[BK]/KTG	db denum = F tabel =
Galat	JKG	db denum = r.k.[n-1]	$s^2G = KTG =$ JKG/r.k.[n-1]		
Total	JKT	[r.k.n]-1			

$$JKT = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^n x_{ijm}^2 - \frac{T_{***}^2}{rkn}$$

$$JKB = \frac{\sum_{i=1}^r T_{i**}^2}{kn} - \frac{T_{***}^2}{rkn}$$

$$JJK = \frac{\sum_{j=1}^k T_{*j*}^2}{rn} - \frac{T_{***}^2}{rkn}$$

$$JK[BK] = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^k T_{ij*}^2}{n} - \frac{\sum_{i=1}^r T_{i**}^2}{kn} - \frac{\sum_{j=1}^k T_{*j*}^2}{rn} + \frac{T_{***}^2}{rkn}$$

$$JKG = JKT - JKB - JJK - JK[BK]$$

Perhatikan : Sebagian Notasi dalam JKT, JKB dan JJK digunakan dalam perhitungan JK[BK].

Keterangan :

r : banyaknya baris i = 1,2,3,...r

k : banyaknya kolom j = 1,2,3,...k

n : banyaknya ulangan m = 1,2,3,...m

x_{ijm} : data pada baris ke-i, kolom ke-j dan ulangan ke-m

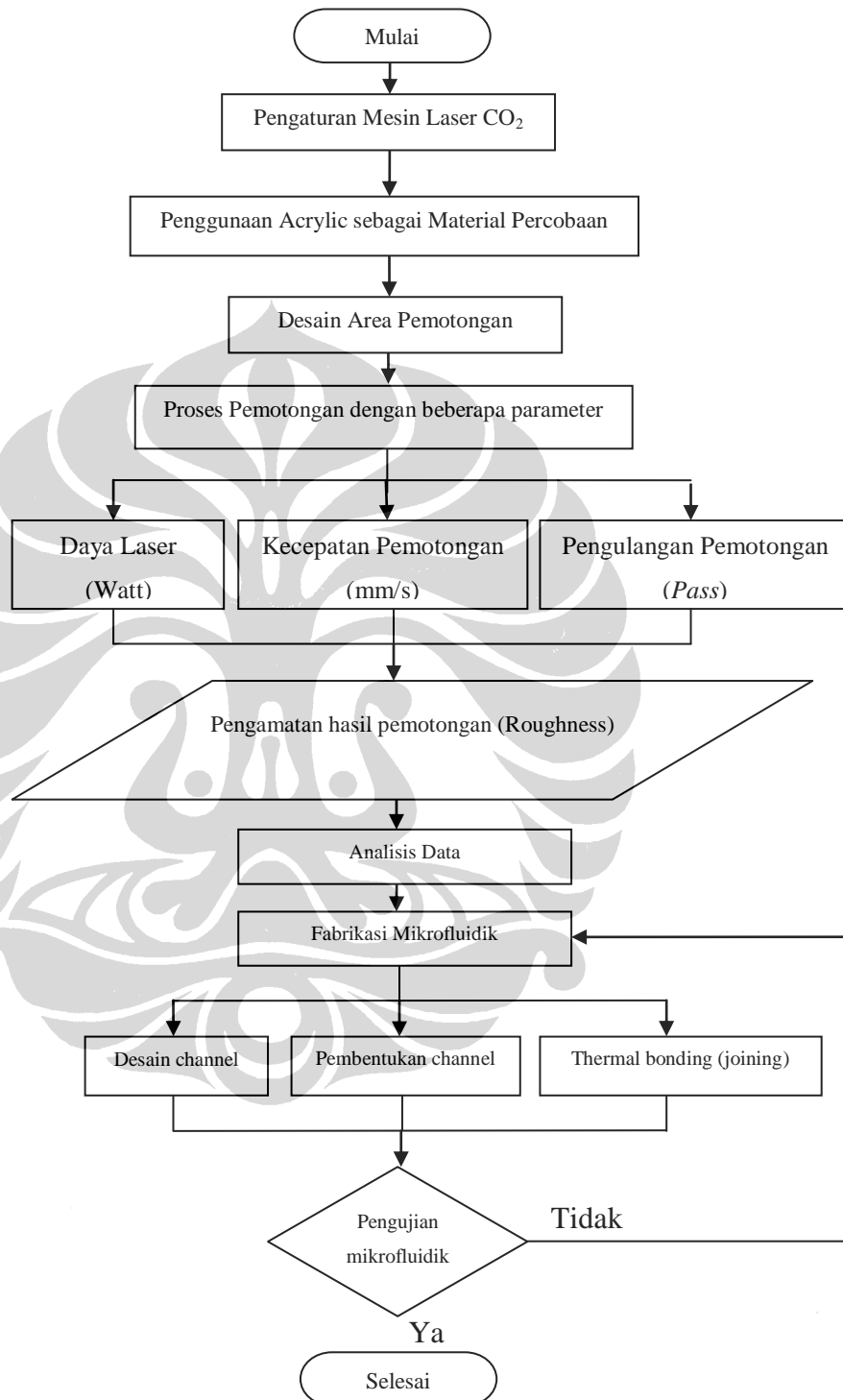
T_{i**} : total baris ke-i

T_{*j*} : total kolom ke-j

T_{ij*} : total sel di baris ke-i dan kolom ke-j

T_{***} : total (jumlah) seluruh pengamatan

BAB III METODE PENELITIAN



Gambar 3. 1 Diagram alur metode penelitian

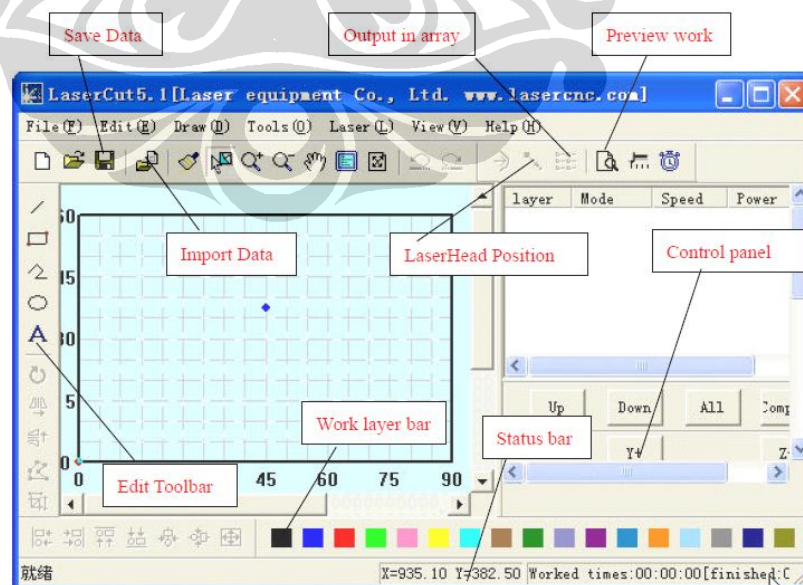
Untuk proses penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan yang dapat dilihat pada gambar 3.1.

3.1 Studi Literatur

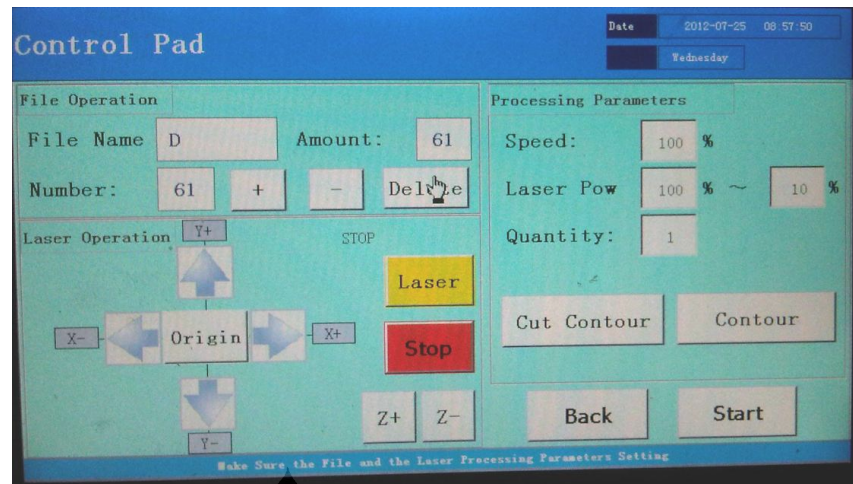
Sebelum melakukan percobaan untuk memperoleh data-data yang akan digunakan untuk mengetahui karakteristik mesin laser ini, langkah pertama adalah mempelajari hal-hal yang berkaitan dengan mikrofluidik, laser CO₂ dan parameter-parameter yang akan digunakan serta material yang digunakan yaitu *acrylic*. Yang bisa bersumber dari buku, laporan penelitian, artikel internet dan jurnal-jurnal nasional ataupun internasional.

3.2 Pengaturan Mesin Laser CO₂

Dalam tahapan ini dilakukan untuk melakukan pengaturan parameter-parameter yang akan digunakan sebagai parameter input, pengaturan parameter-parameter tersebut dapat dilakukan melalui komputer (gambar 3.2) atau alat tambahan yang ada pada mesin laser yaitu MPC 6535 (gambar 3.3). Selain pengaturan parameter input dalam proses pemotongan untuk mendapatkan data-data hasil pemotongan, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan juga seperti tingkat kedataran alas meja kerja, karena merupakan bagian dari jarak sumbu Z sehingga dapat mempengaruhi hasil pemotongan.



Gambar 3. 2 Pengaturan parameter mesin laser CO₂ melalui komputer



Gambar 3. 3 MPC 6535

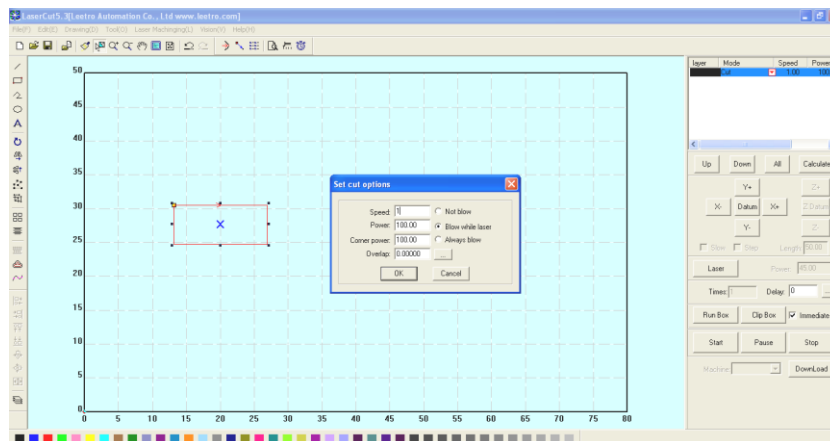
Spesifikasi mesin laser CO₂ yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Spesifikasi mesin laser CO₂

Daya	0 ~ 100 % (maksimum 60 Watt)
Wavelength	10.6 μ m
Frequency mode	PWM (200 Hz – 200 KHz)
Laser head move	Pulse unit (0.1 mm/s -)
Output voltage MPC 6535	0 ~ 5 Volt
Power Laser Output	0 ~ 30 mA
Pengulangan pemotongan	1~ 999

3.3 Desain Lintasan Pemotongan

Langkah awal sebelum melakukan pemotongan adalah pembuatan desain lintasan pemotongan, dimana desain ini yang akan mempengaruhi pergerakan nozzle laser (sumbu X dan Y). pada mesin laser potong ini sendiri telah dilengkapi dengan software yang dapat digunakan untuk pembuatan desain lintasan, seperti pada gambar 3.4



Gambar 3. 4 Software untuk pembuatan desain lintasan potong mesin laser CO₂

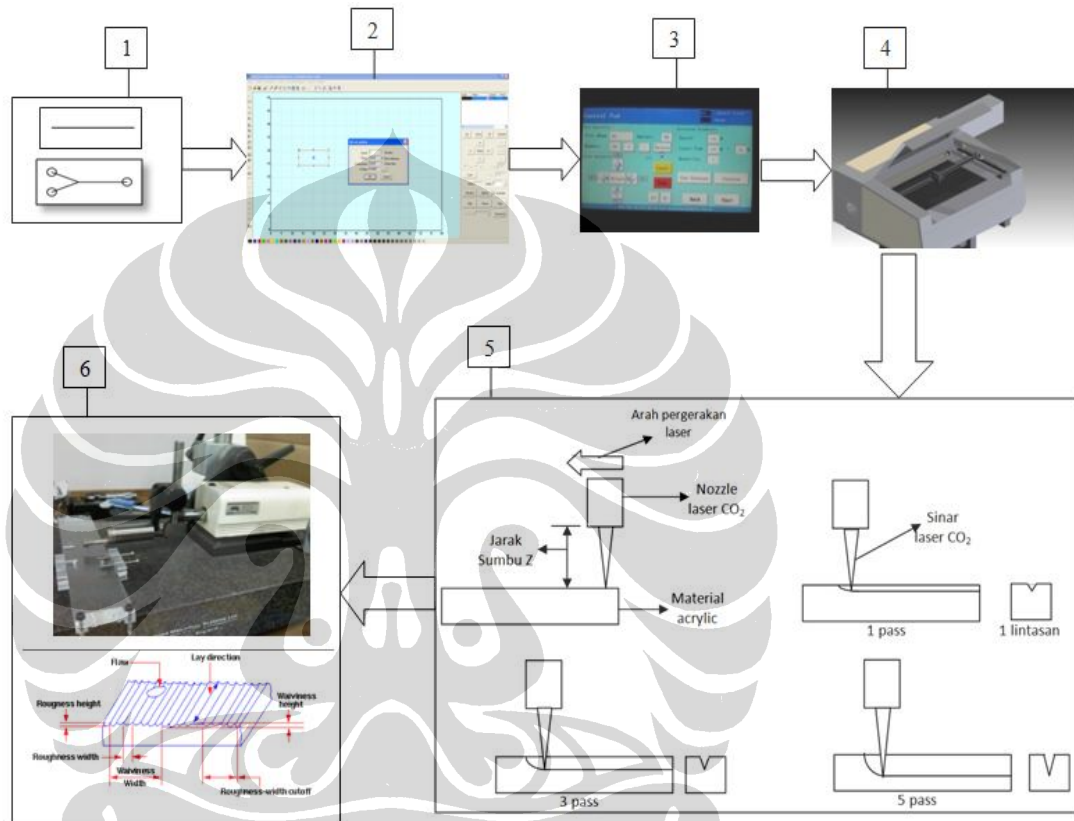
Software ini juga memiliki kemampuan untuk membaca file-file gambar yang telah dibuat menggunakan software gambar yang lain seperti autocad, inventor dan lain-lain, dengan catatan semua file yang dibuat menggunakan software lain harus dilakukan penyimpanan dalam format “dxf” file.

3.4 Proses Pemotongan

Percobaan langsung yang dilakukan untuk memperoleh data-data hasil pemotongan menggunakan mesin potong laser CO₂ terhadap material *acrylic*, dapat dilihat pada gambar 3.5. Sebelum melakukan proses pemotongan dilakukan terlebih dahulu persiapan benda kerja sebagai material yang digunakan pada proses pemotongan dan sangat penting juga untuk melakukan pengaturan parameter input yang digunakan untuk proses pemotongan, karena untuk penggunaan parameter sangat mempengaruhi hasil pemotongan, seperti daya laser dan kecepatan proses pemotongan. Pada penelitian ini selain parameter daya laser dan kecepatan, menambahkan parameter pengulangan pemotongan (*layer*), Adapun beberapa parameter yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- Parameter input
 - Menggunakan daya laser 4.8 Watt, 5.3 Watt, 6 Watt, 6.6 Watt dan 7.2 Watt
 - Menggunakan kecepatan pemotongan 5 mm/s, 10 mm/s, 15 mm/s, 20 mm/s dan 25 mm/s

- Serta melakukan pengulangan pemotongan sebanyak 1 kali, 2 kali, 3 kali, 4 kali dan 5 kali
- Parameter hasil
Sedangkan untuk parameter hasil dilakukan pengamatan terhadap *surface roughness* [17] berdasarkan masing-masing parameter input yang diberikan.



Gambar 3. 5 Skema Proses pemotongan

Keterangan skema proses pemotongan:

1. Desain dari channels yang akan dibentuk.
2. Software yang digunakan untuk pembentukan desain channels. Software ini juga dapat membaca file-file gambar dari software yang lain, dengan catatan file yang diberikan dalam format dxf.
3. MPC 6535, merupakan alat kontrol untuk pergerakan sumbu x dan y (nozzle laser) dan sumbu z (alas meja kerja) serta pengaturan parameter-parameter mesin laser yaitu daya laser, kecepatan pemotongan dan pengulangan pemotongan (*layer*).

4. Mesin laser CO₂, memiliki daya minimal 4,8 Watt dan maksimal 60 Watt
5. Beberapa gambaran pada saat melakukan proses pemotongan atau pembentukan channel.
6. Alat ukur *surface roughness*, untuk proses pengamatan hasil pemotongan.

3.5 Analisis Data

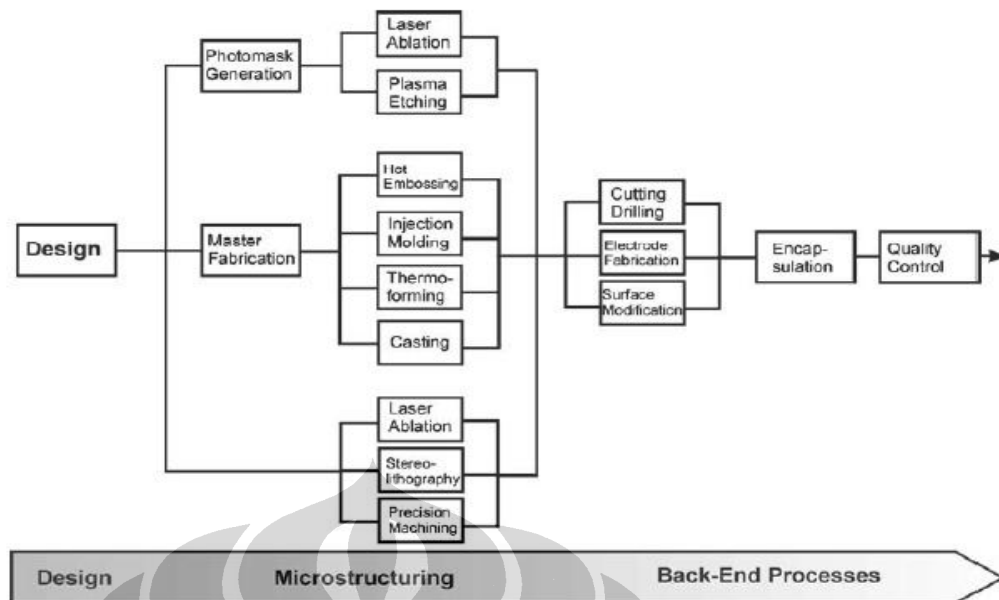
Hasil pengujian selanjutnya dikumpulkan untuk dianalisis dengan proses pengamatan menggunakan alat ukur *surface roughness* (gambar 3.6). Proses ini dilakukan untuk melihat karakteristik kemampuan laser CO₂ dalam melakukan proses pemotongan pada material *acrylic*.



Gambar 3. 6 Alat ukur *surface roughness* , stylus untuk pengukuran permukaan material (a), tampilan untuk besaran nilai *roughness*/Ra (b)

3.6 Fabrikasi Mikrofluidik

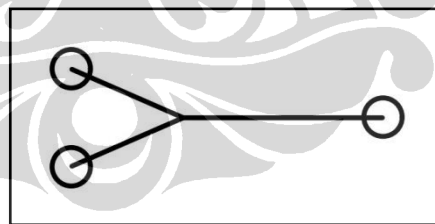
Beberapa langkah yang harus diperhatikan dalam pembentukan mikrofluida adalah desain channels yang diinginkan, metode pembentukan channels yang akan digunakan dan back-end processing. Gambar 3.7 menjelaskan langkah yang dilakukan pada pembentukan mikrofluidik khususnya pada material polymer.



Gambar 3. 7 Diagram proses *microfabrication* pada polymer [5]

3.6.1. Desain Channel

Pada penelitian ini mencoba untuk melakukan pembentukan channels yang sederhana, desain channels yang dibentuk terlihat pada gambar 3.8. Untuk desain channels ini dilakukan dengan menggunakan software autodesk inventor yang kemudian di simpan dalam bentuk dxf file agar dapat di buka pada software mesin laser.



Gambar 3. 8 Desain pembentukan channels

3.6.2. Microstructuring

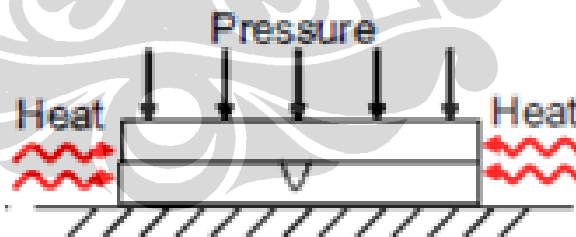
Berdasarkan gambar 3.7 ada beberapa metode yang dapat dilakukan untuk microstructuring, pada penelitian ini metode yang digunakan adalah laser ablation dengan jenis laser CO₂ yang ada di laboratorium manufaktur, spesifikasi mesin laser memiliki daya minimum 4,8 Watt dan maksimum 60 Watt, serta pergerakan sumbu x dan y pada nozzle laser

sedangkan sumbu z pada pengaturan jarak antara nozzle dan benda kerja. Untuk skema pembentukan channels hampir sama seperti skema proses pemotongan (gambar 3.5), hanya berbeda pada bentuk desain lintasan pemotongan. Desain untuk pembentukan channels sesuai pada gambar 3.8.

3.6.3. Back-end Processing

Tahapan pembentukan mikrofluidik belum dapat dikatakan selesai meskipun channel yang diinginkan telah terbentuk, masih ada satu tahapan lagi yang harus dilakukan yang sering disebut *back-end processing*. Pada tahapan ini dilakukan proses *joining* dua material (pada penelitian ini menggunakan dua material yang sama yaitu *acrylic*), dimana salah satu material telah dilakukan proses pembentukan mikrofluidik.

Beberapa metode proses bonding khususnya untuk material *acrylic* adalah *solvent bonding*, *adhesive bonding* dan *microwave welding*. Tetapi penelitian ini akan menggunakan metode *thermal bonding* sebagai proses *joining*. Untuk metode *thermal bonding* (gambar 3.9) terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan selama proses agar tidak merusak channel yang telah terbentuk yaitu tekanan yang diberikan serta suhu yang terjadi pada saat pemanasan pada material dan lama waktu proses pemanasan.



Gambar 3. 9 Proses bonding metode *thermal bonding* [18]

3.7 Pengujian Mikrofluidik

Setelah pembentukan mikrofluidik, kemudian dilanjutkan pada tahap percobaan pengaliran cairan terhadap mikrofluidik tersebut. Tahapan ini dimaksudkan untuk pembuktian bahwa mikrofluidik yang terbentuk dapat berfungsi dengan baik.

BAB IV PEMBAHASAN

4.1. Persiapan Benda Kerja dan Laser CO₂

Proses persiapan benda kerja dan laser CO₂ penting untuk dilakukan, mengingat hal ini untuk menunjang keberhasilan dari keseluruhan proses penelitian yang akan dilakukan. Rangkaian persiapan benda kerja dan laser CO₂ yang dilakukan diantaranya adalah :

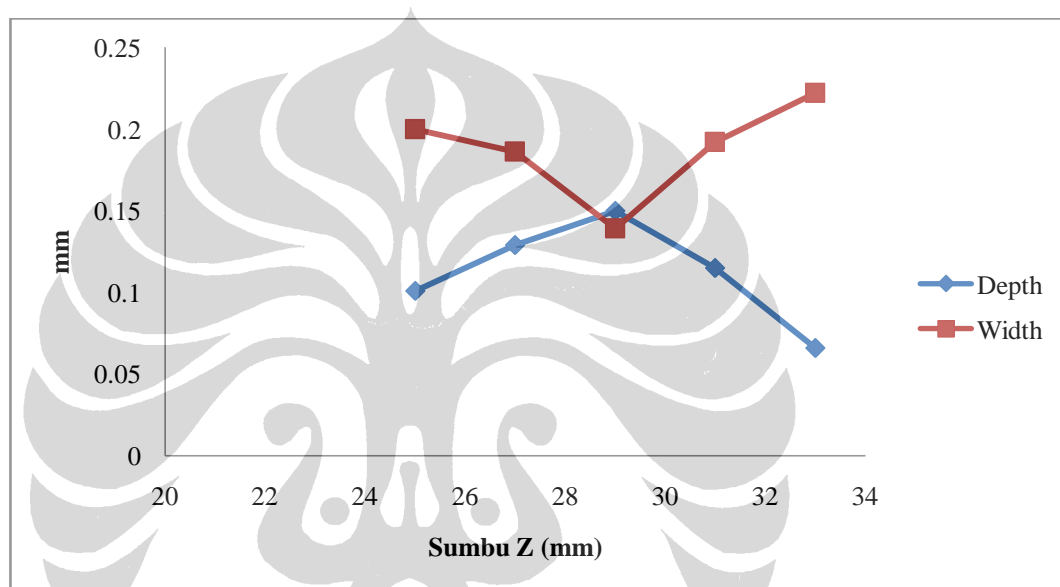
- Pengadaan material dan laser CO₂ yang dibutuhkan;
- Membuat desain untuk proses pemotongan maupun pembentukan *channel* dari mikrofluidik;
- Proses pemotongan benda kerja sesuai dengan ukuran yang dikehendaki dalam penelitian;
- Merapikan hasil pemotongan, terutama pada bagian sisi material yang sudah dipotong, mengingat pada bagian sisi inilah yang akan menjadi acuan untuk mengukur *surface roughness* dari pemotongan yang akan dilakukan oleh laser CO₂;
- Mengelompokkan beberapa benda kerja untuk memudahkan dalam proses pemotongannya dalam beberapa parameter yang akan dilakukan

4.2. Jarak Fokus Mesin Laser

Menentukan jarak fokus mesin laser dilakukan dengan cara melakukan analisis pengaruh parameter jarak sumbu Z terhadap hasil pemotongan, untuk menunjang proses analisis tersebut dilakukan proses pemotongan awal dengan parameter input jarak sumbu Z sebagai variabel dan menggunakan daya 6 Watt serta kecepatan pemotongan 10 mm/s sedangkan parameter hasil yang akan dilakukan proses analisis adalah kedalaman dan lebar hasil pemotongan.

Tabel 4. 1 Data pengaruh jarak sumbu Z terhadap kedalaman dan lebar hasil pemotongan

No	Daya (Watt)	Pass	Kecepatan (mm/s)	Sumbu Z (mm)	Depth (mm)	Width (mm)
1	6	1	10	25	0.101	0.2
2	6	1	10	27	0.129	0.186
3	6	1	10	29	0.15	0.139
4	6	1	10	31	0.082	0.192
5	6	1	10	33	0.066	0.222



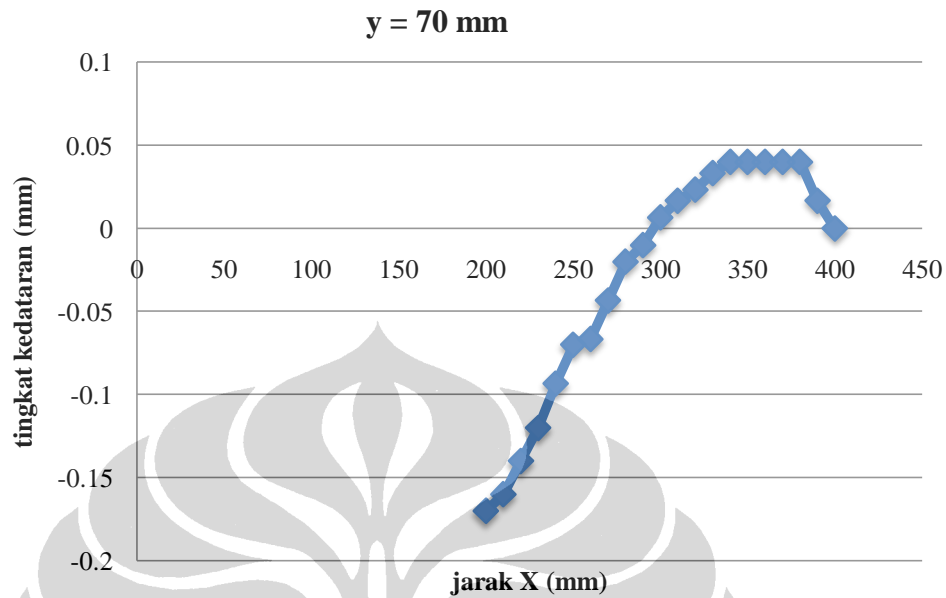
Gambar 4. 1 Grafik pengaruh jarak sumbu Z terhadap Kedalaman dan lebar hasil pemotongan

Berdasarkan gambar 4.1 dapat disimpulkan bahwa pada jarak sumbu Z 29 mm merupakan jarak fokus mesin laser karena dapat menghasilkan hasil pemotongan kedalaman yang paling besar dan sebaliknya menghasilkan lebar yang terkecil.

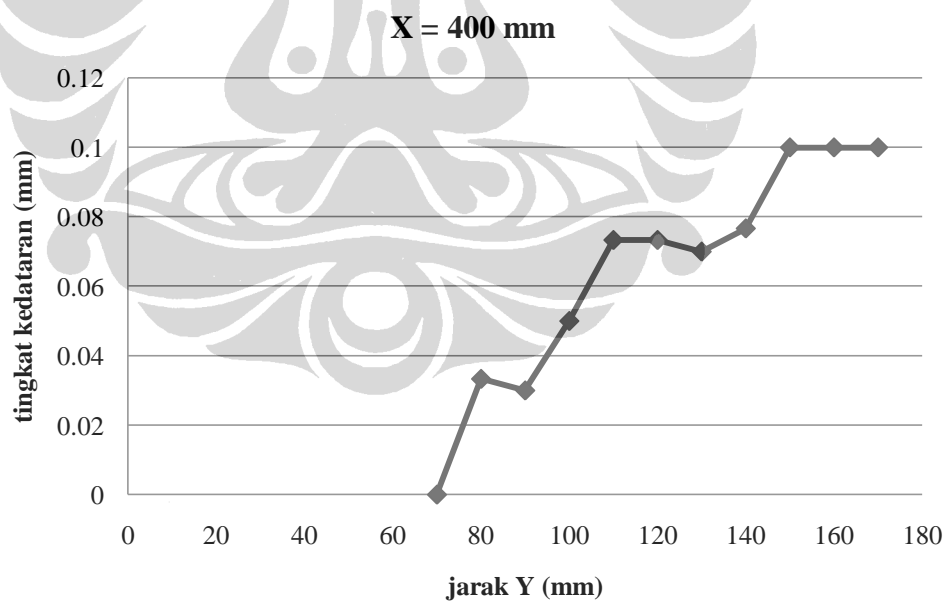
4.3. Pembuatan Alas Meja Kerja Baru

Berdasarkan hasil percobaan sebelumnya, diperoleh bahwa ada ketidakratahan pada permukaan alas meja kerja, ini dibuktikan dengan data yang diperoleh pada gambar 4.2 dan 4.3, ketika melakukan pemotongan menggunakan

alas meja kerja yang ada, maka perlu dilakukan pembentukan alas meja yang baru seperti terlihat pada gambar 4.4.



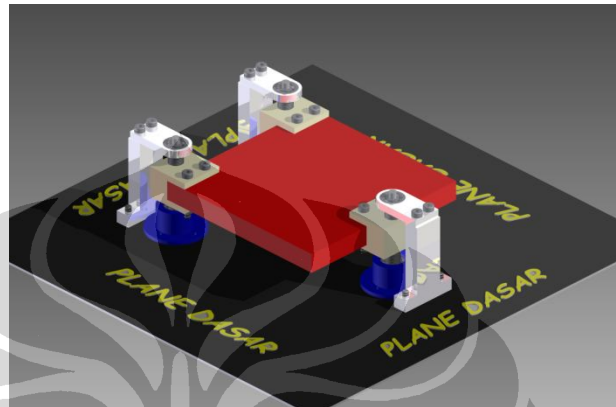
Gambar 4. 2 Grafik kedataran arah sumbu X



Gambar 4. 3 Grafik data kedataran arah sumbu Y

Alas meja ini berdimensi 10 cm x 10 cm dengan ketebalan 5 mm, alasan pembuatan dengan dimensi kecil adalah desain untuk daerah pemotongan

kecil sesuai dengan tema penelitian ini. Alas meja kerja ini juga mempunyai tiga kaki yang bertujuan untuk melakukan pengaturan kemiringan ketika akan dilakukan pengujian kerataan alas meja kerja terhadap nozzle laser sebelum melakukan percobaan pembentukan mikrofluidik.



Gambar 4. 4 Alas meja kerja baru

4.4. Hasil Pemotongan

Pengaruh dari parameter seperti daya laser, kecepatan potong (*speed*), pengulangan pemotongan (*pass*) terhadap kekasaran permukaan (*surface roughness*) dapat dilihat tabel yang terdapat pada lampiran 1. Untuk data yang terdapat pada tabel menunjukkan bahwa untuk tiap parameter yang sama dilakukan percobaan sebanyak 5 kali pengambilan data. Dan terdapat juga data *surface roughness* hasil pemotongan untuk sisi miring dari *channels*. Sebelum melakukan analisis terhadap data-data yang diperoleh berdasarkan percobaan pemotongan dan pengukuran secara langsung, data-data tersebut ditampilkan dalam bentuk grafik dengan membagi menjadi tiga bagian yaitu: grafik antara parameter daya laser dan kecepatan pemotongan, grafik, antara kecepatan pemotongan dan pengulangan pemotongan (*pass*) serta grafik antara pengulangan pemotongan dan daya laser.

Tabel 4. 2 Data surface roughness hasil pemotongan berdasarkan parameter daya dan kecepatan pada 1 *pass*

No	Pass	Kecepatan (mm/s)	Daya (Watt)	Ra (Mean) (μm)	Ra Sisi miring (μm)
1	1	5	4.8	1.908	2.02
2	1	5	5.4	1.552	1.55
3	1	5	6	1.344	1.24
4	1	5	6.6	1.2	1.19
5	1	5	7.2	1.004	1.05
6	1	10	4.8	3.134	3.11
7	1	10	5.4	2.684	3.01
8	1	10	6	2.116	2.66
9	1	10	6.6	1.936	2.02
10	1	10	7.2	1.684	1.56
11	1	15	4.8	3.516	3.97
12	1	15	5.4	2.968	3.78
13	1	15	6	2.536	2.68
14	1	15	6.6	2.084	2.54
15	1	15	7.2	2.02	1.98
16	1	20	4.8	6.88	5.67
17	1	20	5.4	5.71	4.47
18	1	20	6	4.76	4.32
19	1	20	6.6	3.892	3.97
20	1	20	7.2	3.584	3.42
21	1	25	4.8	12.564	12.35
22	1	25	5.4	11.284	11.25
23	1	25	6	10.428	10.28
24	1	25	6.6	4.644	4.24
25	1	25	7.2	3.996	3.42

Tabel 4. 3 Data surface roughness hasil pemotongan berdasarkan parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan pada daya 6 watt

No	Daya (Watt)	Pass	Kecepatan (mm/s)	Ra (Mean) (μm)	Ra Sisi miring (μm)
1	6	1	5	1.344	1.24
2	6	1	10	2.116	2.66
3	6	1	15	2.536	2.68
4	6	1	20	4.76	4.32

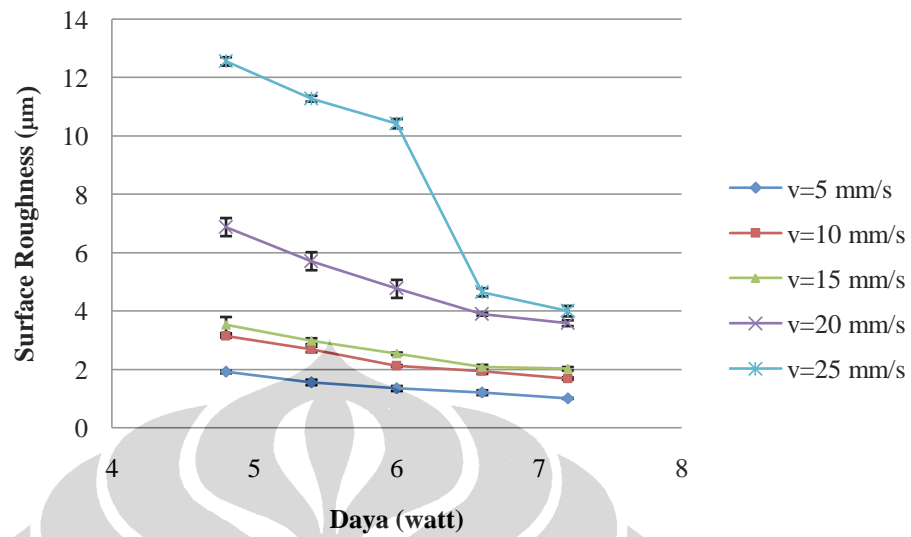
5	6	1	25	10.428	10.28
6	6	2	5	1.254	1.3
7	6	2	10	1.988	2.01
8	6	2	15	2.208	2.22
9	6	2	20	4.104	3.48
10	6	2	25	3.784	4.46
11	6	3	5	1.446	1.32
12	6	3	10	1.54	1.56
13	6	3	15	1.876	1.97
14	6	3	20	3.452	3.64
15	6	3	25	4.456	4.76
16	6	4	5	1.048	0.96
17	6	4	10	1.344	1.21
18	6	4	15	1.964	2.02
19	6	4	20	3.192	2.98
20	6	4	25	4.432	4.25
21	6	5	5	1.088	1.01
22	6	5	10	1.504	1.36
23	6	5	15	2.06	2.54
24	6	5	20	3.3	2.88
25	6	5	25	4.652	3.89

Tabel 4. 4 Data surface roughness hasil pemotongan berdasarkan parameter pengulangan pemotongan dan daya pada kecepatan 10 mm/s

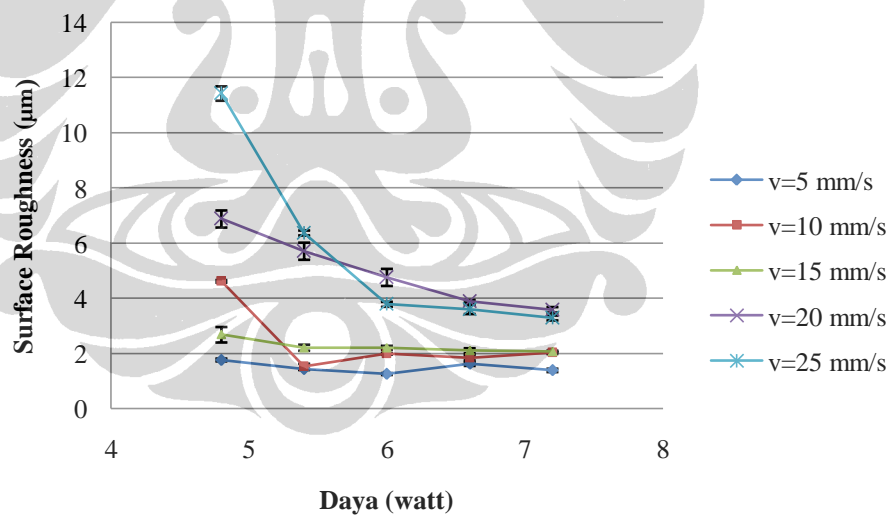
No	Kecepatan (mm/s)	Daya (Watt)	Pass	Ra (Mean) (μm)	Ra Sisi miring (μm)
1	10	4.8	1	3.134	3.11
2	10	4.8	2	4.616	3.47
3	10	4.8	3	3.376	1.96
4	10	4.8	4	3.644	2.14
5	10	4.8	5	2.064	2.05
6	10	5.4	1	2.684	3.01
7	10	5.4	2	1.532	1.78
8	10	5.4	3	1.24	1.32
9	10	5.4	4	1.278	1.54

10	10	5.4	5	0.932	1.13
11	10	6	1	2.116	2.66
12	10	6	2	1.988	2.01
13	10	6	3	1.54	1.56
14	10	6	4	1.344	1.54
15	10	6	5	1.504	1.36
16	10	6.6	1	1.936	2.02
17	10	6.6	2	1.84	1.97
18	10	6.6	3	1.776	1.76
19	10	6.6	4	1.214	1.16
20	10	6.6	5	1.108	1.32
21	10	7.2	1	1.684	1.56
22	10	7.2	2	2.024	2.12
23	10	7.2	3	1.352	1.63
24	10	7.2	4	1.184	1.12
25	10	7.2	5	1.21	1.13

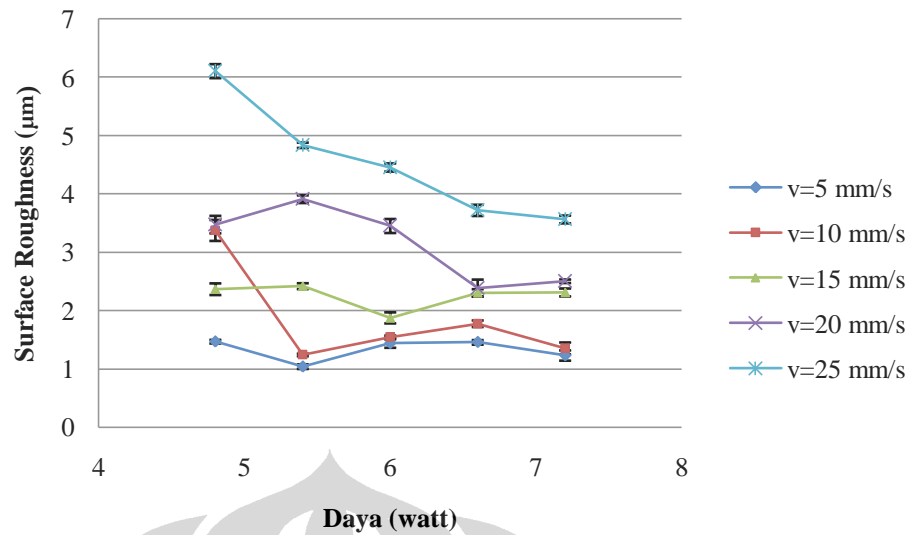
4.4.1 Pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap *surface roughness* hasil pemotongan



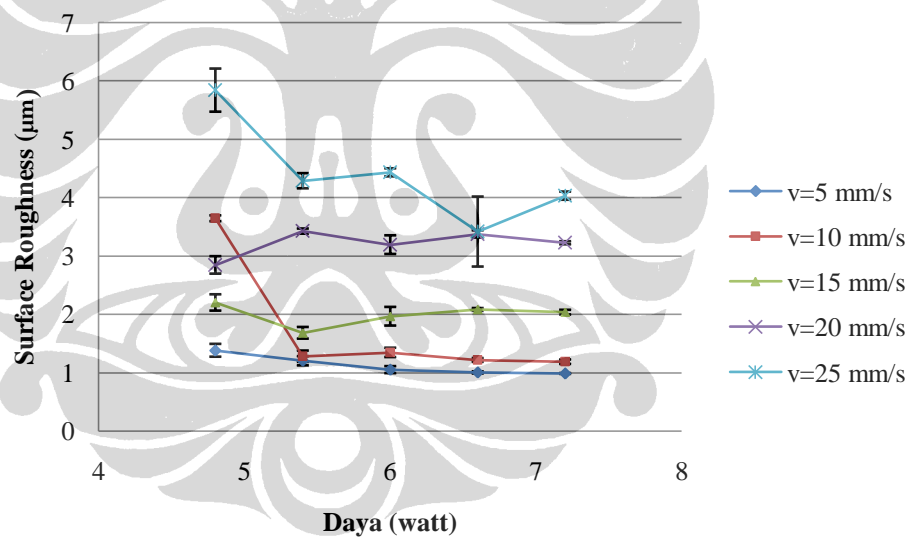
Gambar 4. 5 Grafik pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap *surface roughness* pada 1 kali pengulangan pemotongan



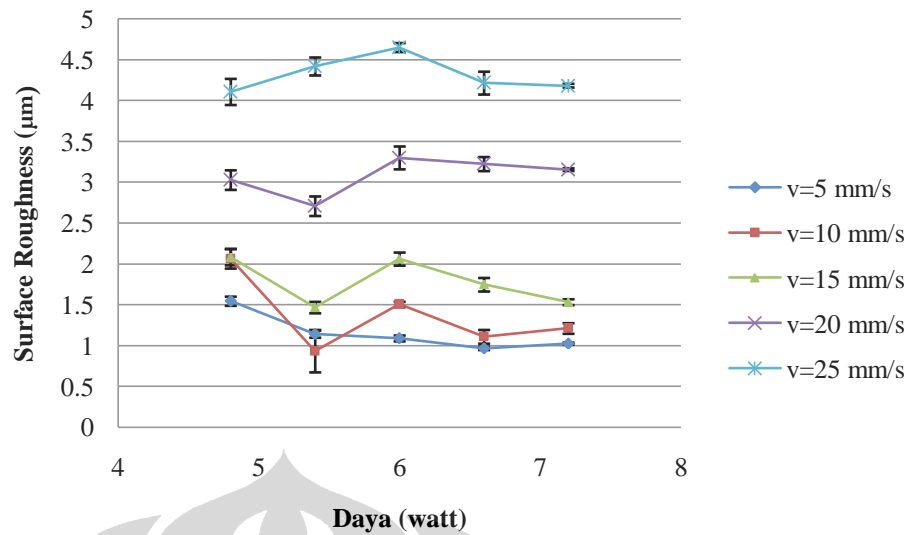
Gambar 4. 6 Grafik pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap *surface roughness* pada 2 kali pengulangan pemotongan



Gambar 4. 7 Grafik pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap *surface roughness* pada 3 kali pengulangan pemotongan

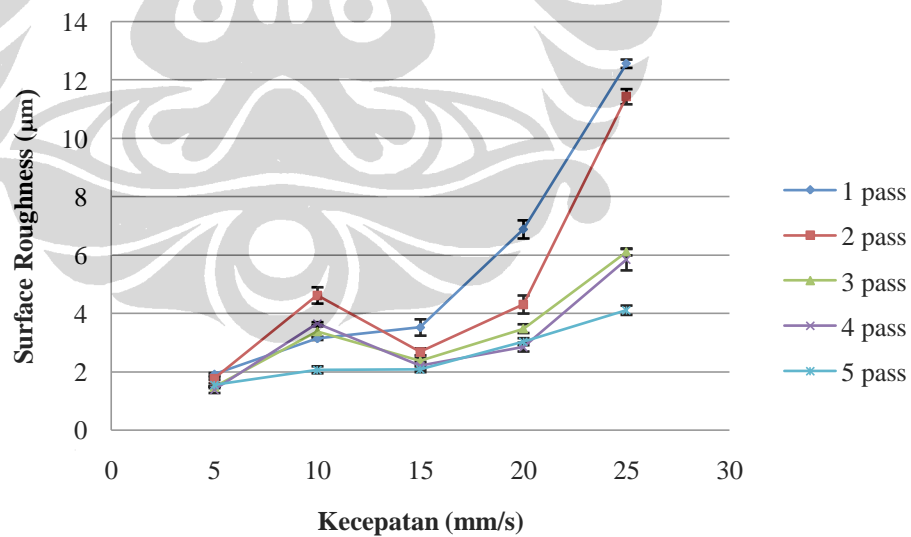


Gambar 4. 8 Grafik pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap *surface roughness* pada 4 kali pengulangan pemotongan

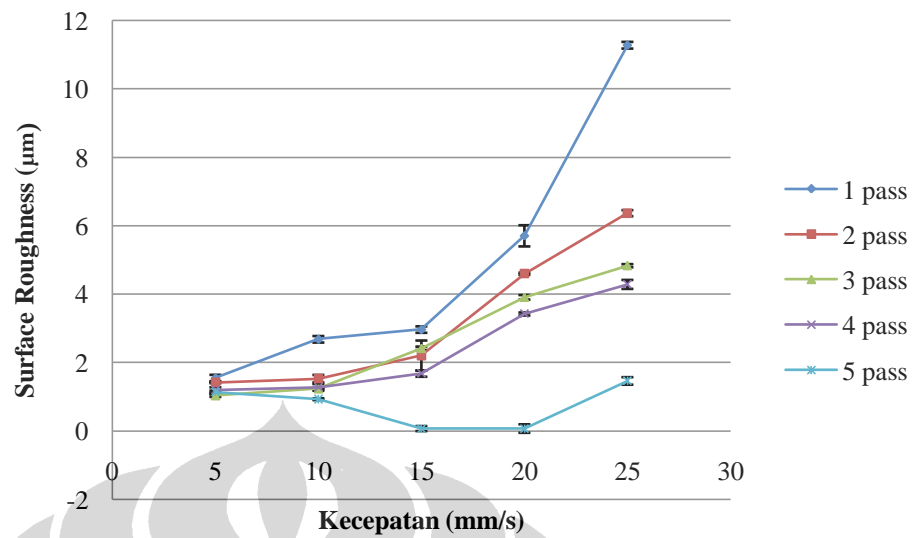


Gambar 4. 9 Grafik pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap *surface roughness* pada 5 kali pengulangan pemotongan

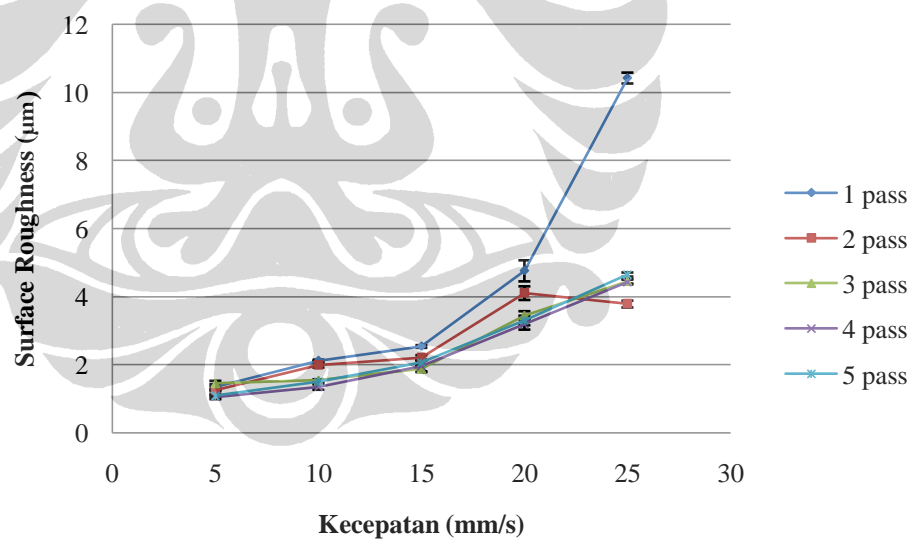
4.4.2 Pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap *surface roughness* hasil pemotongan



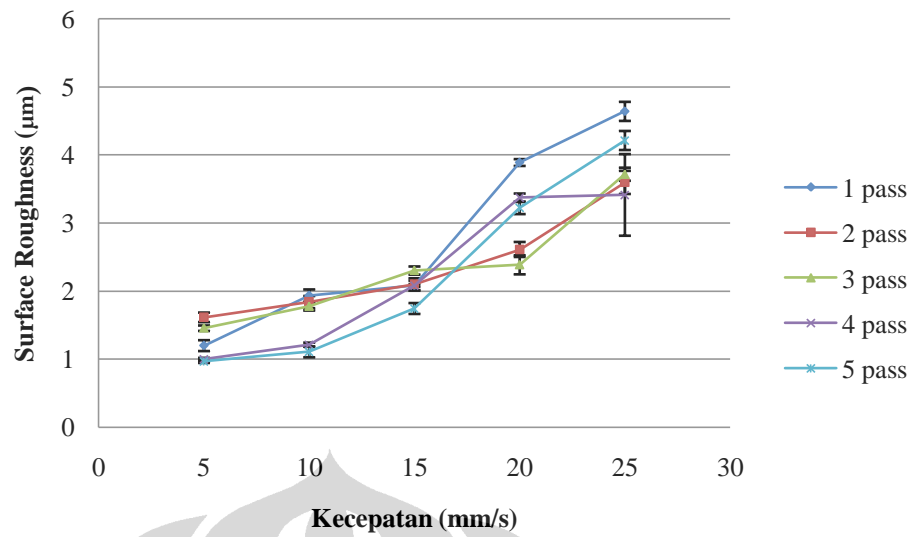
Gambar 4. 10 Grafik pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap *surface roughness* pada daya 4,8 watt



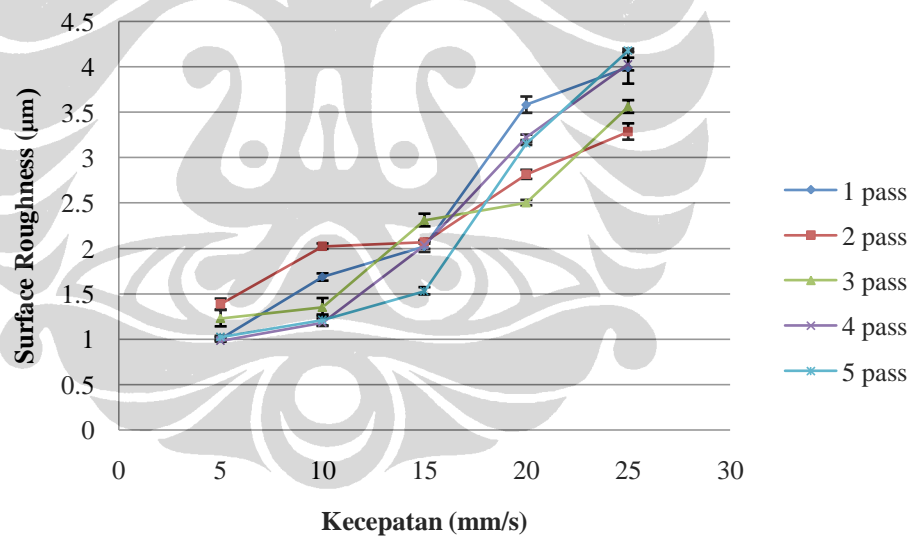
Gambar 4. 11 Grafik pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap *surface roughness* pada daya 5,4 watt



Gambar 4. 12 Grafik pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap *surface roughness* pada daya 6 watt

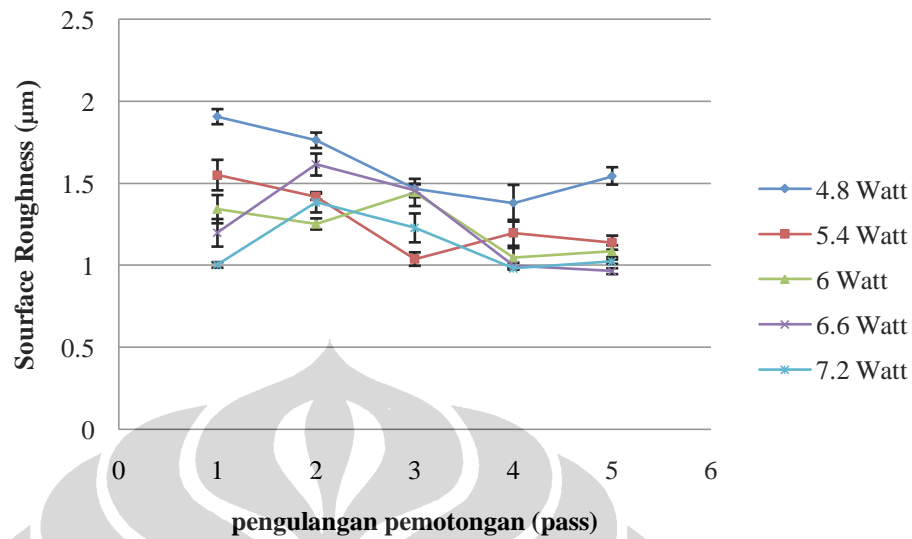


Gambar 4. 13 Grafik pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap *surface roughness* pada daya 6,6 watt

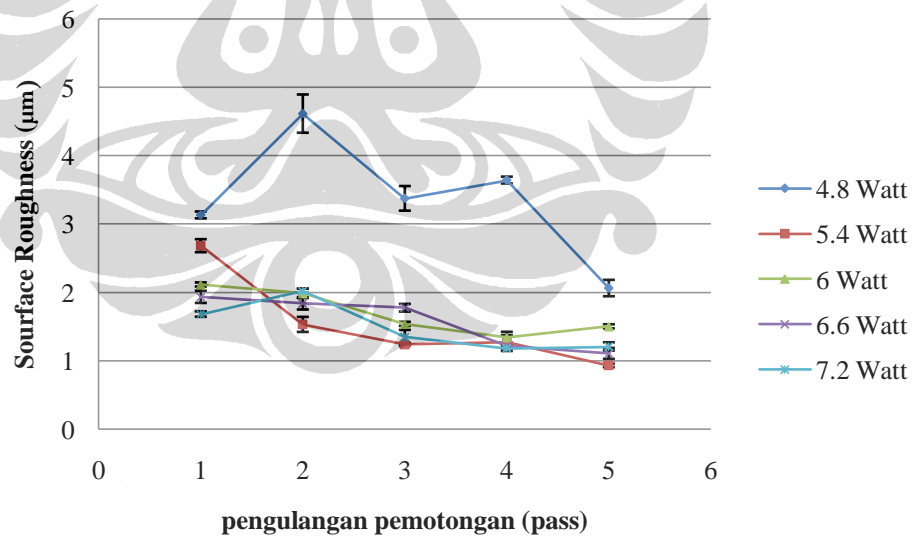


Gambar 4. 14 Grafik pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap *surface roughness* pada daya 7,2 watt

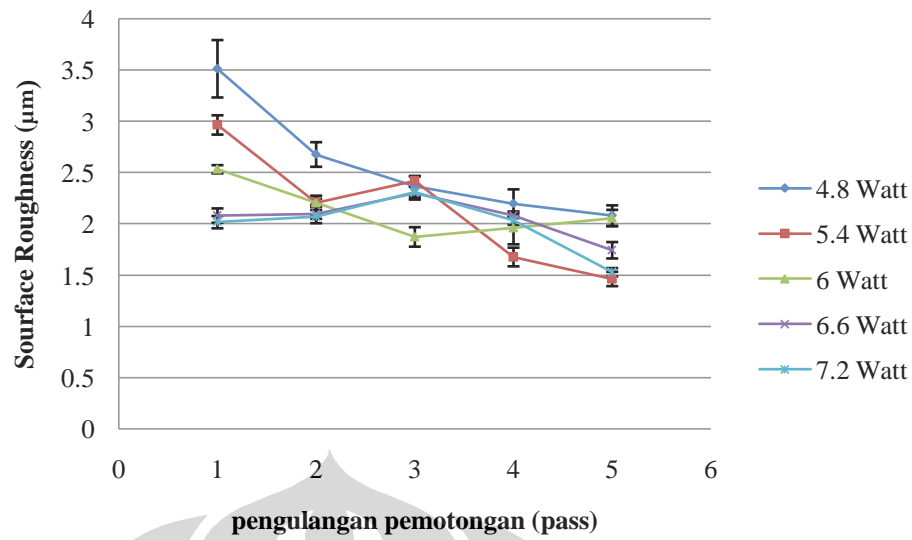
4.4.3 Pengaruh parameter pengulangan pemotongan dan daya terhadap *surface roughness* hasil pemotongan



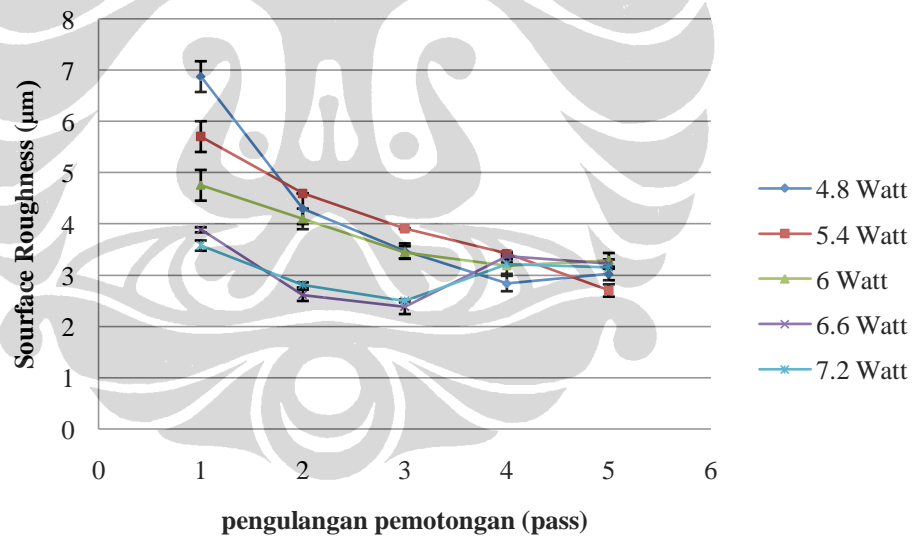
Gambar 4. 15 Grafik pengaruh parameter pengulangan pemotongan dan daya terhadap *surface roughness* pada kecepatan 5 mm/s



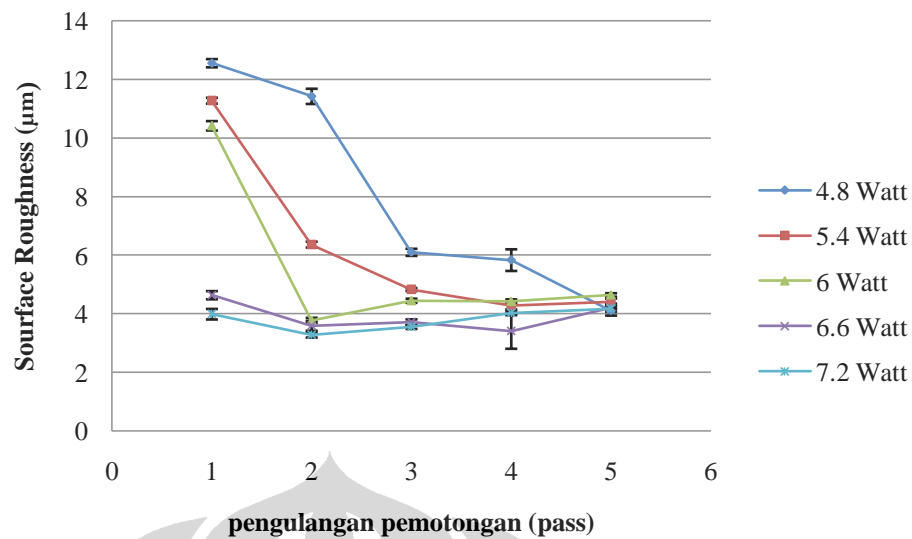
Gambar 4. 16 Grafik pengaruh parameter pengulangan pemotongan dan daya terhadap *surface roughness* pada kecepatan 10 mm/s



Gambar 4. 17 Grafik pengaruh parameter pengulangan pemotongan dan daya terhadap *surface roughness* pada kecepatan 15 mm/s



Gambar 4. 18 Grafik pengaruh parameter pengulangan pemotongan dan daya terhadap *surface roughness* pada kecepatan 20 mm/s



Gambar 4. 19 Grafik pengaruh parameter pengulangan pemotongan dan daya terhadap *surface roughness* pada kecepatan 25 mm/s

4.5. Analisis Hasil Pemotongan

Pada penelitian ini, proses analisis data dilakukan dengan menggunakan metode anova dan friedman test.

4.5.1 Analisis of Varians (ANOVA)

4.5.1.1. Pengaruh daya dan kecepatan terhadap *surface roughness* hasil pemotongan

Tabel 4. 5 Data pengaruh *surface roughness* antara parameter daya laser dan kecepatan pemotongan pada 1 *pass*

	4.8 Watt	5.4 Watt	6 Watt	6.6 Watt	7.2 Watt	Total Baris
5 mm/s	1.908	1.552	1.344	1.2	1.004	7.008
10 mm/s	3.134	2.684	2.116	1.936	1.684	11.554
15 mm/s	3.516	2.968	2.536	2.084	2.02	13.124
20 mm/s	7.552	5.71	4.76	3.892	3.584	25.498
25 mm/s	12.564	11.284	10.428	4.664	3.996	42.936
Tot.Kolm	28.674	24.198	21.184	13.776	12.288	100.12

Tabel 4. 6 Analisis varian *surface roughness* hasil pemotongan berdasarkan data pada tabel 4.5

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 168.74	db numer1 r-1= 5-1=4	$s^2B=KTB=$ JKB/r-1= 168.74/4= 42.18	fhitung = KTB/KTG = 42.18/2.38 = 17.68	$\alpha= 5\%$ db numer1 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Rata-rata kolom	JKK= 38.49	db numer2 k-1= 5-1=4	$s^2K=KTK=$ JKK/k 38.49/4 = 9.62	fhitung = KTK/KTG = 9.62/2.38 = 4.03	$\alpha= 5\%$ db numer2 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Galat	JKG= 38.16	db denum (r-1)(k-1) = 4x4=16	$s^2G=KTG=$ JKG/(r-1)(k-1)= 38.16/16= 2.38		
total	JKT= 7,46	(r.k)-1= (5x5)-1 = 24			

Analisis data yang diperoleh dari hasil uji coba, berdasarkan data tabel 4.5 dan perhitungan anova pada tabel 4.6:

- F hitung kolom (parameter daya) lebih besar F tabel
- F hitung baris (parameter kecepatan) lebih besar F tabel

disimpulkan bahwa untuk parameter daya laser dan kecepatan pemotongan sangat mempengaruhi *surface roughness* hasil pemotongan

4.5.1.2. Pengaruh kecepatan dan pengulangan pemotongan (pass) terhadap surface roughness hasil pemotongan

Tabel 4. 7 Data pengaruh *surface roughness* antara parameter kecepatan pemotongan dan pengulangan pemotongan (pass) pada daya 4.8 watt

	5 mm/s	10 mm/s	15 mm/s	20 mm/s	25 mm/s	Total Baris
1 Pass	1.908	3.134	3.516	6.88	12.564	28.002
2 Pass	1.764	4.616	2.68	4.304	11.432	24.796
3 Pass	1.468	3.376	2.368	3.476	6.108	16.796
4 Pass	1.38	3.655	2.2	2.93	5.842	16.007
5 Pass	1.53	2.113	1.953	3.028	4.108	12.732
Tot. Kolom	8.05	16.894	12.717	20.618	40.054	98.333

Tabel 4. 8 Analisis varian *surface roughness* hasil pemotongan berdasarkan data pada tabel 4.7

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 33.1	db numer1 r-1= 5-1=4	$s^2B=KTB=$ JKB/r-1= 38.1/4= 8.27	fhitung = KTB/KTG = 38.1/2.41 = 3.44	$\alpha= 5\%$ db numer1 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Rata-rata kolom	JKK= 121.49	db numer2 k-1= 5-1=4	$s^2K=KTK=$ JKK/k 121.49/4 = 30.37	fhitung = KTK/KTG = 30.37/2.41 = 12.63	$\alpha= 5\%$ db numer2 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Galat	JKG= 38.49	db denum (r-1)(k-1) = 4x4=16	$s^2G=KTG=$ JKG/(r-1)(k-1)= 38.49/16= 2.41		
total	JKT= 193.09	(r.k)-1= (5x5)-1 = 24			

Analisis data yang diperoleh dari hasil uji coba, berdasarkan data tabel 4.7 dan perhitungan anova pada tabel 4.8:

- F hitung kolom (parameter kecepatan) lebih besar F tabel
- F hitung baris (parameter *pass*) mendekati nilai F tabel

disimpulkan bahwa untuk parameter kecepatan pemotongan sangat mempengaruhi *surface roughness* hasil pemotongan, tetapi pada parameter *pass* tidak terlalu berpengaruh terhadap *surface roughness* hasil pemotongan.

4.5.1.3. Pengaruh pengulangan pemotongan (*pass*) dan daya terhadap *surface roughness* hasil pemotongan

Tabel 4. 9 Data *surface roughness* antara parameter daya laser dan kecepatan pemotongan

	1 <i>pass</i>	2 <i>Pass</i>	3 <i>Pass</i>	4 <i>Pass</i>	5 <i>Pass</i>	Total Baris
4.8 Watt	12.564	11.432	6.108	5.842	4.108	40.054
5.4 Watt	11.284	6.372	4.836	4.288	4.42	31.2
6 Watt	5.248	3.78	4.456	4.484	4.796	22.764
6.6 Watt	4.708	3.66	3.72	4.024	4.18	20.292
7.2 Watt	4.04	3.682	4.5	4.19	4.45	20.862
Tot. Kolom	37.844	28.926	23.62	22.828	21.954	135.172

Tabel 4. 10 Analisis varian *surface roughness* hasil pemotongan berdasarkan data pada tabel 4.9

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 57.73	db numer1 r-1= 5-1=4	$s^2B=KTB=$ JKB/r-1= 57.73/4= 14.43	fhitung = KTB/KTG = 14.43/3.61 = 3.99	$\alpha= 5 \%$ db numer1 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Rata-rata kolom	JKK= 35.12	db numer2 k-1= 5-1=4	$s^2K=KTK=$ JKK/k 35.12/4 = 8.78	fhitung = KTK/KTG = 35.12/3.61 = 2.43	$\alpha= 5 \%$ db numer2 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Galat	JKG= 57.54	db denum (r-1)(k-1) = 4x4=16	$s^2G=KTG=$ JKG/(r-1)(k-1)= 57.54/16= 3.61		
total	JKT= 150.58	(r.k)-1= (5x5)-1 = 24			

Analisis data yang diperoleh dari hasil uji coba, berdasarkan data tabel 4.9 dan perhitungan anova pada tabel 4.10:

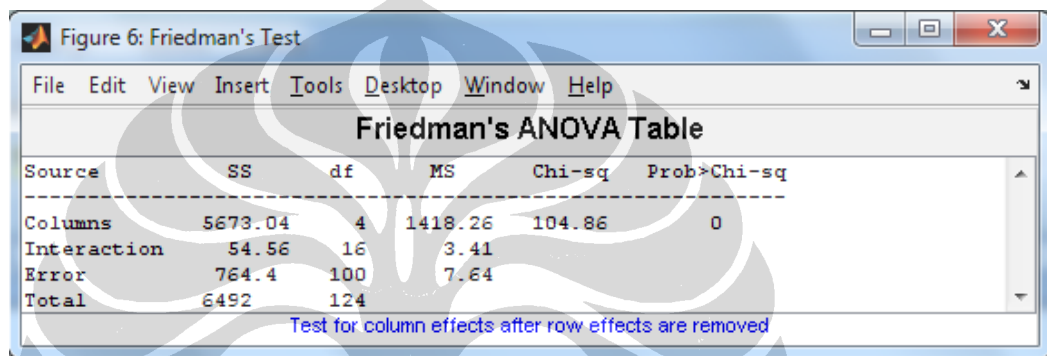
- F hitung kolom (parameter *pass*) lebih besar F tabel
- F hitung baris (parameter daya) mendekati nilai F tabel

disimpulkan bahwa untuk parameter daya laser sangat mempengaruhi *surface roughness* hasil pemotongan, tetapi pada parameter *pass* tidak terlalu berpengaruh terhadap *surface roughness* hasil pemotongan.

4.5.2. Friedman Test

Analisis data dengan menggunakan metode friedman test dilakukan perhitungan dengan menggunakan matlab versi 7. Berikut adalah beberapa tabel yang dihasilkan dalam perhitungan analisis metode friedman test.

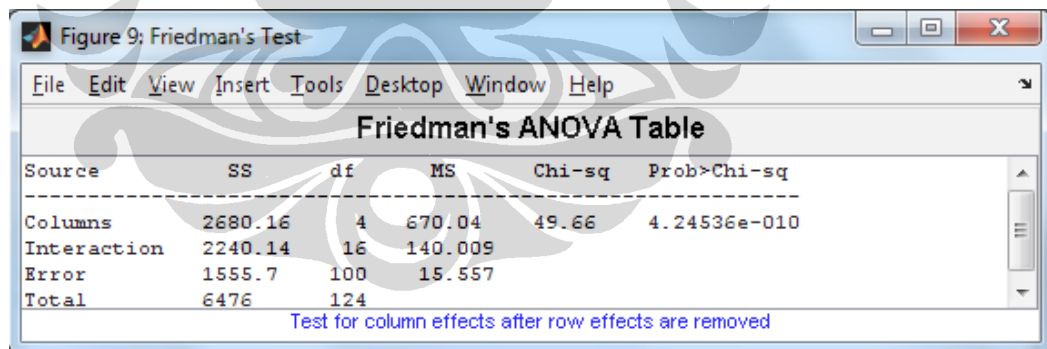
4.5.2.1 Pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap surface roughness hasil pemotongan



Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Columns	5673.04	4	1418.26	104.86	0
Interaction	54.56	16	3.41		
Error	764.4	100	7.64		
Total	6492	124			

Test for column effects after row effects are removed

Gambar 4. 20 Pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap *surface roughness* hasil pemotongan pada satu kali pemotongan



Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Columns	2680.16	4	670.04	49.66	4.24536e-010
Interaction	2240.14	16	140.009		
Error	1555.7	100	15.557		
Total	6476	124			

Test for column effects after row effects are removed

Gambar 4. 21 Pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap *surface roughness* hasil pemotongan pada dua kali pemotongan

Figure 3: Friedman's Test

Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Columns	1464.72	4	366.18	27.16	1.84151e-005
Interaction	3269.38	16	204.336		
Error	1736.4	100	17.364		
Total	6470.5	124			

Test for column effects after row effects are removed

Gambar 4. 22 Pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap *surface roughness* hasil pemotongan pada tiga kali pemotongan

Figure 4: Friedman's Test

Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Columns	1001.52	4	250.38	18.59	0.0009
Interaction	2797.78	16	174.861		
Error	2667.2	100	26.672		
Total	6466.5	124			

Test for column effects after row effects are removed

Gambar 4. 23 Pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap *surface roughness* hasil pemotongan pada empat kali pemotongan

Figure 9: Friedman's Test

Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Columns	1879.4	4	469.85	34.81	5.07783e-007
Interaction	2343	16	146.438		
Error	2256.1	100	22.561		
Total	6478.5	124			

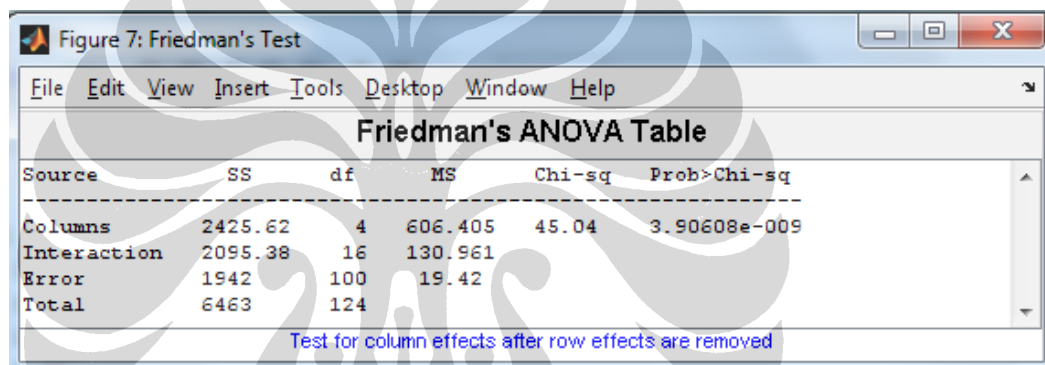
Test for column effects after row effects are removed

Gambar 4. 24 Pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap *surface roughness* hasil pemotongan pada lima kali pemotongan

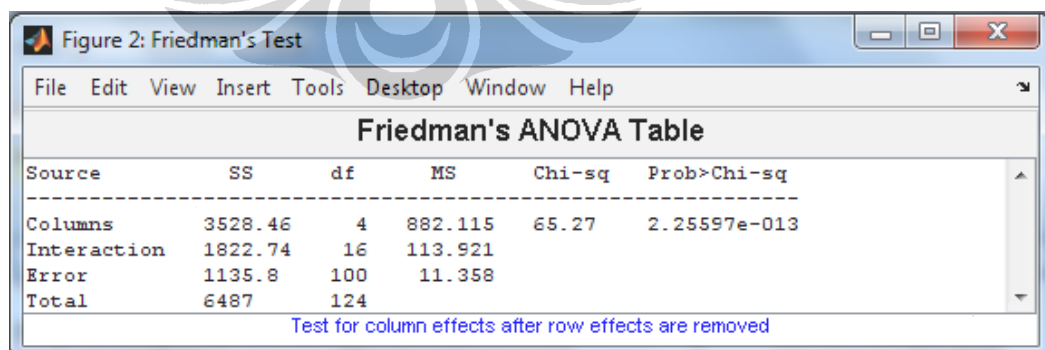
Tabel 4. 11 Chi kuadrat P value untuk pengaruh parameter daya dan kecepatan terhadap *surface roughness* hasil pemotongan

No	Jumlah pengulangan (<i>pass</i>)	Chi-sq hitung		Chi-sq tabel	P Value
1	1	104.86	>	9.49	0
2	2	49.66	>	9.49	4.2454×10^{-10}
3	3	27.16	>	9.49	1.8415×10^{-5}
4	4	18.59	>	9.49	9.4790×10^{-4}
5	5	34.81	>	9.49	5.0778×10^{-7}

4.5.2.2 Pengaruh parameter pengulangan pemotongan dan daya terhadap *surface roughness* hasil pemotongan



Gambar 4. 25 Pengaruh pengulangan pemotongan dan daya terhadap *surface roughness* hasil pemotongan pada kecepatan 5 mm/s



Gambar 4. 26 Pengaruh pengulangan pemotongan dan daya terhadap *surface roughness* hasil pemotongan pada kecepatan 10 mm/s

Figure 3: Friedman's Test

Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Columns	2761.96	4	690.49	51.13	2.09921e-010
Interaction	1893.44	16	118.34		
Error	1827.1	100	18.271		
Total	6482.5	124			

Test for column effects after row effects are removed

Gambar 4. 27 Pengaruh pengulangan pemotongan dan daya terhadap *surface roughness* hasil pemotongan pada kecepatan 15 mm/s

Figure 4: Friedman's Test

Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Columns	3233.98	4	808.495	59.81	3.18012e-012
Interaction	2291.92	16	143.245		
Error	962.6	100	9.626		
Total	6488.5	124			

Test for column effects after row effects are removed

Gambar 4. 28 Pengaruh pengulangan pemotongan dan daya terhadap *surface roughness* hasil pemotongan pada kecepatan 20 mm/s

Figure 5: Friedman's Test

Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Columns	2346.06	4	586.515	43.37	8.67672e-009
Interaction	2892.34	16	180.771		
Error	1253.1	100	12.531		
Total	6491.5	124			

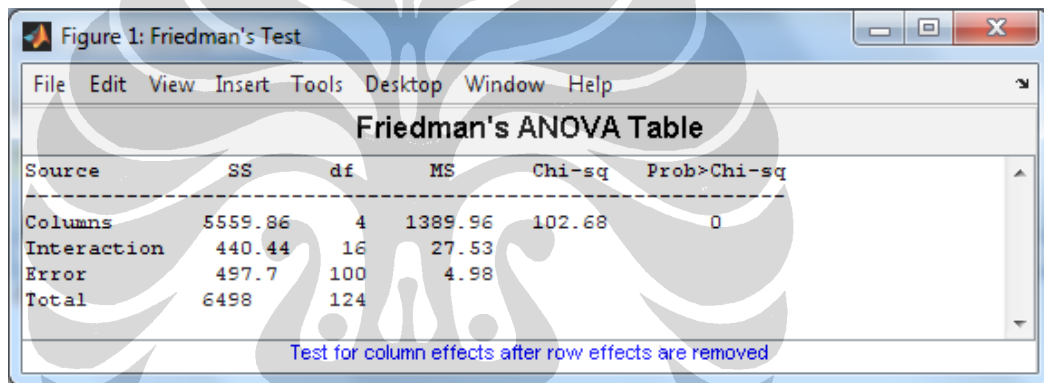
Test for column effects after row effects are removed

Gambar 4. 29 Pengaruh pengulangan pemotongan dan daya terhadap *surface roughness* hasil pemotongan pada kecepatan 25 mm/s

Tabel 4. 12 Chi kuadrat dan P value untuk pengaruh parameter jumlah pengulangan dan daya terhadap *surface roughness* hasil pemotongan

No	Kecepatan (mm/s)	Chi-sq hitung		Chi-sq tabel	P Value
1	5	45.04	>	9.49	3.9016×10^{-9}
2	10	65.27	>	9.49	2.2560×10^{-13}
3	15	51.13	>	9.49	2.0992×10^{-10}
4	20	59.81	>	9.49	3.1801×10^{-12}
5	25	43.37	>	9.49	8.6767×10^{-9}

4.5.2.3 Pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap *surface roughness* hasil pemotongan



Gambar 4. 30 Pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap *surface roughness* hasil pemotongan pada daya 4,8 watt

Figure 2: Friedman's Test

Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Columns	5851.54	4	1462.89	108.13	0
Interaction	184.86	16	11.55		
Error	457.6	100	4.58		
Total	6494	124			

Test for column effects after row effects are removed

Gambar 4. 31 Pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap *surface roughness* hasil pemotongan pada daya 5,4 watt

Figure 3: Friedman's Test

Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Columns	5951.5	4	1487.88	110.03	0
Interaction	142.2	16	8.89		
Error	396.8	100	3.97		
Total	6490.5	124			

Test for column effects after row effects are removed

Gambar 4. 32 Pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap *surface roughness* hasil pemotongan pada daya 6 watt

Figure 4: Friedman's Test

Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Columns	5623.42	4	1405.86	103.9	0
Interaction	122.08	16	7.63		
Error	749	100	7.49		
Total	6494.5	124			

Test for column effects after row effects are removed

Gambar 4. 33 Pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap *surface roughness* hasil pemotongan pada daya 6,6 watt

Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Columns	6018.64	4	1504.66	111.31	0
Interaction	44.36	16	2.77		
Error	425.5	100	4.25		
Total	6488.5	124			

Test for column effects after row effects are removed

Gambar 4. 34 Pengaruh parameter kecepatan dan pengulangan pemotongan terhadap *surface roughness* hasil pemotongan pada daya 7,2 watt

Tabel 4. 13 Chi kuadrat P value untuk pengaruh parameter kecepatan dan jumlah pengulangan pemotongan terhadap *surface roughness* hasil pemotongan

No	Daya (watt)	Chi-sq hitung		Chi-sq tabel	P Value
1	4,8	102.68	>	9.49	0
2	5,4	108.13	>	9.49	0
3	6	110.03	>	9.49	0
4	6,6	103.9	>	9.49	0
5	7,2	111.31	>	9.49	0

Berdasarkan analisis pengaruh parameter mesin laser CO₂ terhadap *surface roughness* hasil pemotongan yang dilakukan menggunakan friedman test diperoleh bahwa tiap-tiap parameter mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap *surface roughness* hasil pemotongan karena memiliki nilai chi kuadrat hitung untuk tiap parameter lebih besar daripada chi kuadrat tabel.

4.5.3 Analisis Response Surface Methodology (RSM)

Analisis berdasarkan data yang diperoleh, dengan mencari model regresi untuk melihat pengaruh parameter input terhadap parameter hasil. Pada metode RSM tidak hanya dapat mengetahui pengaruh tetapi dapat juga mengetahui titik optimal dari beberapa parameter yang diberikan. Berikut adalah persamaan matematik dan gambar hasil analisis RSM dengan menggunakan software Matlab.

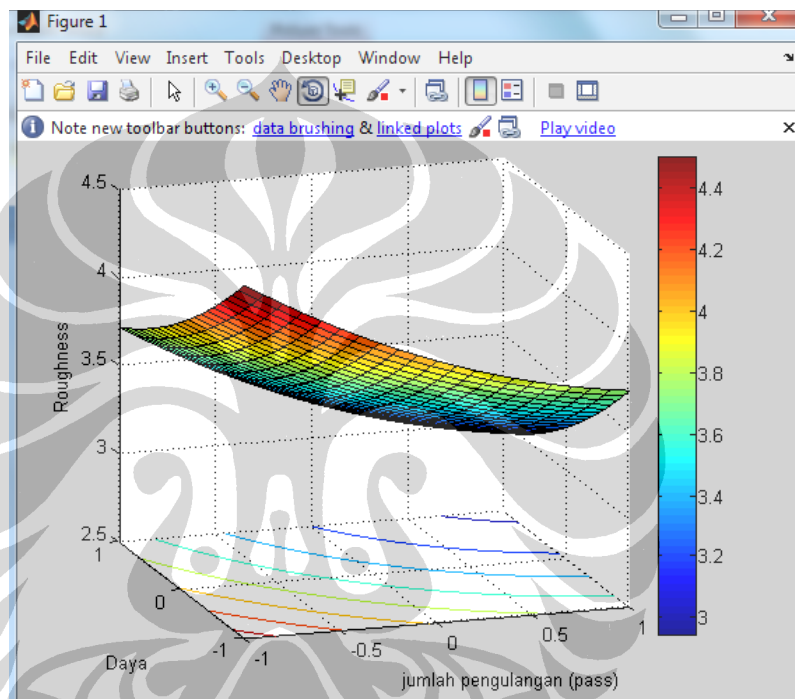
$$Y = 1.9226 - 0.3865 A - 0.3913 B + 1.0193 C + 0.2052 AB - 0.1326 AC \\ - 0.1887 BC + 0.1304 A^2 + 0.0888 B^2 + 0.2737 C^2$$

Keterangan:

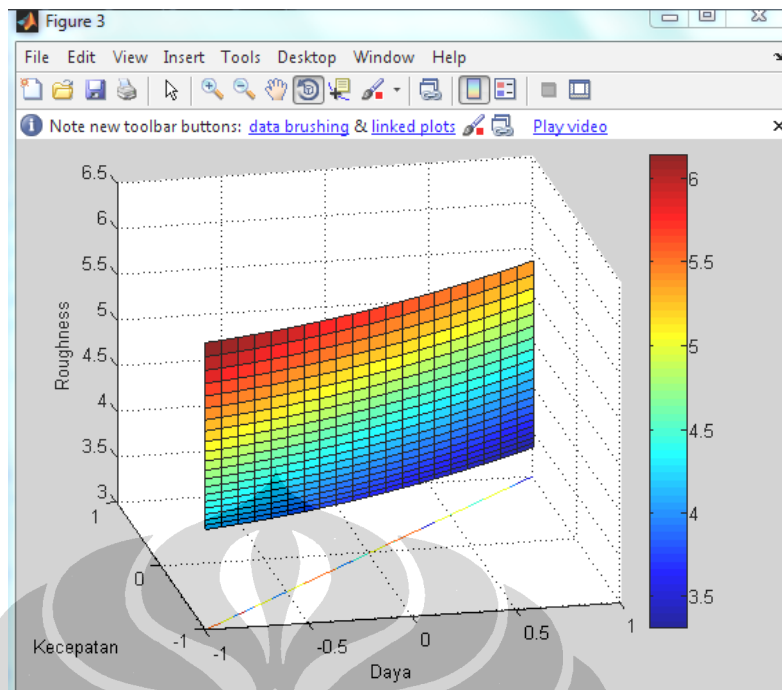
A = parameter pengulangan pemotongan (*pass*)

B = Parameter Daya Laser

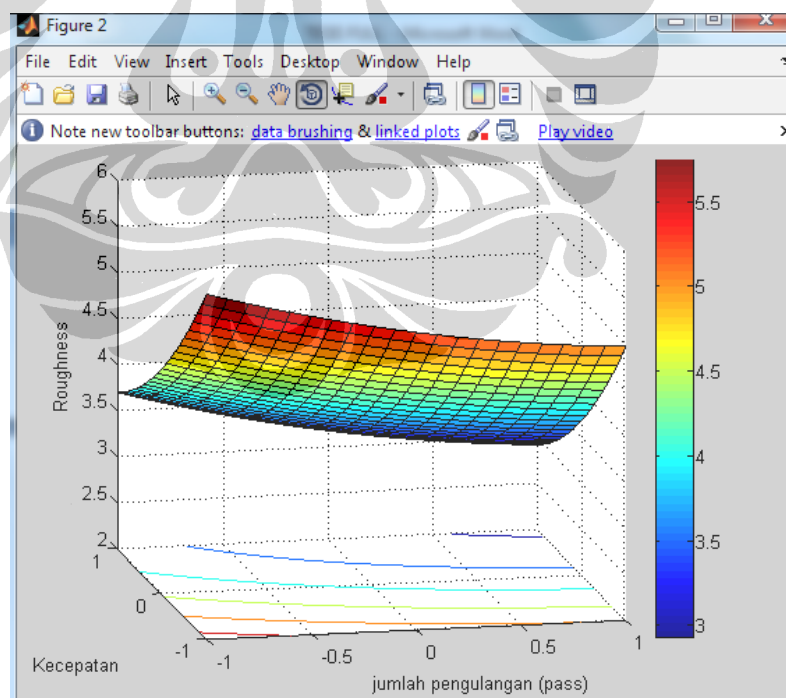
C = Parameter Kecepatan Pemotongan



Gambar 4. 35 Grafik pengaruh daya dan pengulangan pemotongan (*pass*) terhadap surface roughness hasil pemotongan



Gambar 4. 36 Grafik pengaruh daya dan kecepatan terhadap surface roughness hasil pemotongan

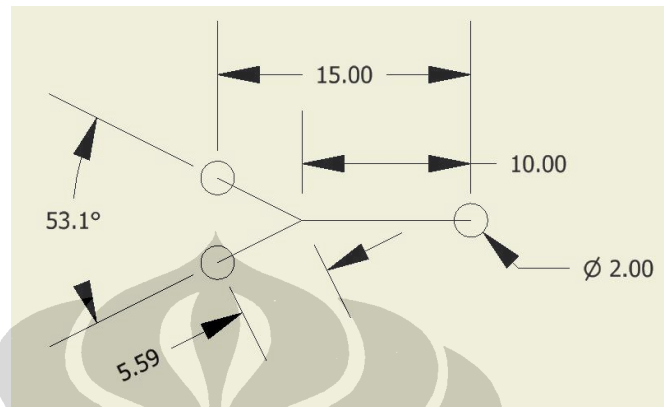


Gambar 4. 37 Grafik pengaruh pengulangan pemotongan dan kecepatan terhadap surface roughness hasil pemotongan

4.6. Pembentukan Mikrofluidik

4.6.1 Pembentukan Desain *Channel*

Membuat desain channels menggunakan *software autodesk inventor* dengan dimensi dan bentuk *channel* pada gambar 4.14



Gambar 4. 38 Desain bentuk dan dimensi *channel*

4.6.2 Microstructuring

- Setelah gambar desain dilakukan dilanjutkan proses pemotongan
- Parameter mesin yang digunakan berdasarkan parameter yang digunakan pada proses analisis parameter input terhadap *surface roughness* hasil pemotongan
- Pada gambar 4.15 adalah channels yang telah dibentuk pada material acrylic menggunakan mesin laser CO₂ dengan parameter 1 *pass*, daya 4.8 Watt dan kecepatan 10 mm/s



Gambar 4. 39 Hasil pembentukan *channel*

4.6.3 Proses *joining*

Tiga hal yang perlu diperhatikan dalam proses *joining* adalah *pressure*, suhu dan waktu

- Alat yang digunakan untuk mengukur suhu pada saat pemanasan adalah *temperature tester* dengan tipe *HIOKI 3412*



Gambar 4. 40 Multitester temperatur

- Untuk proses pemanasan menggunakan alat *heat gun* dengan tipe *McCULLOCH 8630*



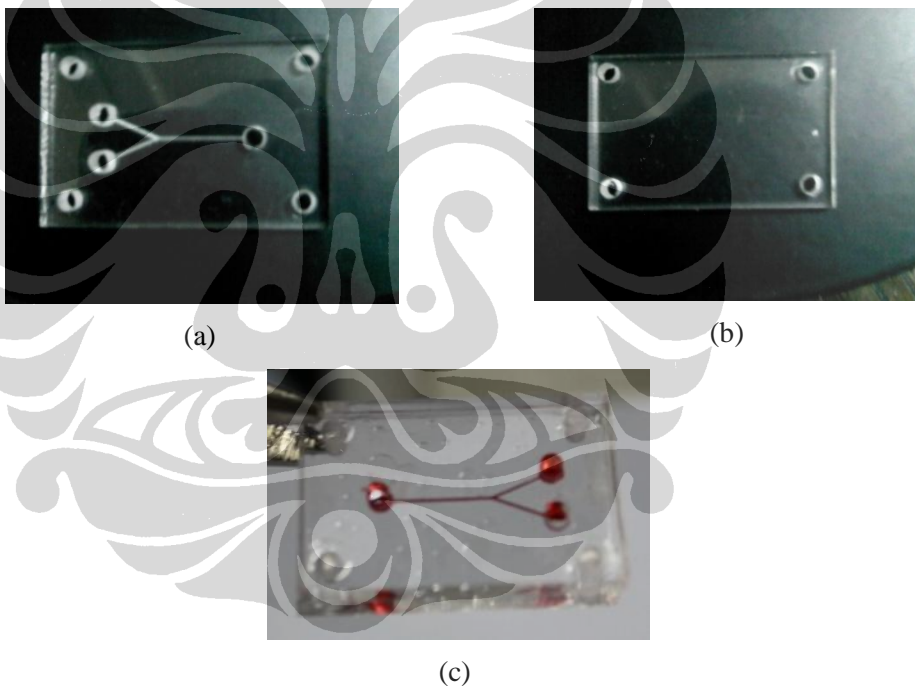
Gambar 4. 41 *Heat gun*

- Sedangkan untuk menghitung waktu menggunakan *stopwatch*

Langkah-langkah yang dilakukan selama proses *joining* sebagai berikut:

- Mempersiapkan material, yaitu material yang telah dilakukan pembentukan channel dan material

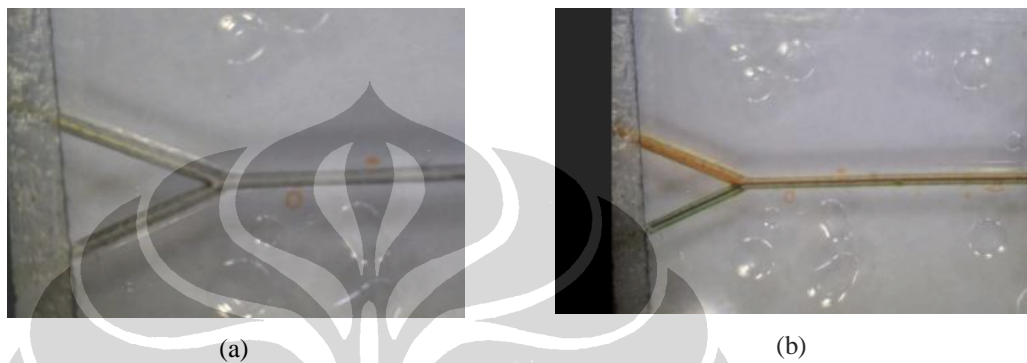
- Mempersiapkan peralatan yang akan digunakan (untuk mengamati parameter yang harus diperhatikan)
- Untuk memberikan pressure pada material, pada penelitian ini menggunakan 4 buah screw dengan diameter 2 mm yang dipasangkan pada tiap sudut material
- Kemudian dilakukan proses pemanasan menggunakan heat gun, dengan menembakkan panas pada material
- Selama proses pemanasan ini dilakukan pengaturan suhu dengan cara mengukur perubahan suhu pada material (suhu yang digunakan pada proses pemanasan yaitu antara 115 °C)
- Untuk proses pemanasan, dilakukan mempertahankan suhu material antara 115 °C selama 40 menit



Gambar 4. 42 Material yang telah dibentuk *channel* (a) material penutup (b) material setelah dilakukan *joining* (c)

4.7 Pengujian Mikrofluidik

Pada tahapan ini pengujian dilakukan dengan mencoba mengalirkan cairan melalui channel yang dibentuk, pengujian dilakukan menggunakan suntikan sebagai alat injeksi, dan menggunakan dua warna cairan yaitu hijau dan merah. Pengujian ini direkam menggunakan mikroskop digital. Pada gambar 4.19 adalah merupakan bagian dari video rekaman dari pengujian mikrofluidik.



(a) (b)
Gambar 4. 43 Hasil pengujian mikrofluidik
Sebelum dimasukkan cairan (a), setelah cairan masuk (b)

BAB V

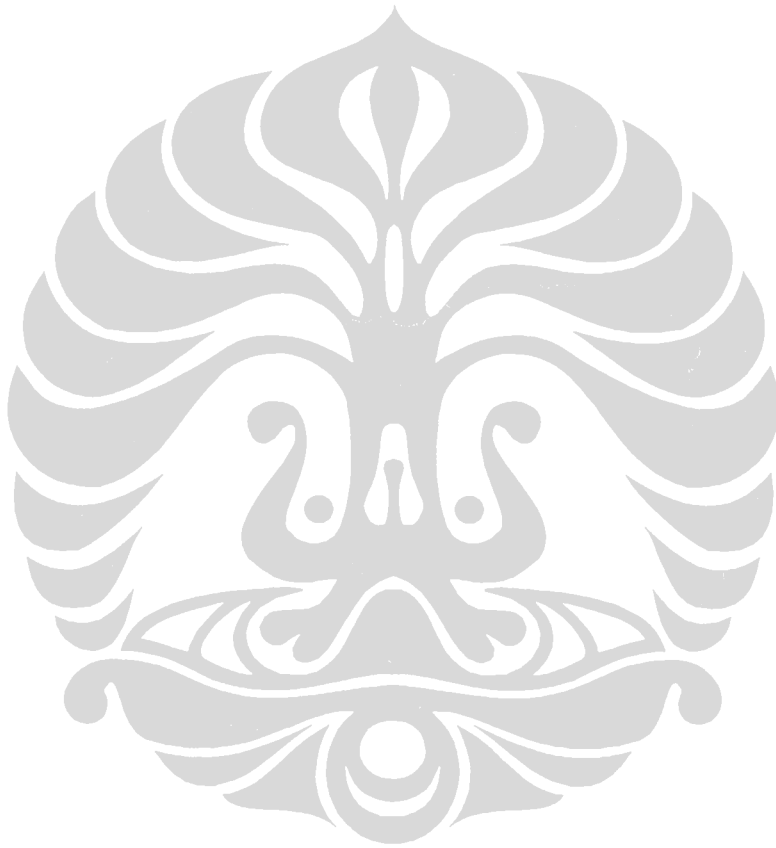
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

1. Berdasarkan grafik data hasil uji coba:
 - Semakin besar daya laser yang digunakan maka nilai *surface roughness* hasil pemotongan akan semakin kecil.
 - Semakin besar kecepatan pemotongan maka nilai *surface roughness* akan semakin besar.
 - Untuk parameter pengulangan pemotongan (*pass*) tidak berpengaruh linear terhadap nilai *surface roughness* hasil pemotongan.
2. Berdasarkan analisis data hasil uji coba dengan pembacaan grafik dan analisis data diperoleh bahwa:
 - Semua parameter mesin laser CO₂ yaitu daya laser, kecepatan pemotongan dan pengulangan pemotongan (*pass*) mempengaruhi *surface roughness* hasil pemotongan.
 - Untuk parameter kecepatan pemotongan sangat mempengaruhi *surface roughness* hasil pemotongan.
 - Sebaliknya pada parameter daya laser dan pengulangan pemotongan (*pass*) tidak terlalu berpengaruh terhadap *surface roughness* hasil pemotongan.
3. Fabrikasi mikrofluidik nilai *surface roughness* yang diperoleh sesuai dengan data hasil pemotongan berdasarkan parameter yang digunakan.
4. Metode *thermal bonding* pada proses *joining* telah berhasil dilakukan, dengan melakukan pemanasan pada material hingga mencapai suhu 115 °C dan dipertahankan selama 50 menit.

5.2. Saran

- Pengembangan mesin laser dengan menggunakan system pergerakan sumbu x dan y pada benda kerja, untuk mengurangi ketidakrataan hasil pemotongan.
- Pembuatan alat untuk proses *joining* dengan metode *thermal bonding*
- Analisis fluida pada channel setelah dilakukan joining.



DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Han Wei Hou, Wong Cheng Lee, Man Chun Leong, Surabhi Sonam, Sri Ram Krishna Vedula, and Chwee Teck Lim, *Microfluidics for Applications in Cell Mechanics and Mechanobiology*, Cellular and Molecular Bioengineering, Vol. 4, No. 4, December 2011 pp. 591–602 DOI: 10.1007/s12195-011-0209-4.
- [2]. Wonjin Jeon, Chee Burm Shin, *Design and simulation of passive mixing in microfluidics systems with geometric variation*, Chemical Engineering Journal 152 (2009) 575–582.
- [3]. Youli Li, Thomas pfohl, Joon Heon Kim, Mario Yasa, Zhiyu Wen, Mahn Won Kim and Cyrus R. Safiya, *selective surface modification in silicon microfluidics channels for micromanipulation of biological macromolecules*, Biomedical Microdevice 3:3, 239-244, 2001.
- [4]. Qiuping Chen • Qiuling Chen • Gabriele Maccioni Adriano Sacco • Luciano Scaltrito • Monica Ferraris • Sergio Ferrero, *Fabrication of large-area microfluidics structures on glass by imprinting and diode-pumped solid state laser writing techniques*, Microsyst Technol (2011) 17:1611–1619 DOI 10.1007/s00542-011-1348-1.
- [5]. Holger Becker & Claudia Gärtner, *Polymer microfabrication technologies for microfluidics systems*, Anal Bioanal Chem (2008) 390:89–111, DOI 10.1007/s00216-007-1692-2.
- [6]. C. Hnatovsky, r.s. taylor, e. Simova, p.p. rajeev, d.m. rayner, v.r. bhardwaj, p.b. corkum, *Fabrication of microchannels in glass using focused femtosecond laser radiation and selective chemical etching*, Appl. Phys. A 84, 47–61 (2006), DOI: 10.1007/s00339-006-3590-4.
- [7]. Cheng-Hsien Wu, and Hsien-Chang Kuo, *Parametric study of injection molding and hot embossing in polymer microfabrication*, Journal of Mechanical Science and Technology 21 (2007) 1477-1482.

- [8]. G. Fu • S. B. Tor • D. E. Hardt • N. H. Loh, *Effects of processing parameters on the micro-channels replication in microfluidics devices fabricated by microinjection molding*, *Microsyst Technol* (2011) 17:1791–1798 DOI 10.1007/s00542-011-1363-2.
- [9]. Y. Xia and G. M. Whitesides, , “*soft lithography*”, *Annu. Rev. Mater. Sci.*1998, 28, 153–184.
- [10]. Devalckenaere M, Jadin A, Kolev K, Laude LD. *Excimer laser ablation of polycarbonate-based plastic substrates*. *Nucl Instrum Methods B* 1999;151: 263–7.
- [11]. J.M. Li, C. Liu, L.Y. Zhu, *The formation and elimination of polymer bulges in CO₂ laser microfabrication*, *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 4814–4821.
- [12]. Ario Sunar Baskoro, Herwandi, KGS Ismail, Agus Siswanta, Gandjar Kiswanto, *Analysis of Cutting Process of Materials Using Low Power Laser Diode and CO₂*, 118006-3535 IJMME-IJENS © December 2011 IJENS.
- [13]. Nam-Trung Nguyen Steven T. Wereley, *Fundamentals and Applications of Microfluidics*.
- [14]. Satish G. Kandlikar, *Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels*.
- [15]. Breck Hitz, J.J. Ewing, Jeff Hecht, *Introduction to Laser Technology (Third Edition)*.
- [16]. B.S. YILBAS, M. RASHID, “CO₂ Laser Cutting Of Incoloy 800ht Alloy And Its Quality Assessment”, *journal Lasers in Engineering*, May 2002, Vol. 12, No. 2, pp. 135–145.
- [17]. Yongguang Huang, Shibing Liu *, Wei Yang, Chengxin Yu, *Surface roughness analysis and improvement of PMMA-based microfluidic chip chambers by CO₂ laser cutting*, *Applied Surface Science* 256 (2010) 1675–1678.
- [18]. Xuelin Zhu Æ Gang Liu Æ Yuhua Guo, Yangchao Tian, *Study of PMMA thermal bonding*, *Microsyst Technol* (2007) 13: 403–407 DOI 10.1007/s00542-006-0224-x.

**LAMPIRAN 1. DATA SURFACE ROUGHNESS HASIL PENGUKURAN
HASIL PEMOTONGAN**

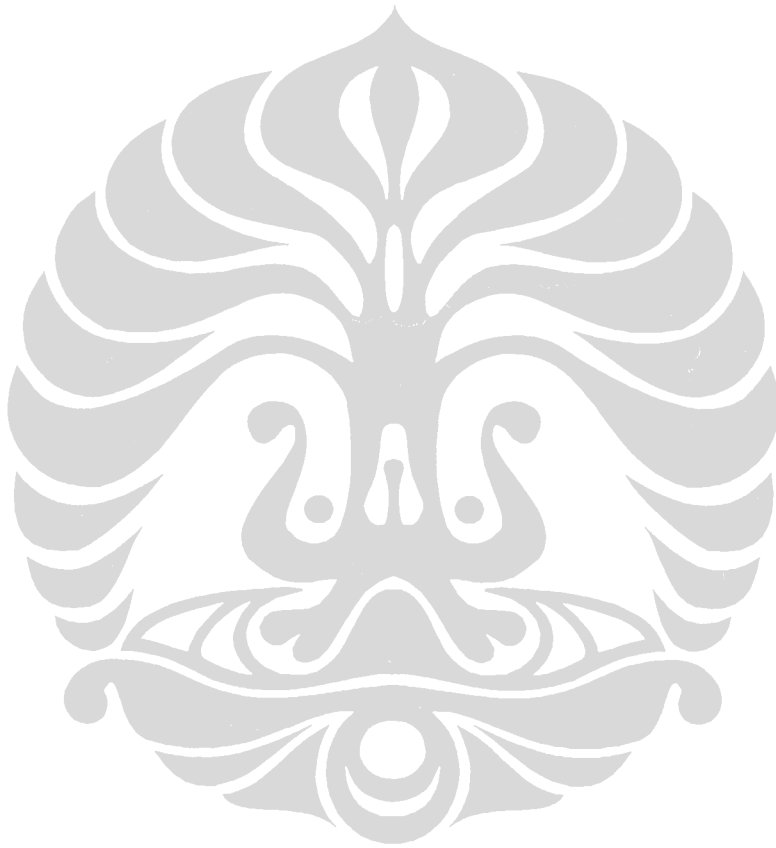
No	Pass	Daya (Watt)	Kecepatan (mm/s)	Ra_1 (μm)	Ra_2 (μm)	Ra_3 (μm)	Ra_4 (μm)	Ra_5 (μm)	Ra (Mean) (μm)	Ra Sisi miring (μm)
1	1	4.8	5	1.96	1.88	2.04	1.76	1.9	1.908	2.02
2	1	4.8	10	3.04	3.3	3.11	3.16	3.06	3.134	3.11
3	1	4.8	15	3.26	3.5	3.14	3.08	4.6	3.516	3.97
4	1	4.8	20	5.9	6.98	6.86	6.8	7.86	6.88	5.67
5	1	4.8	25	12.44	12.16	12.44	12.96	12.82	12.564	12.35
6	1	5.4	5	1.4	1.32	1.66	1.54	1.84	1.552	1.55
7	1	5.4	10	2.74	2.96	2.76	2.56	2.4	2.684	3.01
8	1	5.4	15	3.18	2.68	3.12	2.82	3.04	2.968	3.78
9	1	5.4	20	6.65	5.38	5.16	5.14	6.22	5.71	4.47
10	1	5.4	25	11.5	11	11.2	11.51	11.21	11.284	11.25
11	1	6	5	1.26	1.1	1.6	1.46	1.3	1.344	1.24
12	1	6	10	2.1	2.16	2.2	2.02	2.1	2.116	2.66
13	1	6	15	2.4	2.54	2.66	2.54	2.54	2.536	2.68
14	1	6	20	5.14	5.1	5	5.02	3.54	4.76	4.32
15	1	6	25	10.12	11.02	10.4	10.38	10.22	10.428	10.28
16	1	6.6	5	1.2	1.3	1.4	0.9	1.2	1.2	1.19
17	1	6.6	10	1.68	2.04	2.22	1.82	1.92	1.936	2.02
18	1	6.6	15	2.12	1.96	1.94	2.06	2.34	2.084	2.54
19	1	6.6	20	3.74	3.92	3.84	4	3.96	3.892	3.97
20	1	6.6	25	4.66	5.06	4.5	4.22	4.78	4.644	4.24
21	1	7.2	5	1.02	0.96	1.06	1	0.98	1.004	1.05
22	1	7.2	10	1.68	1.58	1.82	1.72	1.62	1.684	1.56
23	1	7.2	15	1.9	1.9	2	2.1	2.2	2.02	1.98
24	1	7.2	20	3.68	3.22	3.6	3.74	3.68	3.584	3.42
25	1	7.2	25	4.1	3.44	4.18	4.5	3.76	3.996	4.2
26	2	4.8	5	1.82	1.72	1.76	1.62	1.9	1.764	1.53
27	2	4.8	10	5.72	4.48	4.46	4.32	4.1	4.616	3.47
28	2	4.8	15	2.54	2.86	2.42	3.06	2.52	2.68	2.55
29	2	4.8	20	4.1	4.34	5.18	4.6	3.3	4.304	4.33
30	2	4.8	25	11.88	11.84	11.38	11.6	10.46	11.432	11.38
31	2	5.4	5	1.46	1.42	1.36	1.46	1.4	1.42	1.5
32	2	5.4	10	1.52	1.78	1.32	1.26	1.78	1.532	1.78
33	2	5.4	15	2.08	2.22	2.28	2.32	2.14	2.208	2.14
34	2	5.4	20	4.66	4.48	4.6	4.66	4.6	4.6	4.46
35	2	5.4	25	6.46	6.64	6.1	6.32	6.34	6.372	6.35
36	2	6	5	1.16	1.26	1.3	1.2	1.35	1.254	1.3

Universitas Indonesia

37	2	6	10	1.96	2	2.02	1.76	2.2	1.988	2.01
38	2	6	15	2.24	2.06	2.02	2.4	2.32	2.208	2.22
39	2	6	20	3.48	4.6	4.48	3.96	4	4.104	3.48
40	2	6	25	3.58	3.9	3.54	3.94	3.96	3.784	4.46
41	2	6.6	5	1.46	1.46	1.64	1.76	1.76	1.616	1.28
42	2	6.6	10	1.82	1.9	1.54	1.82	2.12	1.84	1.97
43	2	6.6	15	2.06	2.24	2.1	2.32	1.78	2.1	2.06
44	2	6.6	20	2.48	2.32	2.86	2.56	2.85	2.614	2.54
45	2	6.6	25	3.82	3.74	3.5	3.94	3	3.6	3.64
46	2	7.2	5	1.56	1.23	1.32	1.5	1.32	1.386	1.32
47	2	7.2	10	2.02	2.12	2.04	1.98	1.96	2.024	2.12
48	2	7.2	15	2.12	2.06	2.02	2.04	2.12	2.072	2.35
49	2	7.2	20	2.88	2.7	2.86	2.94	2.7	2.816	3.05
50	2	7.2	25	3.32	3	3.16	3.5	3.46	3.288	3.67
51	3	4.8	5	1.42	1.48	1.58	1.46	1.4	1.468	1.64
52	3	4.8	10	3.6	3.2	2.82	3.88	3.38	3.376	1.96
53	3	4.8	15	2.76	2.2	2.28	2.28	2.32	2.368	2.35
54	3	4.8	20	3.26	4.02	3.58	3.18	3.34	3.476	2.87
55	3	4.8	25	6.26	6.4	6.1	5.7	6.08	6.108	5.98
56	3	5.4	5	0.96	1.02	0.96	1.18	1.08	1.04	1.35
57	3	5.4	10	1.2	1.24	1.24	1.32	1.2	1.24	1.32
58	3	5.4	15	2.58	2.46	2.3	2.44	2.32	2.42	3.56
59	3	5.4	20	3.96	4.08	3.68	3.88	3.96	3.912	4.44
60	3	5.4	25	4.86	4.72	4.74	4.9	4.96	4.836	4.96
61	3	6	5	1.4	1.46	1.2	1.72	1.45	1.446	1.32
62	3	6	10	1.44	1.52	1.62	1.52	1.6	1.54	1.56
63	3	6	15	2.24	1.84	1.84	1.7	1.76	1.876	1.97
64	3	6	20	3.5	3.32	3.84	3.46	3.14	3.452	3.64
65	3	6	25	4.48	4.3	4.46	4.34	4.7	4.456	4.76
66	3	6.6	5	1.46	1.38	1.44	1.6	1.4	1.456	1.45
67	3	6.6	10	1.66	1.62	1.88	1.84	1.88	1.776	1.76
68	3	6.6	15	2.42	2.2	2.46	2.12	2.32	2.304	2.34
69	3	6.6	20	2.58	2.76	2.1	2	2.5	2.388	2.15
70	3	6.6	25	3.6	3.58	3.58	4.08	3.76	3.72	2.98
71	3	7.2	5	0.98	1.23	1.12	1.5	1.32	1.23	1.22
72	3	7.2	10	1.56	1.32	0.98	1.5	1.4	1.352	1.63
73	3	7.2	15	2.46	2.2	2.46	2.12	2.32	2.312	2.44
74	3	7.2	20	2.58	2.4	2.5	2.54	2.5	2.504	2.61
75	3	7.2	25	3.34	3.58	3.58	3.56	3.76	3.564	3.05
76	4	4.8	5	1.7	1.18	1.46	1.08	1.48	1.38	1.66
77	4	4.8	10	3.6	3.54	3.8	3.54	3.74	3.644	2.14
78	4	4.8	15	2.74	2.14	2	2.02	2.1	2.2	2.32
79	4	4.8	20	2.84	2.5	3.1	3.26	2.52	2.844	3.52

80	4	4.8	25	5.56	5.6	7.2	5.85	5	5.842	4.76
81	4	5.4	5	1.2	1.06	1.48	1.04	1.22	1.2	1.35
82	4	5.4	10	1.64	1.28	1.08	1.14	1.25	1.278	1.54
83	4	5.4	15	1.6	1.54	2.04	1.64	1.58	1.68	2
84	4	5.4	20	3.54	3.32	3.46	3.48	3.32	3.424	2.76
85	4	5.4	25	4.08	4.58	4.04	4.1	4.64	4.288	3.87
86	4	6	5	1.02	0.96	1.02	0.96	1.28	1.048	0.96
87	4	6	10	1.28	1.3	1.28	1.66	1.2	1.344	1.21
88	4	6	15	2.54	1.98	1.96	1.68	1.66	1.964	2.02
89	4	6	20	3.04	3.82	3.06	3	3.04	3.192	2.98
90	4	6	25	4.56	4.56	4.32	4.5	4.22	4.432	4.25
91	4	6.6	5	0.98	0.96	1.06	0.98	1.02	1	0.98
92	4	6.6	10	1.21	1.12	1.22	1.32	1.2	1.214	1.16
93	4	6.6	15	2.14	2.04	2.08	2.06	2.1	2.084	1.87
94	4	6.6	20	3.46	3.16	3.5	3.32	3.44	3.376	4.32
95	4	6.6	25	3.76	4.04	4.18	1.04	4.06	3.416	4.56
96	4	7.2	5	0.98	1.01	0.97	0.97	0.98	0.982	1.05
97	4	7.2	10	1.16	1.14	1.1	1.32	1.2	1.184	1.12
98	4	7.2	15	1.98	2.14	1.98	2.1	1.97	2.034	1.76
99	4	7.2	20	3.16	3.22	3.22	3.2	3.32	3.224	3.32
100	4	7.2	25	3.76	4.04	4.18	4.12	4.06	4.032	5.45
101	5	4.8	5	1.68	1.4	1.6	1.42	1.62	1.544	1.43
102	5	4.8	10	1.96	2.54	1.92	1.88	2.02	2.064	2.05
103	5	4.8	15	1.86	2.24	2.32	2.16	1.84	2.084	2.33
104	5	4.8	20	3	3.26	3.34	2.78	2.76	3.028	3.98
105	5	4.8	25	3.98	4.38	3.52	4.32	4.34	4.108	4.26
106	5	5.4	5	1.14	0.98	1.18	1.24	1.16	1.14	1.29
107	5	5.4	10	0.9	0.88	0.9	0.96	1.02	0.932	1.13
108	5	5.4	15	1.18	1.48	1.56	1.54	1.57	1.466	1.87
109	5	5.4	20	2.76	2.82	2.22	2.88	2.86	2.708	2.54
110	5	5.4	25	4.48	4.42	4.36	4.76	4.08	4.42	3.92
111	5	6	5	1.02	1.02	1.06	1.14	1.2	1.088	1.01
112	5	6	10	1.52	1.54	1.44	1.42	1.6	1.504	1.36
113	5	6	15	2.18	2.2	1.76	2.04	2.12	2.06	2.54
114	5	6	20	2.8	3.3	3.48	3.6	3.32	3.3	2.88
115	5	6	25	4.7	4.74	4.6	4.46	4.76	4.652	3.89
116	5	6.6	5	0.98	0.97	1.01	0.9	0.97	0.966	1.1
117	5	6.6	10	1.4	0.88	1.12	1.06	1.08	1.108	1.32
118	5	6.6	15	1.76	1.56	1.88	1.97	1.56	1.746	1.96
119	5	6.6	20	3.46	3.22	3.1	2.98	3.36	3.224	2.76
120	5	6.6	25	3.98	4.16	3.98	4.2	4.76	4.216	4.45
121	5	7.2	5	1.06	1.02	0.98	1.02	1.04	1.024	0.98
122	5	7.2	10	1.32	0.98	1.16	1.26	1.33	1.21	1.13

123	5	7.2	15	1.56	1.46	1.48	1.5	1.66	1.532	2.16
124	5	7.2	20	3.18	3.12	3.2	3.12	3.16	3.156	3.44
125	5	7.2	25	4.11	4.16	4.18	4.26	4.2	4.182	4.05



LAMPIRAN 2. DATA HASIL PERHITUNGAN ANALISIS METODE ANOVA

1. Parameter daya dan kecepatan terhadap hasil pemotongan pada 2 pass

	4.8 Watt	5.4 Watt	6 Watt	6.6 Watt	7.2 Watt	Total Baris
5 mm/s	1.764	1.42	1.254	1.616	1.386	7.44
10 mm/s	4.616	1.532	1.988	1.84	2.024	12
15 mm/s	2.68	2.208	2.208	2.1	2.072	11.268
20 mm/s	4.304	4.6	4.104	2.614	2.816	18.438
25 mm/s	11.432	6.372	3.784	3.6	3.288	28.476
Total Kolom	24.796	16.132	13.338	11.77	11.586	77.622

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 54.43	db numer1 r-1= 5-1=4	$s^2B=KTB=$ JKB/r-1= 54.43/4= 13.61	fhitung = KTB/KTG = 54.43/2.07 = 6.59	$\alpha= 5 \%$ db numer1 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Rata-rata kolom	JKK= 24.14	db numer2 k-1= 5-1=4	$s^2K=KTK=$ JKK/k 24.14/4 = 6.04	fhitung = KTK/KTG = 24.14/2.07 = 2.92	$\alpha= 5 \%$ db numer2 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Galat	JKG= 33.05	db denum (r-1)(k-1) = 4x4=16	$s^2G=KTG=$ JKG/(r-1)(k-1)= 33.05/16= 2.07		
total	JKT= 111.62	(r.k)-1= (5x5)-1 = 24			

2. Parameter daya dan kecepatan terhadap hasil pemotongan pada 3 pass

	4.8 Watt	5.4 Watt	6 Watt	6.6 Watt	7.2 Watt	Total Baris
5 mm/s	1.468	1.04	1.446	1.456	1.23	6.64
10 mm/s	3.376	1.24	1.54	1.776	1.352	9.284
15 mm/s	2.368	2.42	1.876	2.304	2.312	11.28
20 mm/s	3.476	3.912	3.452	2.388	2.504	15.732
25 mm/s	6.108	4.836	4.456	3.72	3.564	22.684
Total Kolom	16.796	13.448	12.77	11.644	10.962	65.62

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 31.68	db numer1 r-1= 5-1=4	$s^2_B = KTB =$ JKB/r-1= 31.68/4 = 7.92	fhitung = KTB/KTG = 7.92/0.33 = 24.27	$\alpha = 5\%$ db numer1 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Rata-rata kolom	JKK= 4.12	db numer2 k-1= 5-1=4	$s^2_K = KTK =$ JKK/k 4.12/4 = 1.03	fhitung = KTK/KTG = 1.03/0.33 = 3.15	$\alpha = 5\%$ db numer2 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Galat	JKG= 5.22	db denum (r-1)(k-1) = 4x4=16	$s^2_G = KTG =$ JKG/(r-1)(k-1) = 5.22/16 = 0.33		
total	JKT= 41.01	(r.k)-1= (5x5)-1 = 24			

3. Parameter daya dan kecepatan terhadap hasil pemotongan pada 4 pass

	4.8 Watt	5.4 Watt	6 Watt	6.6 Watt	7.2 Watt	Total Baris
5 mm/s	1.38	1.2	1.048	1	0.982	5.61
10 mm/s	3.644	1.278	1.344	1.214	1.184	8.664
15 mm/s	2.2	1.68	1.964	2.084	2.034	9.962
20 mm/s	2.844	3.424	3.192	3.376	3.224	16.06
25 mm/s	5.842	4.288	4.432	3.416	4.032	22.01
Total Kolom	15.91	11.87	11.98	11.09	11.456	62.306

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 34.35	db numer1 r-1= 5-1=4	$s^2B=KTB=$ JKB/r-1= 34.35/4= 8.59	fhitung = KTB/KTG = 8.59/0.32 = 26.54	$\alpha= 5 \%$ db numer1 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Rata-rata kolom	JKK= 3.07	db numer2 k-1= 5-1=4	$s^2K=KTK=$ JKK/k 3.07/4 = 0.77	fhitung = KTK/KTG = 0.77/0.32 = 2.37	$\alpha= 5 \%$ db numer2 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Galat	JKG= 5.18	db denum (r-1)(k-1) = 4x4=16	$s^2G=KTG=$ JKG/(r-1)(k-1)= 5.18/16= 0.32		
total	JKT= 42.6	(r.k)-1= (5x5)-1 = 24			

4. Parameter daya dan kecepatan terhadap hasil pemotongan pada 5 pass

	4.8 Watt	5.4 Watt	6 Watt	6.6 Watt	7.2 Watt	Total Baris
5 mm/s	1.544	1.14	1.088	0.966	1.024	5.762
10 mm/s	2.064	0.932	1.504	1.108	1.21	6.818
15 mm/s	2.084	1.466	2.06	1.746	1.532	8.888
20 mm/s	3.028	2.708	3.3	3.224	3.156	15.416
25 mm/s	4.108	4.42	4.652	4.216	4.182	21.578
Total Kolom	12.828	10.666	12.604	11.26	11.104	58.462

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 35.68	db numer1 r-1= 5-1=4	$s^2B=KTB=$ JKB/r-1= 35.68/4= 9.82	fhitung = KTB/KTG = 9.82/0.06 = 143.31	$\alpha= 5\%$ db numer1 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Rata-rata kolom	JKK= 0.74	db numer2 k-1= 5-1=4	$s^2K=KTK=$ JKK/k 0.74/4 = 0.18	fhitung = KTK/KTG = 0.18/0.06 = 2.98	$\alpha= 5\%$ db numer2 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Galat	JKG= 0.99	db denum (r-1)(k-1) = 4x4=16	$s^2G=KTG=$ JKG/(r-1)(k-1)= 0.99/16= 0.06		
total	JKT= 37.41	(r.k)-1= (5x5)-1 = 24			

5. Parameter kecepatan pemotongan dan pengulangan pemotongan (*pass*) pada daya 5.4 watt

	5 mm/s	10 mm/s	15 mm/s	20 mm/s	25 mm/s	Total Baris
1	1.552	2.684	2.968	5.71	11.284	24.198
2	1.42	1.532	2.208	4.6	6.372	16.132
3	1.04	1.24	2.42	3.912	4.836	13.448
4	1.2	1.278	1.68	3.424	4.288	11.87
5	1.14	0.932	1.466	2.708	4.42	10.666
Total Kolom	6.352	7.666	10.742	20.354	31.2	76.314

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 23.31	db numer1 r-1= 5-1=4	$s^2B=KTB=$ JKB/r-1= 23.31/4= 5.83	fhitung = KTB/KTG = 5.83/1.25 = 4.67	$\alpha= 5\%$ db numer1 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Rata-rata kolom	JKK= 87.5	db numer2 k-1= 5-1=4	$s^2K=KTK=$ JKK/k 87.5/4 = 21.87	fhitung = KTK/KTG = 21.87/1.25 = 17.53	$\alpha= 5\%$ db numer2 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Galat	JKG= 19.96	db denum (r-1)(k-1) = 4x4=16	$s^2G=KTG=$ JKG/(r-1)(k-1)= 19.96/16= 1.25		
total	JKT= 37.41	(r.k)-1= (5x5)-1 = 24			

6. Parameter kecepatan pemotongan dan pengulangan pemotongan (*pass*) pada daya 6 watt

	5 mm/s	10 mm/s	15 mm/s	20 mm/s	25 mm/s	Total Baris
1	1.344	2.116	2.536	4.76	10.428	21.184
2	1.254	1.988	2.208	4.104	3.784	13.338
3	1.446	1.54	1.876	3.452	4.456	12.77
4	1.048	1.344	1.964	3.192	4.432	11.98
5	1.088	1.504	2.06	3.3	4.652	12.604
Total Kolom	6.18	8.492	10.644	18.808	27.752	71.876

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 11.78	db numer1 r-1= 5-1=4	$s^2B=KTB=$ JKB/r-1= 11.78/4= 2.94	fhitung = KTB/KTG = 2.94/1.31 = 2.25	$\alpha= 5 \%$ db numer1 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Rata-rata kolom	JKK= 62.86	db numer2 k-1= 5-1=4	$s^2K=KTK=$ JKK/k 62.86/4 = 15.71	fhitung = KTK/KTG = 15.71/1.31 = 11.99	$\alpha= 5 \%$ db numer2 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Galat	JKG= 20.96	db denum (r-1)(k-1) = 4x4=16	$s^2G=KTG=$ JKG/(r-1)(k-1)= 20.96/16= 1.31		
total	JKT= 95.6	(r.k)-1= (5x5)-1 = 24			

7. Parameter kecepatan pemotongan dan pengulangan pemotongan (*pass*) pada daya 6.6 watt

	5 mm/s	10 mm/s	15 mm/s	20 mm/s	25 mm/s	Total Baris
1	1.2	1.936	2.084	3.892	4.644	13.756
2	1.616	1.84	2.1	2.614	3.6	11.77
3	1.456	1.776	2.304	2.388	3.72	11.644
4	1	1.214	2.084	3.376	3.416	11.09
5	0.966	1.108	1.746	3.224	4.216	11.26
Total Kolom	6.238	7.874	10.318	15.494	19.596	59.52

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 0.92	db numer1 r-1= 5-1=4	$s^2B=KTB=$ JKB/r-1= 0.92/4= 0.23	fhitung = KTB/KTG = 0.23/0.16 = 1.4	$\alpha= 5\%$ db numer1 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Rata-rata kolom	JKK= 24.58	db numer2 k-1= 5-1=4	$s^2K=KTK=$ JKK/k 24.58/4 = 6.15	fhitung = KTK/KTG = 6.15/0.16 = 37.48	$\alpha= 5\%$ db numer2 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Galat	JKG= 2.62	db denum (r-1)(k-1) = 4x4=16	$s^2G=KTG=$ JKG/(r-1)(k-1)= 2.62/16= 0.16		
total	JKT= 28.13	(r.k)-1= (5x5)-1 = 24			

8. Parameter kecepatan pemotongan dan pengulangan pemotongan (*pass*) pada daya 7.2 watt

	5 mm/s	10 mm/s	15 mm/s	20 mm/s	25 mm/s	Total Baris
1	1.004	1.684	2.02	3.584	3.996	12.288
2	1.386	2.024	2.072	2.816	3.288	11.586
3	1.23	1.352	2.312	2.504	3.564	10.962
4	0.982	1.184	2.034	3.224	4.032	11.456
5	1.024	1.21	1.532	3.156	4.182	11.104
Total Kolom	5.626	7.454	9.97	15.284	19.062	57.396

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 0.21	db numer1 r-1= 5-1=4	$s^2B=KTB=$ JKB/r-1= 0.21/4= 0.05	fhitung = KTB/KTG = 0.05/0.12 = 0.43	$\alpha= 5 \%$ db numer1 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Rata-rata kolom	JKK= 24.94	db numer2 k-1= 5-1=4	$s^2K=KTK=$ JKK/k 24.94/4 = 6.24	fhitung = KTK/KTG = 6.24/0.12 = 50.37	$\alpha= 5 \%$ db numer2 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Galat	JKG= 1.98	db denum (r-1)(k-1) = 4x4=16	$s^2G=KTG=$ JKG/(r-1)(k-1)= 1.98/16= 0.12		
total	JKT= 27.14	(r.k)-1= (5x5)-1 = 24			

9. Parameter pengulangan pemotongan (*pass*) dan daya pada kecepatan 10 mm/s

	1	2	3	4	5	Total Baris
4.8	3.134	4.616	3.376	3.644	2.064	16.834
5.4	2.684	1.532	1.24	1.278	0.932	7.666
6	2.116	1.988	1.54	1.344	1.504	8.492
6.6	1.936	1.84	1.776	1.214	1.108	7.874
7.2	1.684	2.024	1.352	1.184	1.21	7.454
Total Kolom	11.554	12	9.284	8.664	6.818	48.32

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 12.97	db numer1 r-1= 5-1=4	$s^2B=KTB=$ JKB/r-1= 12.97/4= 3.24	fhitung = KTB/KTG = 3.24/0.19 = 16.63	$\alpha= 5 \%$ db numer1 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Rata-rata kolom	JKK= 3.65	db numer2 k-1= 5-1=4	$s^2K=KTK=$ JKK/k 3.65/4 = 0.91	fhitung = KTK/KTG = 0.91/0.19 = 4.68	$\alpha= 5 \%$ db numer2 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Galat	JKG= 3.12	db denum (r-1)(k-1) = 4x4=16	$s^2G=KTG=$ JKG/(r-1)(k-1)= 3.12/16= 0.19		
total	JKT= 19.75	(r.k)-1= (5x5)-1 = 24			

10. Parameter pengulangan pemotongan (*pass*) dan daya pada kecepatan 15 mm/s

	1	2	3	4	5	Total Baris
4.8	3.516	2.68	2.368	2.2	2.084	12.848
5.4	2.968	2.208	2.42	1.68	1.466	10.742
6	2.536	2.208	1.876	1.964	2.06	10.644
6.6	2.084	2.1	2.304	2.084	1.746	10.318
7.2	2.02	2.072	2.312	2.034	1.532	9.97
Total Kolom	13.124	11.268	11.28	9.962	8.888	54.522

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 1.02	db numer1 r-1= 5-1=4	$s^2B=KTB=$ JKB/r-1= 1.02/4= 0.25	fhitung = KTB/KTG = 0.25/0.09 = 2.76	$\alpha= 5 \%$ db numer1 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Rata-rata kolom	JKK= 2.03	db numer2 k-1= 5-1=4	$s^2K=KTK=$ JKK/k 2.03/4 = 0.51	fhitung = KTK/KTG = 0.51/0.09 = 5.5	$\alpha= 5 \%$ db numer2 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Galat	JKG= 1.48	db denum (r-1)(k-1) = 4x4=16	$s^2G=KTG=$ JKG/(r-1)(k-1)= 1.48/16= 0.09		
total	JKT= 4.52	(r.k)-1= (5x5)-1 = 24			

11. Parameter pengulangan pemotongan (*pass*) dan daya pada kecepatan 20 mm/s

	1	2	3	4	5	Total Baris
4.8	6.88	4.304	3.476	2.844	3.028	20.532
5.4	5.71	4.6	3.912	3.424	2.708	20.354
6	4.76	4.104	3.452	3.192	3.3	18.808
6.6	3.892	2.614	2.388	3.376	3.224	15.494
7.2	3.584	2.816	2.504	3.224	3.156	15.284
Total Kolom	24.826	18.438	15.732	16.06	15.416	90.472

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 5.24	db numer1 r-1= 5-1=4	$s^2B=KTB=$ JKB/r-1= 5.24/4= 1.31	fhitung = KTB/KTG = 1.31/0.47 = 2.77	$\alpha= 5\%$ db numer1 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Rata-rata kolom	JKK= 12.47	db numer2 k-1= 5-1=4	$s^2K=KTK=$ JKK/k 12.47/4 = 3.12	fhitung = KTK/KTG = 3.12/0.47 = 6.58	$\alpha= 5\%$ db numer2 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Galat	JKG= 7.58	db denum (r-1)(k-1) = 4x4=16	$s^2G=KTG=$ JKG/(r-1)(k-1)= 7.58/16= 0.47		
total	JKT= 25.29	(r.k)-1= (5x5)-1 = 24			

12. Parameter pengulangan pemotongan (*pass*) dan daya pada kecepatan 10 mm/s

	1	2	3	4	5	Total Baris
4.8	12.564	11.432	6.108	5.842	4.108	40.054
5.4	11.284	6.372	4.836	4.288	4.42	31.2
6	10.428	3.784	4.456	4.432	4.652	27.752
6.6	4.644	3.6	3.72	3.416	4.216	19.596
7.2	3.996	3.288	3.564	4.032	4.182	19.062
Total Kolom	42.916	28.476	22.684	22.01	21.578	137.664

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 61.01	db numer1 r-1= 5-1=4	$s^2_B = KTB =$ JKB/r-1= 0.21/4= 15.25	fhitung = KTB/KTG = 0.05/0.12 = 4.29	$\alpha = 5\%$ db numer1 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Rata-rata kolom	JKK= 65.4	db numer2 k-1= 5-1=4	$s^2_K = KTK =$ JKK/k 24.94/4 = 16.35	fhitung = KTK/KTG = 6.24/0.12 = 4.6	$\alpha = 5\%$ db numer2 = 4 db denum = 16 f tabel = 3.01
Galat	JKG= 56.87	db denum (r-1)(k-1) = 4x4=16	$s^2_G = KTG =$ JKG/(r-1)(k-1) = 1.98/16= 3.55		
total	JKT= 183.28	(r.k)-1= (5x5)-1 = 24			

LAMPIRAN 3. ALGORITMA PERHITUNGAN ANALISIS FRIEDMAN TEST

1. Parameter daya

```
clear all
clc
```

```
% Perhitungan Analisis Friedman Test untuk parameter daya
```

```
%
% 4.8 Watt 5.4 watt 6 watt 6.6 watt 7.2 watt
pass_1 = [
1.96 1.4 1.26 1.2 1.02;
1.88 1.32 1.1 1.3 0.96;
2.04 1.66 1.6 1.4 1.06;
1.76 1.54 1.46 0.9 1;
1.9 1.84 1.3 1.2 0.98;
3.04 2.74 2.1 1.68 1.68;
3.3 2.96 2.16 2.04 1.58;
3.11 2.76 2.2 2.22 1.82;
3.16 2.56 2.02 1.82 1.72;
3.06 2.4 2.1 1.92 1.62;
3.26 3.18 2.4 2.12 1.9;
3.5 2.68 2.54 1.96 1.9;
3.14 3.12 2.66 1.94 2;
3.08 2.82 2.54 2.06 2.1;
4.6 3.04 2.54 2.34 2.2;
5.9 6.65 5.14 3.74 3.68;
6.98 5.38 5.1 3.92 3.22;
6.86 5.16 5 3.84 3.6;
6.8 5.14 5.02 4 3.74;
7.86 6.22 3.54 3.96 3.68;
12.44 11.5 10.12 4.66 4.1;
12.16 11 11.02 5.06 3.44;
12.44 11.2 10.4 4.5 4.18;
12.96 11.51 10.38 4.22 4.5;
12.82 11.21 10.22 4.78 3.76];
```

```
pass_2 = [
1.82 1.46 1.16 1.46 1.56;
1.72 1.42 1.26 1.46 1.23;
1.76 1.36 1.3 1.64 1.32;
1.62 1.46 1.2 1.76 1.5;
1.9 1.4 1.35 1.76 1.32;
5.72 1.52 1.96 1.82 2.02;
4.48 1.78 2 1.9 2.12;
4.46 1.32 2.02 1.54 2.04;
4.32 1.26 1.76 1.82 1.98;
4.1 1.78 2.2 2.12 1.96;
2.54 2.08 2.24 2.06 2.12;
2.86 2.22 2.06 2.24 2.06;
2.42 2.28 2.02 2.1 2.02;
```

	3.06	2.32	2.4	2.32	2.04;
	2.52	2.14	2.32	1.78	2.12;
	4.1	4.66	3.48	2.48	2.88;
	4.34	4.48	4.6	2.32	2.7;
	5.18	4.6	4.48	2.86	2.86;
	4.6	4.66	3.96	2.56	2.94;
	3.3	4.6	4	2.85	2.7;
	11.88	6.46	3.58	3.82	3.32;
	11.84	6.64	3.9	3.74	3;
	11.38	6.1	3.54	3.5	3.16;
	11.6	6.32	3.94	3.94	3.5;
	10.46	6.34	3.96	3	3.46];
pass_3 = [	1.42	0.96	1.4	1.46	0.98;
	1.48	1.02	1.46	1.38	1.23;
	1.58	0.96	1.2	1.44	1.12;
	1.46	1.18	1.72	1.6	1.5;
	1.4	1.08	1.45	1.4	1.32;
	3.6	1.2	1.44	1.66	1.56;
	3.2	1.24	1.52	1.62	1.32;
	2.82	1.24	1.62	1.88	0.98;
	3.88	1.32	1.52	1.84	1.5;
	3.38	1.2	1.6	1.88	1.4;
	2.76	2.58	2.24	2.42	2.46;
	2.2	2.46	1.84	2.2	2.2;
	2.28	2.3	1.84	2.46	2.46;
	2.28	2.44	1.7	2.12	2.12;
	2.32	2.32	1.76	2.32	2.32;
	3.26	3.96	3.5	2.58	2.58;
	4.02	4.08	3.32	2.76	2.4;
	3.58	3.68	3.84	2.1	2.5;
	3.18	3.88	3.46	2	2.54;
	3.34	3.96	3.14	2.5	2.5;
	6.26	4.86	4.48	3.6	3.34;
	6.4	4.72	4.3	3.58	3.58;
	6.1	4.74	4.46	3.58	3.58;
	5.7	4.9	4.34	4.08	3.56;
	6.08	4.96	4.7	3.76	3.76];
pass_4 = [	1.7	1.2	1.02	0.98	0.98;
	1.18	1.06	0.96	0.96	1.01;
	1.46	1.48	1.02	1.06	0.97;
	1.08	1.04	0.96	0.98	0.97;
	1.48	1.22	1.28	1.02	0.98;
	3.6	1.64	1.28	1.21	1.16;
	3.54	1.28	1.3	1.12	1.14;
	3.8	1.08	1.28	1.22	1.1;
	3.54	1.14	1.66	1.32	1.32;
	3.74	1.25	1.2	1.2	1.2;
	2.74	1.6	2.54	2.14	1.98;
	2.14	1.54	1.98	2.04	2.14;
	2	2.04	1.96	2.08	1.98;
	2.02	1.64	1.68	2.06	2.1;
	2.1	1.58	1.66	2.1	1.97;


```

2.84 3.54 3.04 3.46 3.16;
2.5 3.32 3.82 3.16 3.22;
3.1 3.46 3.06 3.5 3.22;
3.26 3.48 3 3.32 3.2;
2.52 3.32 3.04 3.44 3.32;
5.56 4.08 4.56 3.76 3.76;
5.6 4.58 4.56 4.04 4.04;
7.2 4.04 4.32 4.18 4.18;
5.85 4.1 4.5 1.04 4.12;
5 4.64 4.22 4.06 4.06]; "
```

pass_5 = [

```

1.68 1.14 1.02 0.98 1.06;
1.4 0.98 1.02 0.97 1.02;
1.6 1.18 1.06 1.01 0.98;
1.42 1.24 1.14 0.9 1.02;
1.62 1.16 1.2 0.97 1.04;
1.96 0.9 1.52 1.4 1.32;
2.54 0.88 1.54 0.88 0.98;
1.92 0.9 1.44 1.12 1.16;
1.88 0.96 1.42 1.06 1.26;
2.02 1.02 1.6 1.08 1.33;
1.86 1.18 2.18 1.76 1.56;
2.24 1.48 2.2 1.56 1.46;
2.32 1.56 1.76 1.88 1.48;
2.16 1.54 2.04 1.97 1.5;
1.84 1.57 2.12 1.56 1.66;
3 2.76 2.8 3.46 3.18;
3.26 2.82 3.3 3.22 3.12;
3.34 2.22 3.48 3.1 3.2;
2.78 2.88 3.6 2.98 3.12;
2.76 2.86 3.32 3.36 3.16;
3.98 4.48 4.7 3.98 4.11;
4.38 4.42 4.74 4.16 4.16;
3.52 4.36 4.6 3.98 4.18;
4.32 4.76 4.46 4.2 4.26;
4.34 4.08 4.76 4.76 4.2];
```

P1 = friedman(pass_1,5)
P2 = friedman(pass_2,5)
P3 = friedman(pass_3,5)
P4 = friedman(pass_4,5)
P5 = friedman(pass_5,5)

2. Parameter Kecepatan

```
clear all
clc
```

```
%Parameter Kecepatan dan jumlah pengulangan (pass)
% 5 mm/s 10 mm/s 15 mm/s 20 mm/s 25 mm/s
```

Daya_8 = [1.96 3.04 3.26 5.9 12.44;
 1.88 3.3 3.5 6.98 12.16;
 2.04 3.11 3.14 6.86 12.44;
 1.76 3.16 3.08 6.8 12.96;
 1.9 3.06 4.6 7.86 12.82;
 1.82 5.72 2.54 4.1 11.88;
 1.72 4.48 2.86 4.34 11.84;
 1.76 4.46 2.42 5.18 11.38;
 1.62 4.32 3.06 4.6 11.6;
 1.9 4.1 2.52 3.3 10.46;
 1.42 3.6 2.76 3.26 6.26;
 1.48 3.2 2.2 4.02 6.4;
 1.58 2.82 2.28 3.58 6.1;
 1.46 3.88 2.28 3.18 5.7;
 1.4 3.38 2.32 3.34 6.08;
 1.7 3.6 2.74 2.84 5.56;
 1.18 3.54 2.14 2.5 5.6;
 1.46 3.8 2 3.1 7.2;
 1.08 3.54 2.02 3.26 5.85;
 1.48 3.74 2.1 2.52 5;
 1.68 1.96 1.86 3 3.98;
 1.4 2.54 2.24 3.26 4.38;
 1.6 1.92 2.32 3.34 3.52;
 1.42 1.88 2.16 2.78 4.32;
 1.62 2.02 1.84 2.76 4.34];

Daya_9 = [1.4 2.74 3.18 6.65 11.5;
 1.32 2.96 2.68 5.38 11;
 1.66 2.76 3.12 5.16 11.2;
 1.54 2.56 2.82 5.14 11.51;
 1.84 2.4 3.04 6.22 11.21;
 1.46 1.52 2.08 4.66 6.46;
 1.42 1.78 2.22 4.48 6.64;
 1.36 1.32 2.28 4.6 6.1;
 1.46 1.26 2.32 4.66 6.32;
 1.4 1.78 2.14 4.6 6.34;
 0.96 1.2 2.58 3.96 4.86;
 1.02 1.24 2.46 4.08 4.72;
 0.96 1.24 2.3 3.68 4.74;
 1.18 1.32 2.44 3.88 4.9;
 1.08 1.2 2.32 3.96 4.96;
 1.2 1.64 1.6 3.54 4.08;
 1.06 1.28 1.54 3.32 4.58;
 1.48 1.08 2.04 3.46 4.04;
 1.04 1.14 1.64 3.48 4.1;
 1.22 1.25 1.58 3.32 4.64;
 1.14 0.9 1.18 2.76 4.48;
 0.98 0.88 1.48 2.82 4.42;
 1.18 0.9 1.56 2.22 4.36;
 1.24 0.96 1.54 2.88 4.76;
 1.16 1.02 1.57 2.86 4.08];

Daya_10 = [1.26 2.1 2.4 5.14 10.12;
 1.1 2.16 2.54 5.1 11.02;

```

1.6    2.2    2.66   5    10.4;
1.46   2.02   2.54   5.02 10.38;
1.3    2.1    2.54   3.54 10.22;
1.16   1.96   2.24   3.48 3.58;
1.26   2    2.06   4.6   3.9;
1.3    2.02   2.02   4.48 3.54;
1.2    1.76   2.4    3.96 3.94;
1.35   2.2    2.32   4    3.96;
1.4    1.44   2.24   3.5   4.48;
1.46   1.52   1.84   3.32 4.3;
1.2    1.62   1.84   3.84 4.46;
1.72   1.52   1.7    3.46 4.34;
1.45   1.6    1.76   3.14 4.7;
1.02   1.28   2.54   3.04 4.56;
0.96   1.3    1.98   3.82 4.56;
1.02   1.28   1.96   3.06 4.32;
0.96   1.66   1.68   3    4.5;
1.28   1.2    1.66   3.04 4.22;
1.02   1.52   2.18   2.8   4.7;
1.02   1.54   2.2    3.3   4.74;
1.06   1.44   1.76   3.48 4.6;
1.14   1.42   2.04   3.6   4.46;
1.2    1.6    2.12   3.32 4.76];

Daya_11 = [ 1.2    1.68   2.12   3.74 4.66;
            1.3    2.04   1.96   3.92 5.06;
            1.4    2.22   1.94   3.84 4.5;
            0.9    1.82   2.06   4    4.22;
            1.2    1.92   2.34   3.96 4.78;
            1.46   1.82   2.06   2.48 3.82;
            1.46   1.9    2.24   2.32 3.74;
            1.64   1.54   2.1    2.86 3.5;
            1.76   1.82   2.32   2.56 3.94;
            1.76   2.12   1.78   2.85 3;
            1.46   1.66   2.42   2.58 3.6;
            1.38   1.62   2.2    2.76 3.58;
            1.44   1.88   2.46   2.1   3.58;
            1.6    1.84   2.12   2    4.08;
            1.4    1.88   2.32   2.5   3.76;
            0.98   1.21   2.14   3.46 3.76;
            0.96   1.12   2.04   3.16 4.04;
            1.06   1.22   2.08   3.5   4.18;
            0.98   1.32   2.06   3.32 1.04;
            1.02   1.2    2.1    3.44 4.06;
            0.98   1.4    1.76   3.46 3.98;
            0.97   0.88   1.56   3.22 4.16;
            1.01   1.12   1.88   3.1   3.98;
            0.9    1.06   1.97   2.98 4.2;
            0.97   1.08   1.56   3.36 4.76];

Daya_12 = [ 1.02   1.68   1.9    3.68 4.1;
            0.96   1.58   1.9    3.22 3.44;
            1.06   1.82   2    3.6   4.18;
            1    1.72   2.1    3.74 4.5;

```

```

0.98 1.62 2.2 3.68 3.76;
1.56 2.02 2.12 2.88 3.32;
1.23 2.12 2.06 2.7 3;
1.32 2.04 2.02 2.86 3.16;
1.5 1.98 2.04 2.94 3.5;
1.32 1.96 2.12 2.7 3.46;
0.98 1.56 2.46 2.58 3.34;
1.23 1.32 2.2 2.4 3.58;
1.12 0.98 2.46 2.5 3.58;
1.5 1.5 2.12 2.54 3.56;
1.32 1.4 2.32 2.5 3.76;
0.98 1.16 1.98 3.16 3.76;
1.01 1.14 2.14 3.22 4.04;
0.97 1.1 1.98 3.22 4.18;
0.97 1.32 2.1 3.2 4.12;
0.98 1.2 1.97 3.32 4.06;
1.06 1.32 1.56 3.18 4.11;
1.02 0.98 1.46 3.12 4.16;
0.98 1.16 1.48 3.2 4.18;
1.02 1.26 1.5 3.12 4.26;
1.04 1.33 1.66 3.16 4.2];

```

```

P1_Value = friedman(Daya_8,5)
P2_Value = friedman(Daya_9,5)
P3_Value = friedman(Daya_10,5)
P4_Value = friedman(Daya_11,5)
P5_Value = friedman(Daya_12,5)

```

3. Parameter Pengulangan Pemotongan (pass)

```

clear all
clc

```

```

% Parameter pengulangan pemotongan (pass)
% 1 pass 2 pass 3 pass 4 pass 5 pass

```

```

v_5 = [
1.96 1.82 1.42 1.7 1.68;
1.88 1.72 1.48 1.18 1.4;
2.04 1.76 1.58 1.46 1.6;
1.76 1.62 1.46 1.08 1.42;
1.9 1.9 1.4 1.48 1.62;
1.4 1.46 0.96 1.2 1.14;
1.32 1.42 1.02 1.06 0.98;
1.66 1.36 0.96 1.48 1.18;
1.54 1.46 1.18 1.04 1.24;
1.84 1.4 1.08 1.22 1.16;
1.26 1.16 1.4 1.02 1.02;
1.1 1.26 1.46 0.96 1.02;
1.6 1.3 1.2 1.02 1.06;
1.46 1.2 1.72 0.96 1.14;
1.3 1.35 1.45 1.28 1.2;
1.2 1.46 1.46 0.98 0.98;

```

1.3	1.46	1.38	0.96	0.97;
1.4	1.64	1.44	1.06	1.01;
0.9	1.76	1.6	0.98	0.9;
1.2	1.76	1.4	1.02	0.97;
1.02	1.56	0.98	0.98	1.06;
0.96	1.23	1.23	1.01	1.02;
1.06	1.32	1.12	0.97	0.98;
1	1.5	1.5	0.97	1.02;
0.98	1.32	1.32	0.98	1.04];

v_10 = [	3.04	5.72	3.6	3.6	1.96;
	3.3	4.48	3.2	3.54	2.54;
	3.11	4.46	2.82	3.8	1.92;
	3.16	4.32	3.88	3.54	1.88;
	3.06	4.1	3.38	3.74	2.02;
	3.04	5.72	3.6	3.6	1.96;
	3.3	4.48	3.2	3.54	2.54;
	3.11	4.46	2.82	3.8	1.92;
	3.16	4.32	3.88	3.54	1.88;
	3.06	4.1	3.38	3.74	2.02;
	2.1	1.96	1.44	1.28	1.52;
	2.16	2	1.52	1.3	1.54;
	2.2	2.02	1.62	1.28	1.44;
	2.02	1.76	1.52	1.66	1.42;
	2.1	2.2	1.6	1.2	1.6;
	1.68	1.82	1.66	1.21	1.4;
	2.04	1.9	1.62	1.12	0.88;
	2.22	1.54	1.88	1.22	1.12;
	1.82	1.82	1.84	1.32	1.06;
	1.92	2.12	1.88	1.2	1.08;
	1.68	2.02	1.56	1.16	1.32;
	1.58	2.12	1.32	1.14	0.98;
	1.82	2.04	0.98	1.1	1.16;
	1.72	1.98	1.5	1.32	1.26;
	1.62	1.96	1.4	1.2	1.33];

v_15 = [	3.26	2.54	2.76	2.74	1.86;
	3.5	2.86	2.2	2.14	2.24;
	3.14	2.42	2.28	2	2.32;
	3.08	3.06	2.28	2.02	2.16;
	4.6	2.52	2.32	2.1	1.84;
	3.18	2.08	2.58	1.6	1.18;
	2.68	2.22	2.46	1.54	1.48;
	3.12	2.28	2.3	2.04	1.56;
	2.82	2.32	2.44	1.64	1.54;
	3.04	2.14	2.32	1.58	1.57;
	2.4	2.24	2.24	2.54	2.18;
	2.54	2.06	1.84	1.98	2.2;
	2.66	2.02	1.84	1.96	1.76;
	2.54	2.4	1.7	1.68	2.04;
	2.54	2.32	1.76	1.66	2.12;
	2.12	2.06	2.42	2.14	1.76;
	1.96	2.24	2.2	2.04	1.56;
	1.94	2.1	2.46	2.08	1.88;

```

2.06  2.32  2.12  2.06  1.97;
2.34  1.78  2.32  2.1  1.56;
1.9   2.12  2.46  1.98  1.56;
1.9   2.06  2.2   2.14  1.46;
2     2.02  2.46  1.98  1.48;
2.1   2.04  2.12  2.1   1.5;
2.2   2.12  2.32  1.97  1.66];

```

```

v_20 = [
5.9   4.1   3.26  2.84  3;
6.98  4.34  4.02  2.5   3.26;
6.86  5.18  3.58  3.1   3.34;
6.8   4.6   3.18  3.26  2.78;
7.86  3.3   3.34  2.52  2.76;
6.65  4.66  3.96  3.54  2.76;
5.38  4.48  4.08  3.32  2.82;
5.16  4.6   3.68  3.46  2.22;
5.14  4.66  3.88  3.48  2.88;
6.22  4.6   3.96  3.32  2.86;
5.14  3.48  3.5   3.04  2.8;
5.1   4.6   3.32  3.82  3.3;
5     4.48  3.84  3.06  3.48;
5.02  3.96  3.46  3     3.6;
3.54  4     3.14  3.04  3.32;
3.74  2.48  2.58  3.46  3.46;
3.92  2.32  2.76  3.16  3.22;
3.84  2.86  2.1   3.5   3.1;
4     2.56  2     3.32  2.98;
3.96  2.85  2.5   3.44  3.36;
3.68  2.88  2.58  3.16  3.18;
3.22  2.7   2.4   3.22  3.12;
3.6   2.86  2.5   3.22  3.2;
3.74  2.94  2.54  3.2   3.12;
3.68  2.7   2.5   3.32  3.16];

```

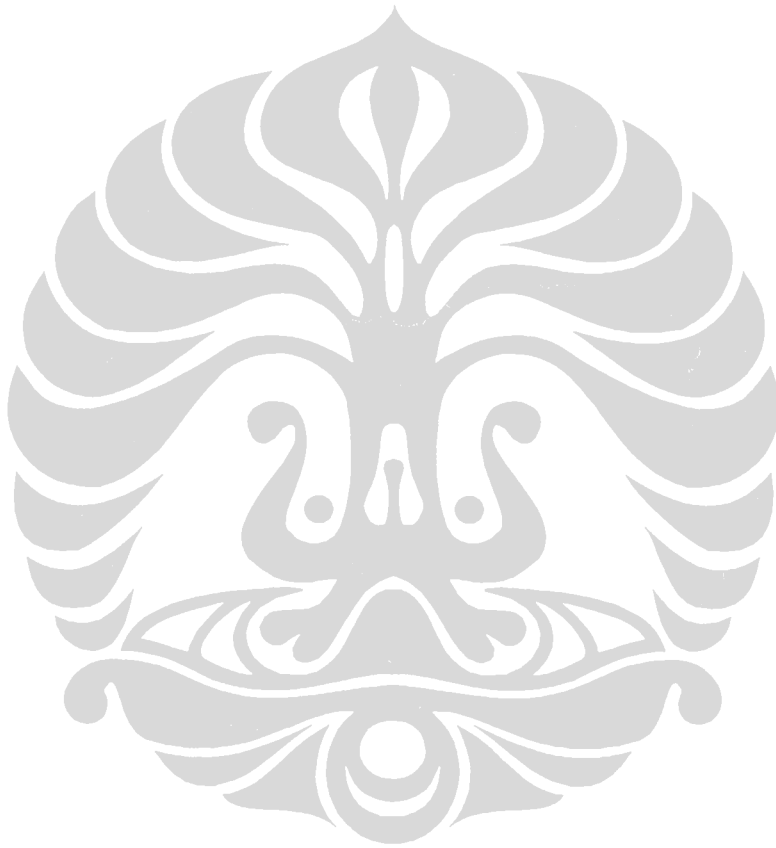
```

v_25 = [
12.44  11.88  6.26  5.56  3.98;
12.16  11.84  6.4   5.6   4.38;
12.44  11.38  6.1   7.2   3.52;
12.96  11.6   5.7   5.85  4.32;
12.82  10.46  6.08  5     4.34;
11.5   6.46  4.86  4.08  4.48;
11     6.64  4.72  4.58  4.42;
11.2   6.1   4.74  4.04  4.36;
11.51  6.32  4.9   4.1   4.76;
11.21  6.34  4.96  4.64  4.08;
10.12  3.58  4.48  4.56  4.7;
11.02  3.9   4.3   4.56  4.74;
10.4   3.54  4.46  4.32  4.6;
10.38  3.94  4.34  4.5   4.46;
10.22  3.96  4.7   4.22  4.76;
4.66  3.82  3.6   3.76  3.98;
5.06  3.74  3.58  4.04  4.16;
4.5   3.5   3.58  4.18  3.98;
4.22  3.94  4.08  1.04  4.2;
4.78  3     3.76  4.06  4.76;

```

4.1	3.32	3.34	3.76	4.11;
3.44	3	3.58	4.04	4.16;
4.18	3.16	3.58	4.18	4.18;
4.5	3.5	3.56	4.12	4.26;
3.76	3.46	3.76	4.06	4.2];

P1 = friedman(v_5,5)
P2 = friedman(v_10,5)
P3 = friedman(v_15,5)
P4 = friedman(v_20,5)
P5 = friedman(v_25,5)



LAMPIRAN 4. ALGORITMA PERHITUNGAN PROSES ANALISIS RESPONSE SURFACE METHODOLOGY (RSM)

```
clear all
close all
clc
```

```
% Response Surface Methodology
% A B C AB AC BC A2 B2 C2
```

```
X = [1 -2 -2 -2 4 4 4 4 4 4;
      1 -2 -2 -1 4 2 2 4 4 1;
      1 -2 -2 0 4 0 0 4 4 0;
      1 -2 -2 1 4 -2 -2 4 4 1;
      1 -2 -2 2 4 -4 -4 4 4 4;
      1 -2 -1 -2 2 4 2 4 1 4;
      1 -2 -1 -1 2 2 -2 4 1 1;
      1 -2 -1 0 2 0 0 4 1 0;
      1 -2 -1 1 2 -2 -1 4 1 1;
      1 -2 -1 2 2 4 -2 4 1 4;
      1 -2 0 -2 0 2 0 4 0 4;
      1 -2 0 -1 0 0 0 4 0 1;
      1 -2 0 0 0 0 0 4 0 0;
      1 -2 0 1 0 -2 0 4 0 1;
      1 -2 0 2 0 -4 0 4 0 4;
      1 -2 1 -2 -2 4 -2 4 1 4;
      1 -2 1 -1 -2 2 -1 4 1 1;
      1 -2 1 0 -2 0 0 4 1 0;
      1 -2 1 1 -2 -2 1 4 1 1;
      1 -2 1 2 -2 -4 2 4 1 4;
      1 -2 2 -2 -4 4 -4 4 4 4;
      1 -2 2 -1 -4 2 -2 4 4 1;
      1 -2 2 0 -4 0 0 4 4 0;
      1 -2 2 1 -4 -2 2 4 4 1;
      1 -2 2 2 -4 4 4 4 4 4;
      1 -1 -2 -2 2 2 4 1 4 4;
      1 -1 -2 -1 2 1 2 1 4 1;
      1 -1 -2 0 2 0 0 1 4 0;
      1 -1 -2 1 2 -1 -2 1 4 1;
      1 -1 -2 2 2 -2 -4 1 4 4;
      1 -1 -1 -2 1 2 2 1 1 4;
      1 -1 -1 -1 1 1 1 1 1 1;
      1 -1 -1 0 1 0 0 1 1 0;
      1 -1 -1 1 1 -1 -1 1 1 1;
      1 -1 -1 2 1 -2 -2 1 1 4;
      1 -1 0 -2 0 2 0 1 0 4;
      1 -1 0 -1 0 1 0 1 0 1;
      1 -1 0 0 0 0 0 1 0 0;
      1 -1 0 1 0 -1 0 1 0 1;
      1 -1 0 2 0 -2 0 1 0 4;
      1 -1 1 -2 -1 2 -2 1 1 4;
```


1-1 1-1-1 1-1 1 1 1;
 1-1 1 0-1 0 0 1 1 0;
 1-1 1 1-1-1 1 1 1 1;
 1-1 1 2-1-2 2 1 1 4;
 1-1 2-2-2 2-4 1 4 4;
 1-1 2-1-2 1-2 1 4 1;
 1-1 2 0-2 0 0 1 4 0;
 1-1 2 1-2-1 2 1 4 1;
 1-1 2 2-2-2 4 1 4 4;
 1 0-2-2 0 0 4 0 4 4;
 1 0-2-1 0 0 2 0 4 1;
 1 0-2 0 0 0 0 4 0;
 1 0-2 1 0 0-2 0 4 1;
 1 0-2 2 0 0-4 0 4 4;
 1 0-1-2 0 0 2 0 1 4;
 1 0-1-1 0 0 1 0 1 1;
 1 0-1 0 0 0 0 1 0;
 1 0-1 1 0 0-1 0 1 1;
 1 0-1 2 0 0-2 0 1 4;
 1 0 0-2 0 0 0 0 4;
 1 0 0-1 0 0 0 0 1;
 1 0 0 0 0 0 0 0;
 1 0 0 1 0 0 0 0 1;
 1 0 0 2 0 0 0 0 4;
 1 0 1-2 0 0-2 0 1 4;
 1 0 1-1 0 0-1 0 1 1;
 1 0 1 0 0 0 0 1 0;
 1 0 1 1 0 0 1 0 1 1;
 1 0 1 2 0 0 2 0 1 4;
 1 0 2-2 0 0-4 0 4 4;
 1 0 2-1 0 0-2 0 4 1;
 1 0 2 0 0 0 0 4 0;
 1 0 2 1 0 0 2 0 4 1;
 1 0 2 2 0 0 4 0 4 4;
 1 1-2-2-2-2 4 1 4 4;
 1 1-2-1-2-1 2 1 4 1;
 1 1-2 0-2 0 0 1 4 0;
 1 1-2 1-2-2-2 1 4 1;
 1 1-2 2-2 2-4 1 4 4;
 1 1-1-2-1-2 2 1 1 4;
 1 1-1-1-1-1 1 1 1 1;
 1 1-1 0-1 0 0 1 1 0;
 1 1-1 1-1 1-1 1 1 1;
 1 1-1 2-1 2-2 1 1 4;
 1 1 0-2 0-2 0 1 0 4;
 1 1 0-1 0-1 0 1 0 1;
 1 1 0 0 0 0 1 0 0;
 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1;
 1 1 0 2 0 2 0 1 0 4;
 1 1 1-2 1-2-2 1 1 4;
 1 1 1-1 1-1-1 1 1 1;
 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0;
 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1;
 1 1 1 2 1 2 2 1 1 4;
 1 1 2-2 2-2-4 1 4 4;

1 1 2 -1 2 -1 -2 1 4 1;
 1 1 2 0 2 0 0 1 4 0;
 1 1 2 1 2 1 2 1 4 1;
 1 1 2 2 2 2 4 1 4 4;
 1 2 -2 -2 -4 -4 4 4 4 4;
 1 2 -2 -1 -4 -2 2 4 4 1;
 1 2 -2 0 -4 0 0 4 4 0;
 1 2 -2 1 -4 2 -2 4 4 1;
 1 2 -2 2 -4 4 -4 4 4 4;
 1 2 -1 -2 -2 -4 2 4 1 4;
 1 2 -1 -1 -2 -2 1 4 1 1;
 1 2 -1 0 -2 0 0 4 1 0;
 1 2 -1 1 -2 2 -1 4 1 1;
 1 2 -1 2 -2 4 -2 4 1 4;
 1 2 0 -2 0 -4 0 4 0 4;
 1 2 0 -1 0 -2 0 4 0 1;
 1 2 0 0 0 0 0 4 0 0;
 1 2 0 1 0 2 0 4 0 1;
 1 2 0 2 0 4 0 4 0 4;
 1 2 1 -2 0 -4 -2 4 1 4;
 1 2 1 -1 2 -2 -1 4 1 1;
 1 2 1 0 2 0 0 4 1 0;
 1 2 1 1 2 2 1 4 1 1;
 1 2 1 2 2 4 2 4 1 4;
 1 2 2 -2 4 -4 -4 4 4 4;
 1 2 2 -1 4 -2 -2 4 4 1;
 1 2 2 0 4 0 0 4 4 0;
 1 2 2 1 4 2 2 4 4 1;
 1 2 2 2 4 4 4 4 4 4];

% parameter Roughness

Y_Ra =

[1.908;3.134;3.516;6.88;12.564;1.552;2.684;2.968;5.71;11.284;1.344;2.116;2.536;4.76;10.428;1.2;1.936;2.084;3.892;4.644;...

1.004;1.684;2.02;3.584;3.996;1.764;4.616;2.68;4.304;11.432;1.42;1.532;2.208;4.6;6.372;1.254;1.988;2.208;4.104;3.784;1.616;...

1.84;2.1;2.614;3.6;1.386;2.024;2.072;2.816;3.288;1.468;3.376;2.368;3.476;6.108;1.04;1.24;2.42;3.912;4.836;1.446;1.54;1.876;...

3.452;4.456;1.456;1.776;2.304;2.388;3.72;1.23;1.352;2.312;2.504;3.564;1.38;3.644;2.2;2.844;5.842;1.2;1.278;1.68;3.424;...

4.288;1.048;1.344;1.964;3.192;4.432;1;1.214;2.084;3.376;3.416;0.982;1.184;2.034;3.224;4.032;1.544;2.064;2.084;3.028;...

4.108;1.14;0.932;1.466;2.708;4.42;1.088;1.504;2.06;3.3;4.652;0.966;1.108;1.746;3.224;4.216;1.024;1.21;1.532;3.156;4.182];

% Persamaan untuk mencari hubungan parameter input dan result

B_Ra = inv(X'*X)*X'*Y_Ra

```
[A,B] = meshgrid(-1.:1:1, -1.:1:1);
Yts = 1.9226 - 0.3865*A - 0.3913*B + 0.2052*A*B + 0.1304 *A.^2 + 0.0888 *B.^2;
surf(A, B, Yts)      %mesh(A, C, Yt)
view(-10,30);
xlabel('Jumlah Pengulangan (pass)');
ylabel('Daya');
zlabel('Roughness');
```

```
[A,C] = meshgrid(-1.:1:1, -1.:1:1);
figure(2)
Yts = 2.9082 - 0.3862*A - 1.0193*C + 0.1326*A*C + 0.1304 *A.^2 + 0.2737 *C.^2;
surf(A, B, Yts)      %mesh(A, C, Yt)
view(-10,30);
xlabel(' Jumlah Pengulangan (pass)');
ylabel('Kecepatan');
zlabel('Roughness');
```

```
[B,C] = meshgrid(-1.:1:1, -1.:1:1);
figure (3)
Yts = 2.9082 - 0.3913*B - 1.0193*C + 0.1887*B*C + 0.2737 *C.^2 + 0.0890 *B.^2;
surf(A, B, Yts)      %mesh(A, C, Yt)
view(-10,30);
xlabel('Daya');
ylabel('Kecepatan');
zlabel('Roughness');
```

