



UNIVERSITAS INDONESIA

**Analisis Proses Pemotongan Dan *Sintering*
Pada Bahan *Polymer* Menggunakan
Laser Diode Daya Rendah**

TESIS

**HERWANDI
0906579456**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TENIK MESIN
DEPOK
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**Analisis Proses Pemotongan Dan *Sintering*
Pada Bahan *Polymer* Menggunakan
Laser Diode Daya Rendah**

TESIS

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Megister
Teknik**

**HERWANDI
0906579456**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TENIK MESIN
KEKHUSUSAN PERANCANGAN TEKNIK DAN
PENGEMBANGAN PRODUK
DEPOK
JUNI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Herwandi
NPM : 0906579456
Tanda Tangan :
Tanggal : 17 Juni 2011



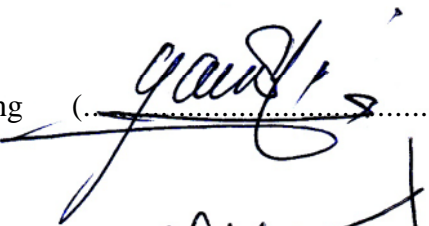
HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Herwandi
NPM : 0906579456
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Tesis : Analisis Proses Pemotongan Dan *Sintering* Pada Bahan *Polymer* Menggunakan Laser Diode 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, ST, MT, MEng ()

Penguji : Dr. Ir. Gandjar Kiswanto, MEng ()

Penguji : Ir. Hengky S. Nugroho, MT ()

Penguji : Dr. Ir. Gatot Prayogo, MEng ()

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 17 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Megister Teknik Program Studi Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Ario Sunar Baskoro, ST, MT, MEng, selaku dosen pembimbing 1 yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
- (2) Dr. Ir. Gandjar Kiswanto, MEng, selaku dosen pembimbing 2 yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
- (3) Pihak civitas akademik Universitas Indonesia yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan;
- (4) Sari Yulianti (Istri), Kasih Aisyah Putri Herwandi (Anak Pertama), Fatih Anugrah Putra Herwandi (Anak Kedua), Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
- (5) Sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 17 Juni 2011

Penulis

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

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

Nama : Herwandi
NPM : 0906579456
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Tesis

demikian 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 Proses Pemotongan Dan Sintering Pada Bahan *Polymer* Menggunakan Laser Diode Daya Rendah"


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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Universitas Indonesia - Depok

Pada tanggal : 17 Juni 2011

Yang menyatakan



(Herwandi)

ABSTRAK

Nama : Herwandi
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Analisis Proses Pemotongan Dan *Sintering* Pada Bahan *Polymer* Menggunakan Laser Diode Daya Rendah.

Penggunaan laser untuk berbagai macam aplikasi dewasa ini sudah banyak digunakan oleh masyarakat. Oleh karena itu, untuk mendapatkan hasil lebih baik dalam pengembangan mesin alat pemotong dan *sintering* pada bahan *polymer* menggunakan laser diode berdaya rendah, perlu dilakukan analisis system pemotongan dan *sinteringnya*, baik secara simulasi maupun eksperimen. Bahan *polymer* yang digunakan adalah *acrylic*. Untuk simulasi proses pemotongan menggunakan program matlab, sedangkan untuk eksperimen digunakan mesin CNC frais sebagai pergerakan. Dari penelitian ternyata parameter seperti kecepatan, *pass*, lintasan dan hembusan udara berpengaruh terhadap kedalaman pemotongan pada proses pemotongan, sedangkan ketebalan produk pada hasil proses *sintering* dipengaruhi parameter seperti kecepatan, tegangan dan arus listrik laser diode dan *layer*.

Kata kunci : laser, pemotongan, *sintering*, simulasi, eksperimen.

ABSTRACT

Name : Herwandi
Study Program : Mechanical Engineering
Title : Analysis of Cutting And Sintering Process of Polymer Materials Using Low Power Laser Diode.

Nowadays the use of laser to various kinds of applications has been applied. Therefore, to obtain better results in the development of a cutting and sintering machine of polymer materials using low power laser, cutting system and sintering should be analyzed, both in simulation and experiment. The polymer materials used in this experiment are acrylic. For the simulation of cutting process, matlab program is used while the experimental process used CNC milling machine as a manipulator. From the research it is shown that parameters such as speed, pass, path and airflow affect the depth of cutting in the process of cutting, while the thickness of the product on the results of the process of sintering have been influenced by parameters such as speed, voltage and electrical current laser diode and layer.

Key words : laser, cutting, sintering, simulation, experimentation.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Penelitian	3
1.6 Sistematika Penelitian	3
2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Laser	5
2.2 Pemotongan Dengan Laser	12
2.3 Sintering dengan laser	16
2.4 Analisis Varian (ANOVA)	18
3. METODE PENELITIAN	24
3.1 Studi Literatur	25
3.2 Pembuatan Penjepit Laser Diode dan Pemegang <i>Nozzle</i> Udara	25
3.3 Pembuatan Rangkaian Kontrol Tegangan dan Arus Listrik Laser Diode	26
3.4 Pengujian Laser Diode	27
3.5 Pembuatan Simulasi <i>Depth of Cutting</i> untuk Proses Pemotongan	28
3.6 Analisis Data	29
4. KARAKTERISTIK MATERIAL BAHAN BAKU	30
4.1 Jenis Material	30
4.2 Metode Pengujian Material	31
4.3 Kondisi Pengujian	34
4.4 Hasil Pengujian	34
5. PEMBAHASAN	36
5.1 Persiapan Benda Kerja dan Laser Diode	36
5.2 Kalibrasi Alat Bantu Pengujian	37
5.3 Proses Pemotongan dan Sintering Benda Kerja dengan Laser Diode	40
5.4 Pengukuran Hasil Pemotongan dan Sintering	42
5.5 Perbandingan Daya Potong Laser Dengan Daya Potong Mesin Bubut	54

5.6	Pembuatan Simulasi Kedalaman Pemotongan	55
5.7	Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen	55
5.8	Analisis Hasil	56
6.	KESIMPULAN DAN SARAN	67
6.1	Kesimpulan	67
6.2	Saran	67

DAFTAR REFERENSI

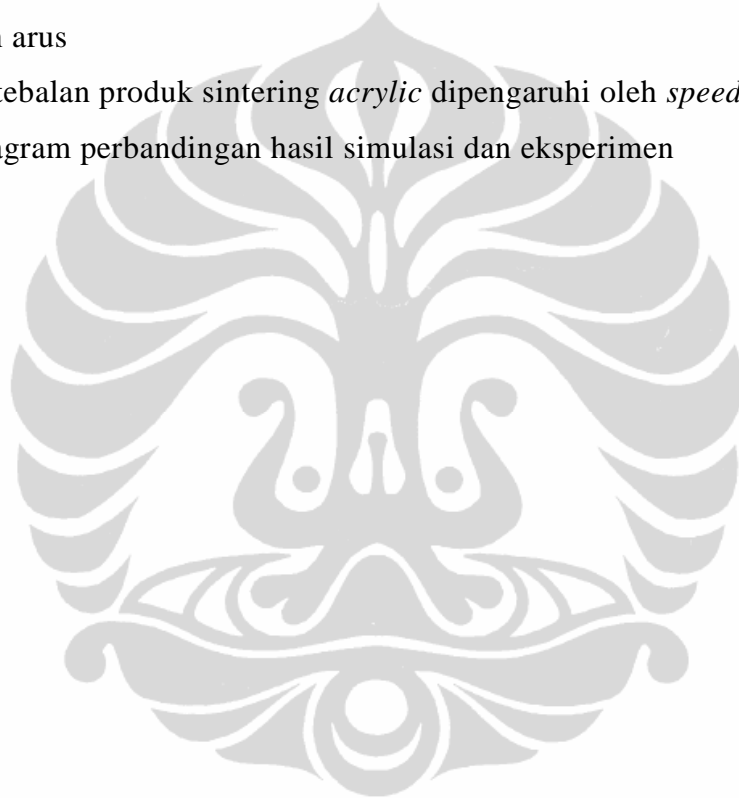
DAFTAR LAMPIRAN



DAFTAR GAMBAR

- Gb 2.1 Laser semikonduktor beserta diagram energinya.
- Gb 2.2 Diagram energi heterojunction.
- Gb 2.3 Mesin laser *cutting* C02 [3]
- Gb 2.4 Posisi *nozzle* dengan benda kerja pada mesin laser *cutting* C02 [3].
- Gb 2.5 Mekanisme mesin laser *cutting* C02 untuk memotong material incoloy 800HT [4].
- Gb 2.6 Mesin *wide* laser *cutting* [10].
- Gb 2.7 Mesin laser *cutter* [10].
- Gb 2.8 Mesin laser *engraver* [10].
- Gb 2.9 Mesin CNC *router* [10].
- Gb 2.10 Proses kerja SLS [11].
- Gb 3.1 Skema Metode penelitian.
- Gb 3.2 Design pemegang laser diode.
- Gb 3.3 Laser Diode 1000 mw.
- Gb 3.4 Rangkaian kontrol tegangan dan arus.
- Gb 3.5 Rangkaian listrik kontrol tegangan dan arus [14].
- Gb 3.6 Proses pemotongan dan *sintering* laser diode pada mesin CNC.
- Gb 3.7 Proses kerja indentifikasi hasil pemotongan dan *sintering*.
- Gb 4.1 Material *acrylic* hitam dan *acrylic* hijau
- Gb 4.2 Skema FTIR
- Gb 4.3 Skema termogram bagi reaksi dekomposisi satu tahap
- Gb 5.1 Benda kerja penelitian untuk proses pemotongan
- Gb 5.2 Benda kerja penelitian untuk proses *sintering*
- Gb 5.3 Pemegang laser diode dan pemegang *nozzle* udara
- Gb 5.4 Uji laser 1 Watt ternyata hanya 0,7369 Watt
- Gb 5.5 Thermocouple dan thermocontrol
- Gb 5.6 Rangkaian kontrol dan multitester
- Gb 5.7 Skema proses pemotongan
- Gb 5.8 Skema proses *sintering*

- Gb 5.9 Mikroskop pengukur kedalaman pemotongan
- Gb 5.10 Kedalaman pemotongan *acrylic* dipengaruhi oleh *speed* , tegangan dan arus
- Gb 5.11 Kedalaman pemotongan *acrylic* dipengaruhi oleh *pass* dan *speed*
- Gb 5.12 Kedalaman pemotongan *acrylic* dipengaruhi oleh lintasan dan *pass*
- Gb 5.13 Kedalaman pemotongan *acrylic* dipengaruhi oleh hembusan udara dan *pass*
- Gb 5.14 Ketebalan produk *sintering acrylic* dipengaruhi oleh *layer*, tegangan dan arus
- Gb 5.15 Ketebalan produk sintering *acrylic* dipengaruhi oleh *speed* dan *layer*
- Gb 5.16 Diagram perbandingan hasil simulasi dan eksperimen



DAFTAR TABEL

- Tabel 2.1 Spesifikasi SLS [2]
- Tabel 2.2 Data ANOVA 1 arah
- Tabel 2.3 ANOVA 1 arah
- Tabel 2.4 Data ANOVA 2 arah tanpa interaksi
- Tabel 2.5 ANOVA 2 arah tanpa interaksi
- Tabel 2.6 Data ANOVA 2 arah dengan interaksi
- Tabel 2.7 ANOVA 2 arah dengan interaksi
- Tabel 3.1 Spesifikasi laser diode 1000 mW
- Tabel 3.2 Spesifikasi benda kerja (material *acrylic*)
- Tabel 4.1 *Properties acrylic*
- Tabel 4.2 Jenis material hasil identifikasi dengan metode FTIR
- Tabel 4.3 Jenis material hasil identifikasi dengan metode TGA
- Tabel 5.1 Hasil uji suhu laser diode dengan thermocouple
- Tabel 5.2 Pengaruh *speed*, tegangan dan arus terhadap kedalaman pemotongan
- Tabel 5.3 Pengaruh *pass* dan *speed* terhadap kedalaman pemotongan
- Tabel 5.4 Pengaruh lintasan dan *pass* terhadap kedalaman pemotongan
- Tabel 5.5 Pengaruh hembusan udara dan *pass* terhadap kedalaman pemotongan
- Tabel 5.6 Pengaruh *layer*, tegangan dan arus terhadap ketebalan produk *sintering acrylic* hitam (*speed* 60 mm/menit)
- Tabel 5.7 Pengaruh *layer*, tegangan dan arus terhadap ketebalan produk *sintering acrylic* hijau (*speed* 60 mm/menit)
- Tabel 5.8 Pengaruh *speed* dan *layer* terhadap ketebalan produk *sintering acrylic* hitam
- Tabel 5.9 Pengaruh *speed* dan *layer* terhadap ketebalan produk *sintering acrylic* hijau
- Tabel 5.10 Data *acrylic* hitam pengaruh kecepatan, tegangan dan arus
- Tabel 5.11 Analisis varian *acrylic* hitam pengaruh kecepatan, tegangan dan arus
- Tabel 5.12 Data *acrylic* hijau pengaruh kecepatan, tegangan dan arus

- Tabel 5.13 Analisis varian *acrylic* hijau pengaruh kecepatan, tegangan dan arus
- Tabel 5.14 Data *acrylic* hitam pengaruh *pass* dan kecepatan
- Tabel 5.15 Analisis varian *acrylic* hitam pengaruh *pass* dan kecepatan
- Tabel 5.16 Data *acrylic* hijau pengaruh *pass* dan kecepatan
- Tabel 5.17 Analisis varian *acrylic* hijau pengaruh *pass* dan kecepatan
- Tabel 5.18 Data *acrylic* hitam pengaruh *pass* dan lintasan
- Tabel 5.19 Analisis varian *acrylic* hitam pengaruh *pass* dan lintasan
- Tabel 5.20 Data *acrylic* hijau pengaruh *pass* dan lintasan
- Tabel 5.21 Analisis varian *acrylic* hijau pengaruh *pass* dan lintasan
- Tabel 5.22 Data *acrylic* hitam pengaruh hembusan udara dan *pass*
- Tabel 5.23 Analisis varian *acrylic* hitam pengaruh hembusan udara dan *pass*
- Tabel 5.24 Hasil analisis varian pada proses pemotongan
- Tabel 5.25 Data *acrylic* hitam pengaruh *layer*, tegangan dan arus
- Tabel 5.26 Analisis varian *acrylic* hitam pengaruh *layer*, tegangan dan arus
- Tabel 5.27 Data *acrylic* hijau pengaruh *layer*, tegangan dan arus
- Tabel 5.28 Analisis varian *acrylic* hijau pengaruh *layer*, tegangan dan arus
- Tabel 5.29 Data *acrylic* hitam pengaruh *speed* dan *layer*
- Tabel 5.30 Analisis varian *acrylic* hitam pengaruh *speed* dan *layer*
- Tabel 5.31 Data *acrylic* hijau pengaruh *speed* dan *layer*
- Tabel 5.32 Analisis varian *acrylic* hijau pengaruh *speed* dan *layer*
- Tabel 5.33 Hasil analisis varian pada proses *sintering*

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan berkembangnya zaman dan kemajuan teknologi, penggunaan laser sudah banyak digunakan oleh masyarakat untuk berbagai macam aplikasi, misalnya aplikasi pemotongan. Contoh aplikasi pemotongan dengan menggunakan laser ini adalah mesin laser *engraving*. Mesin ini merupakan penerapan teknologi laser untuk membuang sebagian dari permukaan bahan sehingga menghasilkan kedalaman yang berbeda [1]. Industri yang menggunakan mesin *engraving* ini adalah industri percetakan. Karena mesin *engraving* ini dipergunakan untuk membuat plakat, tropy dan berbagai hiasan.

Selain untuk aplikasi pemotongan, pemanfaatan laser ini bisa juga untuk aplikasi *sintering*. Maksud proses *sintering* ini adalah suatu proses pemanasan dibawah titik leleh material. *Rapid prototyping* (RP) merupakan salah satu penerapan dari proses *sintering*, dimana teknologinya untuk membuat *prototype* tanpa membutuhkan waktu untuk fabrikasi *tool* (*dies*, *stamps*, dll) yang mahal. Teknologi RP ini sebenarnya terdapat berbagai macam, tetapi yang menggunakan laser sebagai pemanasnya dikenal dengan nama *Selective Laser Sintering* (SLS) [2].

Penerapan laser untuk aplikasi pemotongan dan *sintering* pada bahan *polymer* merupakan teknologi yang banyak dikembangkan, terutama untuk tujuan komersil. Pengembangan mesin laser ini harus disesuaikan dengan jenis bahan *polymer* yang akan dipotong atau *disintering*. Karena setiap bahan *polymer* memiliki sifat yang berbeda-beda ketika menerima panas dari laser, akibatnya kita harus melakukan test laser pada bahan *polymer* tersebut untuk mengetahui sejauh apa bentuk yang akan dihasilkan.

Oleh karena itu, untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dalam pengembangan mesin laser untuk aplikasi pemotongan dan *sintering* pada bahan *polymer*, perlu dilakukan penelitian awal dengan cara membuat simulasi dan melakukan eksperimen. Penelitian akan dilakukan dalam skala laboratorium, sehingga laser yang digunakan adalah laser diode daya rendah. Hasil proses

pemotongan dalam eksperimen ini dianalisis dengan mikroskop dan selanjutnya hasil diolah untuk melihat pengaruh parameter seperti: kecepatan potong, hembusan udara, lintasan, *pass*, tegangan dan arus listrik laser diode terhadap kedalaman pemotongan dalam proses pemotongan. Sedangkan untuk hasil proses *sintering* dalam eksperimen ini diukur dengan jangka sorong dan dianalisis dengan mikroskop, selanjutnya hasil diolah untuk melihat pengaruh parameter seperti: kecepatan langkah *sintering*, *layer*, tegangan dan arus terhadap ketebalan produk yang dihasilkan.

1.2 Perumusan Masalah

Pengembangan laser untuk proses pemotongan dan *sintering* harus disesuaikan dengan jenis bahan *polymer* yang akan dipotong atau *disintering*. Mengingat setiap bahan *polymer* memiliki sifat yang berbeda-beda ketika menerima panas dari laser, selain faktor panas laser, masih banyak faktor lain yang mempengaruhi keberhasilan dari pengembangan mesin yang akan dilakukan. Oleh karena itu, untuk mendapatkan hasil pengembangan laser diode yang lebih optimal dalam proses pemotongan dan *sintering* pada bahan *polymer*, maka perlu dilakukan terlebih dahulu analisis proses pemotongannya, baik secara simulasi maupun eksperimen. Khusus untuk proses *sintering* hanya dilakukan proses eksperimen. Dalam penelitian ini, hasil yang diinginkan adalah untuk melihat pengaruh parameter seperti kecepatan, hembusan udara, lintasan, *pass*, tegangan dan arus listrik laser diode terhadap kedalaman pemotongan pada proses pemotongan, dan parameter seperti kecepatan, tegangan dan arus listrik laser diode, dan *layer* terhadap ketebalan produk yang dihasilkan pada proses *sintering*.

1.3 Tujuan Penelitian

Secara umum tujuan dari penelitian ini adalah untuk membangun kemandirian di bidang keahlian analisis proses pemotongan dan proses *sintering* menggunakan laser diode. Secara khusus, penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh yang ditimbulkan oleh parameter seperti kecepatan, *pass*, lintasan, hembusan udara, tegangan dan arus listrik laser diode terhadap kedalaman pemotongan pada proses

pemotongan dan parameter seperti kecepatan, tegangan dan arus listrik laser diode, dan *layer* terhadap ketebalan produk yang dihasilkan pada proses *sintering*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah 1). Untuk penguasaan teknologi dibidang mesin laser otomatis, 2). Analisis sistem pemotongan dan *sintering* pada bahan *polymer* ini dapat digunakan sebagai referensi pengembangan mesin laser diode yang memiliki tingkat akurasi yang tinggi sehingga dapat dimiliki oleh industri manufaktur di Indonesia.

1.5 Batasan Penelitian

Dalam penelitian ini dilakukan pembatasan permasalahan sehingga tidak meluas terlalu jauh. Batasan masalah yang dibuat mencakup tentang :

- Menggunakan program matlab untuk pembuatan simulasi untuk analisis proses pemotongan;
- Bahan *polymer* yang digunakan untuk proses pemotongan dan *sintering* adalah *acrylic* hitam dan *acrylic* hijau;
- Pergerakan sumbu axis menggunakan mesin CNC frais EMCO yang memiliki gerakan sumbu 3 axis.
- Parameter hasil yang digunakan seperti: kecepatan potong, hembusan udara, Lintasan, *pass*, tegangan dan arus listrik, dan kedalaman *cutting*, khusus untuk analisis pemotongan;
- Sedangkan untuk analisis *sintering*, parameter hasil yang digunakan seperti: kecepatan langkah *sintering*, *layer*, ketebalan produk, tegangan dan arus.

1.6 Sistematika Penelitian

Untuk mendapatkan penulisan yang terstruktur, maka sistematika penulisan tesis ini adalah sebagai berikut : Bab 1 membahas tentang pendahuluan yang melatarbelakangi pengembangan serta tujuan penelitian tesis. Bab 2 membahas tentang teori yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan berupa kajian mengenai laser, laser diode, mesin laser *cutting* CO₂, kedalaman pemotongan pada mesin laser, pemotongan dengan laser dan *sintering* dengan

laser. Bab 3 membahas tentang metodologi dan pelaksanaan penelitian. Bab 4 membahas tentang karakteristik material bahan baku. Bab 5 membahas tentang hasil simulasi dan eksperimen yang dilakukan dengan berbagai variasi kecepatan dari gerakan eretan. Bab 6 menjelaskan tentang kesimpulan dan saran yang diambil setelah proses penelitian.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Laser

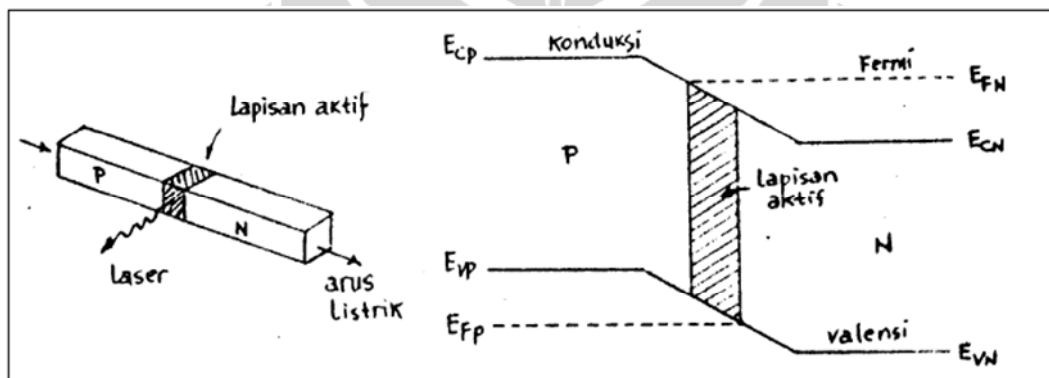
Laser adalah singkatan dari Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, yang berarti penguatan cahaya melalui radiasi yang dirangsang. Ketika suatu atom berada pada tingkat eksitasi, kemudian disinari dengan foton yang sesuai maka elektron pada tingkat tereksitasi ini akan turun ke tingkat energi yang lebih rendah dengan memancarkan foton. Jika cahaya ini mengenai atom lain yang berdekatan, maka akan lebih banyak lagi cahaya yang dilepaskan. Kemudian akan terjadi reaksi berantai terus menerus sehingga atom-atom mengeluarkan cahaya secara bersamaan. Jika cahaya tersebut dipantulkan oleh cermin-cermin khusus, lama kelamaan intensitasnya menjadi lebih tinggi sehingga mampu menembus cermin dan terbentuklah sinar laser [3].

2.1.1 Laser diode atau laser semikonduktor

Laser ini juga disebut laser injeksi, karena pemompaannya dilakukan dengan injeksi arus listrik lewat sambungan PN semikonduktornya. Jadi laser ini tidak lain adalah sebuah diode dengan bias maju biasa. Laser semikonduktor yang pertama diciptakan secara bersamaan oleh tiga kelompok pada tahun 1962. Mereka adalah R.H. Rediker dkk. (Lincoln Lab, MIT), M.I. Nathan dkk. (Yorktown Heights, IBM) dan R.N. Hall dkk. (General Electric Research Lab.). Diode yang digunakan adalah galium arsenida-fosfida GaAsP (sinar-tampak merah).

Proses laser jenis ini mirip dengan kerja LED biasa. Pancaran fotonnya disebabkan oleh bergabungnya kembali elektron dan lubang (hole) di daerah sambungan PN-nya. Bahan semikonduktor yang dipakai harus memiliki gap energi yang langsung, agar dapat melakukan radiasi foton tanpa melanggar hukum kekekalan momentum. Oleh sebab itulah laser semikonduktor tidak pernah menggunakan bahan seperti silikon maupun germanium yang gap energinya tidak langsung. Dibandingkan dengan LED, laser semikonduktor masih mempunyai dua syarat tambahan.

Pertama, bahannya harus diberi doping banyak sekali sehingga tingkat energy Fermi-nya melampaui tingkat energi pita konduksi di bagian N dan masuk ke bawah tingkat energi pita valensi di bagian P. Hal ini perlu agar keadaan inversi populasi di daerah sambungan PN dapat dicapai. Yang kedua, rapat arus listrik maju yang digunakan haruslah besar, begitu besar sehingga melampaui harga ambangnya. Besarnya sekitar 50 ribu ampere/cm² agar laser yang dihasilkan bersifat kontinu. Rapat arus ini luar biasa besar, sehingga diode laser harus ditaruh di dalam kriostat supaya suhunya tetap rendah (77 K), jika tidak arus yang besar ini dapat merusak daerah sambungan PN dan diode berhenti menghasilkan laser.

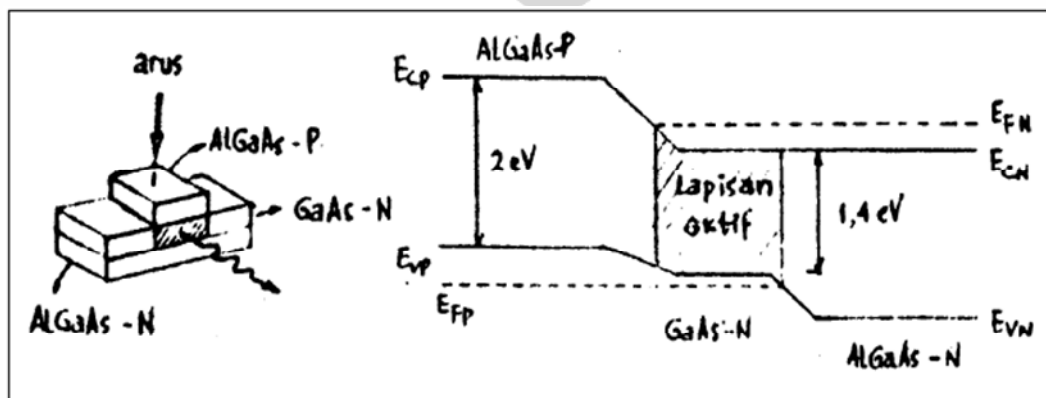


Gb 2.1 Laser semikonduktor beserta diagram energinya

Pada Gb 2.1 tampak bahwa di sebagian daerah deplesi terjadi inversi populasi jika sambungan PN diberi tegangan maju, daerah ini disebut lapisan aktif. Daerah deplesi adalah daerah di sekitar sambungan PN yang tidak memiliki pembawa muatan listrik bebas. Pada saat dilakukan injeksi arus listrik melalui sambungan, elektron-elektron di pita konduksi pada lapisan aktif dapat bergabung kembali dengan lubang-lubang di pita valensi. Untuk arus injeksi yang kecil penggabungan ini terjadi secara acak dan menghasilkan radiasi, proses ini adalah yang terjadi pada LED. Tetapi apabila arus injeksinya cukup besar, pancaran terangsang mulai terjadi di daerah lapisan aktif. Lapisan ini berfungsi pula sebagai rongga resonansi optisnya, sehingga laser akan terjadi sepanjang lapisan ini. Pelapisan seperti yang dilakukan pada cermin di sini tidak diperlukan lagi karena bahan diode sendiri sudah mengkilap (metalik), cukup bagian luarnya digosok

agar dapat memantulkan sinar yang dihasilkan dalam lapisan aktif. Kelemahan sistem laser ini adalah sifatnya yang tidak monokromatik, karena transisi elektron yang terjadi bukanlah antar tingkat energi tapi antar pita energi, padahal pita energi terdiri dari banyak tingkat energi.

Sambungan yang dijelaskan di atas biasa disebut *homojunction*, karena yang dipisahkannya adalah tipe P dan N dari substrat yang sama, yaitu misalnya GaAs tadi. Tipe P GaAs biasanya diberi doping seng (Zn) dan tipe N-nya dengan doping tellurium (Te). Sebenarnya hanya sebagian kecil elektron-elektron yang diinjeksikan dari daerah N yang bergabung dengan lubang di lapisan aktif, kebanyakan dari mereka berdifusi jauh masuk ke dalam daerah P sebelum bergabung kembali dengan lubang-lubang. Efek difusi inilah yang menyebabkan besarnya rapat arus listrik yang dibutuhkan dalam proses kerja laser semikonduktor. Tetapi besarnya rapat arus listrik ini dapat diturunkan dengan cara membatasi gerakan elektron yang diinjeksikan itu disuatu daerah yang sempit, agar mereka tidak berdifusi kemana-mana. Hal ini dapat dilakukan dengan cara membuat sambungan *heterojunction*. Heterjunction yang paling umum dipakai adalah sambungan antara GaAs dan AlGaAs. GaAs memiliki gap energi yang lebih sempit, sehingga bila ia dijepit oleh dua daerah AlGaAs bertipe P dan N, elektron-elektron yang diinjeksikan dari daerah N dan lubang-lubang dari daerah P akan bergabung di GaAs ini, jadi GaAs berfungsi sebagai lapisan aktifnya. Lihat Gb 2.2 di bawah ini.



Gb 2.2 Diagram energi heterojunction

Laser heterojunction GaAs - AlGaAs dapat bekerja secara kontinu pada suhu kamar hanya dengan rapat arus minimum sebesar 100 ampere/cm², 500 kali lebih kecil dibandingkan rapat arus pada laser GaAs yang homojunction.

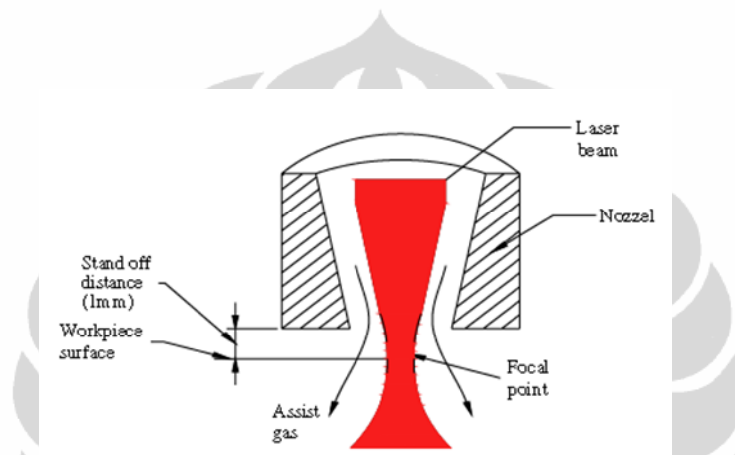
Keunggulan yang dimiliki laser semikonduktor lebih banyak dibandingkan dengan kelemahannya. Yang paling nyata adalah dimensi ukurannya, yaitu hanya sekitar 0,1 x 0,1 x 1,25 mm, sehingga amat cocok untuk peralatan yang dapat dibawa-bawa. Keunggulan lainnya adalah fleksibilitas gap energi bahan-bahan yang dipakai. Lebar gap dapat diatur sesuai dengan kebutuhan, yang berarti orang dapat memilih panjang gelombang laser yang dihasilkannya. Misalnya, substrat indium fosfida (InP) yang dipakai pada laser InGaAsP, laser yang dihasilkan dapat diatur panjang gelombangnya sekitar 1,3 atau 1,55 mikrometer, panjang gelombang dimana gelombang elektromagnetik paling sedikit diserap oleh bahan serat optik. Hal ini membuat laser InGaAsP menjadi pilihan yang tepat untuk komunikasi jarak jauh dengan serat optik [4].

2.1.2 Mesin laser *cutting* CO₂

Mesin laser *cutting* pada Gb 2.3 di bawah ini merupakan mesin laser *cutting* CO₂ dengan gerakan 5 axis yang otomatis untuk memotong material *composite* Kevlar 49. Material ini yang sering digunakan dalam dunia industry, tetapi material ini sangat sulit dipotong dengan menggunakan alat potong tradisional, maka untuk memudahkan pemotongan digunakanlah mesin laser CO₂. Dari hasil pengontrolan parameter laser seperti : laser *power*, *cutting speed*, material *thickness*, dan *Assistance gas pressure*, ternyata dengan melakukan penambahan dan pengurangan terhadap nilai parameter laser tersebut berpengaruh terhadap kualitas hasil pemotongan. Pada Gb 2.4 menunjukkan ukuran penyetulan *nozzle* dengan benda kerja yang akan dipotong pada saat penelitian laser *cutting* CO₂ dilakukan [5].

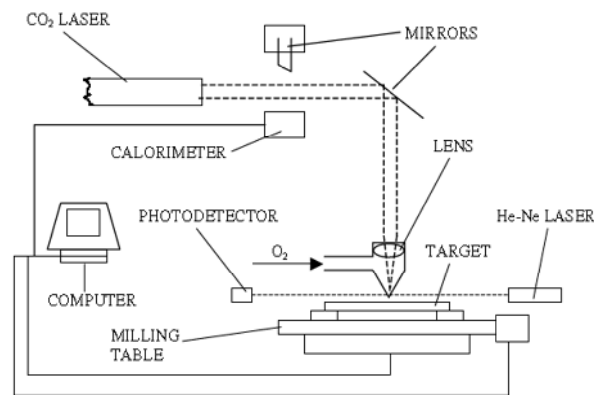


Gb 2.3 Mesin laser *cutting* C02 [5]



Gb 2.4 Posisi *nozzle* dengan benda kerja pada mesin laser *cutting* C02 [5]

Pada Gb 2.5 dibawah ini merupakan gambar mekanisme mesin laser *cutting* C02 untuk memotong material incoloy 800HT. Mesin laser ini mengeluarkan daya sebesar 800 watt untuk memotong benda kerja. Dalam penelitian ini juga diperlihatkan hasil dari proses pemotongan, ternyata dengan melakukan penambahan dan pengurangan terhadap nilai parameter laser seperti kecepatan pemotongan, intensitas laser dan frekuensi pulsa laser berpengaruh terhadap kekasaran permukaan dan tepi potong benda kerja [6].



Gb 2.5 Mekanisme mesin laser *cutting* CO2 untuk memotong material incoloy 800HT [6].

2.1.3 Kedalaman pemotongan pada mesin laser

Kedalaman kawah las (*molten pool*) adalah kedalaman hasil pemotongan yang dilakukan oleh laser terhadap benda kerja yang dipotong. Persamaan untuk menghitung besar kedalaman *molten pool* ini dapat dilihat dari turunan rumus keseimbangan energi.

$$Q_L = Q_C + Q_F$$

Dalam rumus keseimbangan energi ini yang dimaksud dengan Q_L adalah energi laser yang terserap oleh benda kerja, Q_C adalah energi yang membawa energi konduksi dari *molten pool* (daerah atau lokasi terjadinya pemotongan) ke material yang belum mencair atau material padat, sedangkan Q_F adalah energi yang membuat terjadinya *molten pool*. Persamaan Q_L dapat pula dibuat seperti :

$$Q_L = A \cdot P_L \cdot t_i$$

Dimana t_i adalah waktu interaksi laser *beam* dengan permukaan benda kerja, P_L adalah daya laser beam, sedangkan A adalah *absorptivity* laser pada benda kerja. persamaan waktu interaksi laser *beam* (t_i) dapat dilihat di bawah ini:

$$t_i = \frac{d}{v}$$

Variabel d adalah diameter laser beam, v adalah kecepatan lintasan laser. Persamaan Q_C diturun dari persamaan dasar yaitu:

$$Q_C = \rho C_p \int_{V_S} T(x, y, z, t_i) dV_S$$

V_S adalah volume energi di daerah *solid molten pool* dan $T(x, y, z, t_i)$ adalah temperatur dasar pada waktu interaksi laser *beam*. Oleh karena itu energi penghantar di bawah *molten pool* diassumsikan sebagai 1 dimensi (sumbu z saja). Sehingga persamaan $T(x, y, z, t_i)$ menjadi:

$$T(z, t_i) = (T_m - T_0) \operatorname{erfc} \left(\frac{y}{2\sqrt{at_i}} \right) + T_0$$

Nilai $\frac{k}{c_p}$ diperoleh dari persamaan k/c_p adalah *thermal diffusivity* material. Untuk persamaan luas *molten pool* yaitu:

$$S_{sl} = \frac{4}{3} \pi R_m y_m$$

Variabel R_m adalah radius *molten pool*. Jadi persamaan untuk energi yang membawa energi konduksi dari *molten pool* ke material yang belum mencair (Q_C) adalah:

$$Q_C = \frac{4}{3} y_m \pi R_m \rho c_p (T_m - T_0) \int_0^{2\sqrt{kd/v}} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{yv}{2\sqrt{kdv}} \right) + T_0 \right] dz$$

Persamaan untuk energi yang membuat terjadinya *molten pool* (Q_F) terbentuk dari energi fusion per unit material, densitas material dan volume *molten pool*.

$$Q_F = L_f \rho V_l$$

Untuk menghitung volume *molten pool* yaitu:

$$V_l = \frac{\pi y_m R_m^2}{2}$$

Sehingga persamaan energi untuk membuat terjadinya *molten pool* adalah:

$$Q_F = \frac{\pi L_f \rho y_m R_m^2}{2}$$

Dari persamaan yang ada akhirnya diperoleh persamaan kedalaman *molten pool* yaitu:

$$y_m = \frac{AP_L d}{c_p \sqrt{dkv} R_m \rho (C_1 T_0 + C_2 T_m) + \frac{1}{2} \rho R_m^2 v \pi L_f}$$

Bilangan konstanta C_1 dan C_2 adalah:

$$C_1 = \frac{8}{3} [\text{erf}(1) + (e^{-1} - 1) \sqrt{\pi}] \approx 4.07$$

$$C_2 = \frac{8}{3} \beta \pi - C_1 \quad 4.31$$

Dari persamaan kedalaman *molten pool* di atas disederhanakan dengan alasan sebagai berikut:

- Temperatur benda kerja pertama T_0 diabaikan bila dibandingkan dengan temperatur *melting* T_m ($T_m \gg T_0$);
- Energi *fusion* lebih kecil dibandingkan energi total untuk proses ($Q_f \ll Q_L$);
- Diassumsikan diameter *molten pool* sama dengan diameter laser *beam* ($d=2R_m$).

Oleh karena itu, persamaan kedalaman *molten pool* menjadi:

$$y_m = \frac{2 \cdot A \cdot P_L}{\rho \cdot C_p \cdot C_2 \cdot T_m \cdot k \cdot d \cdot v} \quad [7,8]$$

Keterangan :

y_m = Kedalaman *molten pool* (m)

A = *Absorptivity* laser pada benda kerja

P_L = Daya laser (W)

= Berat jenis (kg/m^3)

C_p = Spesifik panas (J/kg. K)

C_2 = faktor koreksi = 4,31

T_m = Suhu leleh (K)

k = Konduktivitas *thermal* (W/m. K)

d = Diameter laser *beam* (m)

v = *Traverse speed* (m/s)

2.2 Pemotongan Dengan Laser

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 [9].

Contoh aplikasi pemotongan dengan laser yang digunakan oleh dunia industri diantaranya adalah:

- Mesin *Wide Laser Cutting*;
- Mesin *Laser Cutter*;
- Mesin *Laser Engraver*;
- Mesin *CNC Router*;
- Dan lain-lain.

2.2.1 Mesin *wide laser cutting*

Mesin pemotong bertenaga laser dengan bentuk *flat bed* dimana material diletakkan diatas meja potong, dan kepala laser akan bergerak untuk memotongnya. Mesin *wide* ini memiliki area potong lebar. Ukuran mesin seri *wide* tersedia mulai dari 1200 mm x 2500 dan lebih lebar. Mesin ini Cocok untuk memotong dan menggrafir beragam artikel seperti kain, kaca, kayu, aklirik, kulit dan oscar (kulit sintetis) [10]. Gambar mesin dapat dilihat pada Gb 2.6 di bawah ini.



Gb 2.6 Mesin *wide laser cutting* [10].

2.2.2 Mesin laser *cutter*

Mesin laser cutter atau disebut juga laser cutting adalah mesin yang didesain untuk memotong material. Mesin ini adalah pengembangan dari mesin laser engraver sehingga mesin laser cutting memiliki semua kelebihan mesin seri LG dan ditambah kemampuan memotong lebih kuat dengan tabung laser yang lebih kuat. Mesin ini memiliki kekuatan laser yang tertinggi dibanding mesin-mesin lain menjadikannya mampu memotong secara cepat dan tepat diberbagai material, seperti kain, acrylic, triplex dan kaca. Mesin ini memiliki dua gigi penggerak yang menyempurnakan potongan sehingga lebih akurat dan tersedia dalam berbagai ukuran area potong mulai 50x80cm - 120 x 100cm. Mesin ini dirancang untuk mengukir dan memotong bermacam macam material untuk industri non logam. Dipadukan dengan software professional dan biaya pengerjaan yang rendah, membuat mesin ini cocok untuk produksi masal di berbagai jenis industri yang memerlukan kualitas tinggi [10]. Gambar mesin dapat dilihat pada Gb 2.7 di bawah ini.



Gb 2.7 Mesin laser *cutter* [10].

2.2.3 Mesin laser *Engraver*

Laser engraver adalah mesin yang tampak serupa dengan laser cutter. Mesin ini memiliki semua fleksibilitas laser cutter, namun kekuatan memotongnya lebih rendah, sehingga mesin ini lebih cocok untuk membuat grafir, walaupun sebetulnya mesin ini juga dapat memotong secara cepat dan akurat. Keistimewaan mesin ini dibanding laser cutting adalah mesin ini menggunakan daya listrik yang lebih rendah dan biaya investasi yang lebih rendah, sehingga pengoperasiannya lebih ekonomis. Jenis mesin ini adalah LG 900 dan LG 1200 yang memiliki ukuran sedang. Didesain khusus untuk bekerja dalam pengukiran dan pemotongan produksi masal yang membutuhkan ketelitian extra, kerapian

lebih dan kecepatan tinggi. Mesin ini merupakan perkembangan dan kombinasi antara teknologi mesin modern dan computer [10]. Gambar mesin dapat dilihat pada Gb 2.8 di bawah ini.



Gb 2.8 Mesin laser *engraver* [10].

2.2.4 Mesin CNC Router

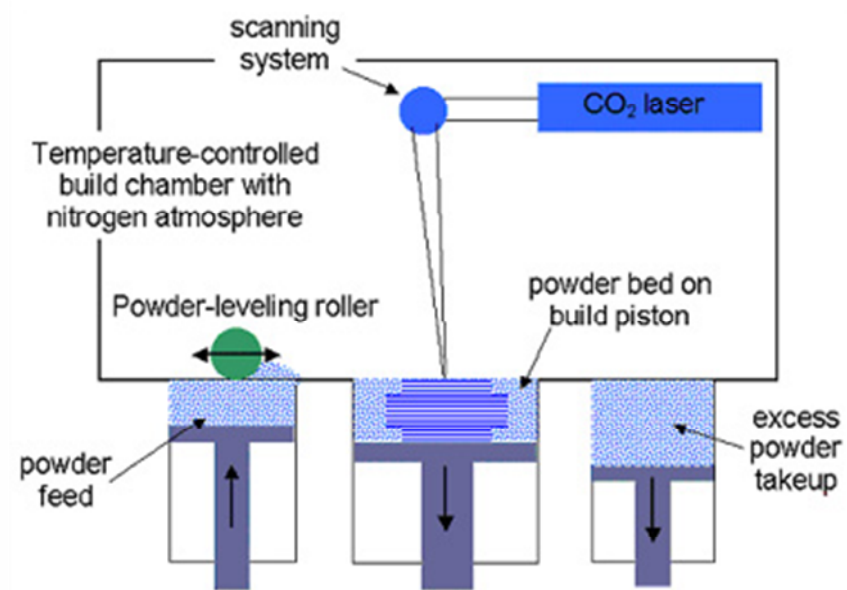
CNC Router adalah mesin pemotong dan pengukir yang dilengkapi dengan system DSP (digital signal processing) yang memungkinkan pengoperasian otomatis dengan komputer. Pengoperasian manual juga dapat dilakukan dan didukung dengan dengan layar monitor yang lebar yang dirancang sesuai ergonomic manusia. Mesin ini dibuat dengan teknologi dari Jerman yang memiliki ketelitian dan kualitas tinggi. Terlebih bahan, kerangka, meja serta suku cadang yang berkualitas tinggi membuat mesin menjadi lebih awet, tahan lama serta memiliki ketelitian pengerjaan yang maksimal. Mesin ini disediakan dalam beragam ukuran CNC router mulai dari 600 x 900 mm sampai 1200 x 2500 mm. Mesin ini sangat cocok untuk industri kayu, ukiran, mebel dan bahkan dapat digunakan untuk industri berat seperti industri baja, karoseri mobil, industri logam, dan konstruksi bangunan [10]. Gambar mesin dapat dilihat pada Gb 2.9 di bawah ini.



Gb 2.9 Mesin CNC *router* [10].

2.3 *Sintering Dengan Laser*

Sintering adalah proses pemanasan material dengan suhu dibawah titik leleh material. Aplikasi dari proses sintering ini adalah rapid prototyping yang merupakan sebuah sistem teknologi yang bertujuan memproduksi prototipe secara langsung dan cepat dari sebuah data tiga dimensi dari CAD (Computer Aided Design). Proses kerja rapid prototyping menggunakan suhu untuk melakukan pemanasan pada sebuah material sehingga material tersebut menjadi lunak dan mudah dibentuk sesuai dengan keinginan. Salah satu teknologi rapid prototyping yang digunakan adalah Selective Laser Sintering (SLS). Selective Laser Sintering (SLS) pertama dikembangkan oleh Carl Deckard di University of Texas pada tahun 1989. Konsep dasar dari SLS dengan menggunakan tembakan sinar laser yang bergerak untuk membentuk layer pada material bahan baku sehingga terbentuk benda tiga dimensi. Seperti metode rapid prototyping lainnya, part dibuat di atas sebuah platform dimana platform tersebut dapat bergerak untuk menyesuaikan pembentukan layer per layer sesuai kepresisian gerak platform tersebut. SLS menggunakan material bubuk yang jenisnya lebih beragam seperti thermoplastik, elastomer dan komposit. SLS tidak membutuhkan material pendukung untuk menopang struktur yang dibentuk karena tiap layer yang dibuat merupakan pendukung pembentuk struktur pada saat dibuat. Seperti Gb 2.10 di bawah ini, prinsip kerja SLS ini adalah dengan cara laser ditembakkan melalui lensa dan dibiaskan oleh cermin yang bergerak mengarahkan sinar pada aksis x-y sesuai kontrol dan 3D CAD yang diinginkan. Build piston bergerak ke bawah membentuk layer per layer. Material berupa bubuk diumpun dari powder feed piston disamping dengan bantuan roller yang bergerak melintasi build piston bolak-balik selama proses. Powder piston bergerak ke atas sedangkan build piston bergerak ke bawah sesuai level layer yang dibentuk setelah layer pertama terbentuk dan begitu seterusnya [2].



Gb 2.10 Proses kerja SLS [11]

Spesifikasi dari Selective Laser Sintering (SLS) ini dapat dilihat pada tabel 2.1 di bawah ini [2].

Tabel 2.1 Spesifikasi SLS [2]

Abbreviation	SLS
Material type	Powder (Polymer)
Material	Thermoplastics such as nylon, polyamide, and polystyrene, elastomer, composite
Max part size	22 x 22 x 30 in
Min feature size	0.005 in
Min layer thickness	0.004 in
Tolerance	0.01 in
Surface finish	Average
Build speed	Fast
Applications	Form/fit testing, functional testing, rapid tooling patterns, less detailed parts, parts with snap-fits & living hinges, high heat applications

2.4 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 [12].

Pemilihan type ANOVA tergantung dari rancangan percobaan yang kita pilih.

A. 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 2.2 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 [13].

Tabel 2.3 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	= 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

B. 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 [13].

Tabel 2.4 Data 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 2.5 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	= db numer1 = db denum = F tabel =
Rata-rata Kolom	JKK	db numer2 = k-1	$s^2K = KTK = JKK/k-1$	F hitung = KTK/KTG	= 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

C. 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 [13].

Tabel 2.6 Data ANOVA 2 arah dengan interaksi

metode kel.umur	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 2.7 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	= db numer1 = db denum = F tabel =
Nilai tengah Kolom	JKK	db numer2 = k-1	$s^2K = KTK = JKK/k-1$	F hitung = KTK/KTG	= 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 = KT[BK]/KTG	= db numer 3= 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			

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

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

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

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

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

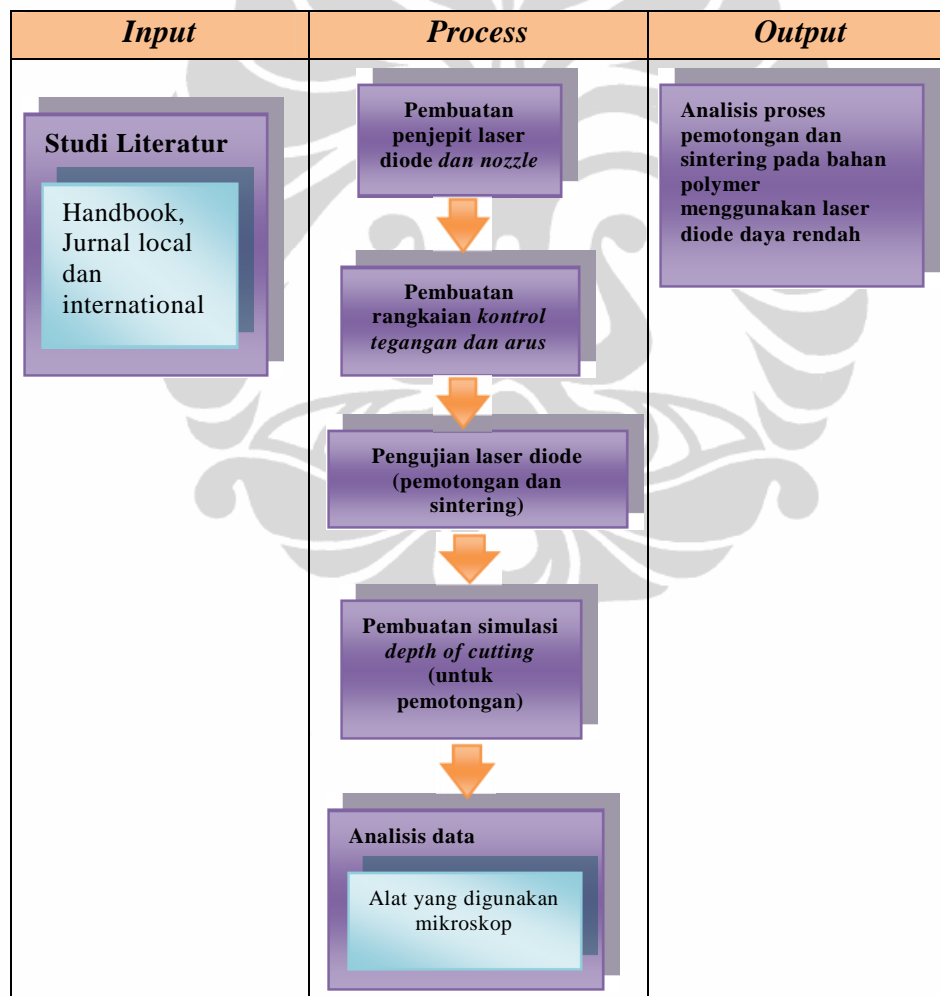
Perhatikan : Sebagian Notasi dalam JKT, JKB dan JKK digunakan dalam perhitungan JK[BK].

Keterangan :

- r : banyaknya baris $i = 1, 2, 3, \dots, r$
 k : banyaknya kolom $j = 1, 2, 3, \dots, k$
 n : banyaknya ulangan $m = 1, 2, 3, \dots, m$
 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

Untuk proses penelitian “Analisis proses pemotongan dan *sintering* pada bahan *polymer* menggunakan laser diode daya rendah”, kegiatan yang dilakukan yaitu : Studi literatur, pembuatan penjepit laser diode dan pemegang *nozzle* udara, pembuatan rangkaian kontrol tegangan dan arus listrik untuk laser diode, pengujian laser diode (proses pemotongan dan *sintering*), pembuatan simulasi untuk proses pemotongan, dan analisa data. Skema metode penelitian dapat dilihat pada Gb 3.1 dibawah ini.



Gb 3.1 Skema Metode penelitian

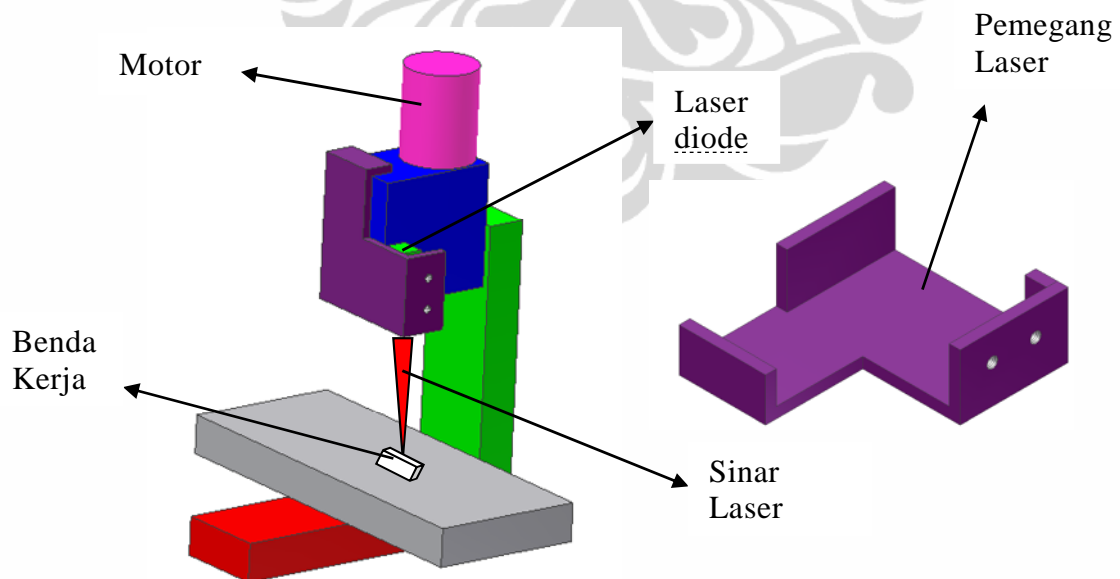
3.1 Studi Literatur

Melakukan pengumpulan literatur tambahan yang berhubungan dengan tema penelitian termasuk pada handbook, jurnal-jurnal local dan internasional seperti : Literatur Departemen Pendidikan Nasional, Seminar Intern FT-Ubaya, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *lasers in engineering*, *Jurnal University of Manchester Institute of Science and Technology*, *journal of materials science*, *Artikel Ilmu Komputer*, *Skripsi-UI*, dan *Artikel Internet*.

3.2 Pembuatan Penjepit Laser diode dan Pemegang *Nozzle* Udara

Membuat desain dan memproduksi konstruksi penjepit laser diode dan pemegang *nozzle* udara (gambar konsep konstruksi dapat dilihat pada Gb 3.2) yang terdiri dari:

- Plate penjepit laser diode yang terbuat dari bahan *acrylic* bening.
- Terdapat dua buah baut, sedangkan mur dilem pada *plate acrylic* yang berfungsi sebagai pasangan ulir baut.
- Pada *plate acrylic* juga dibuat dua buah lubang berulir untuk mengikat pemegang *nozzle* udara.
- Pemegang *nozzle* udara dipegang oleh *plate* besi yang diikat pada *plate acrylic*.



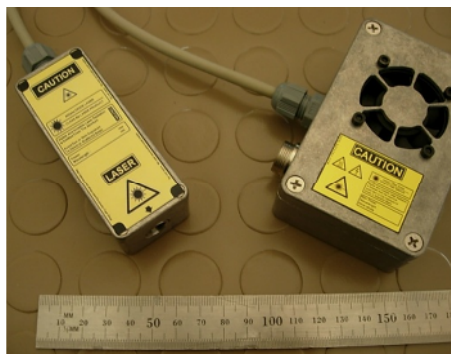
Gb 3.2 Design pemegang laser diode

3.3 Pembuatan Rangkaian Kontrol Tegangan dan Arus Listrik Laser Diode

Membuat perangkat kontrol tegangan dan arus listrik untuk mengendalikan kemampuan laser diode dalam proses pemotongan material. Rangkaian kontrol tegangan dan arus ini (Gb 3.4 Rangkaian kontrol dan Gb 3.5 Rangkaian listrik kontrol) mengacu pada pemakaian tegangan dan arus yang ada pada laser diode (Gb 3.3 laser diode 1000mw). Spesifikasi laser diode yang digunakan dapat dilihat pada tabel 3.1 dibawah ini.

Tabel 3.1 Spesifikasi laser diode 1000 mW

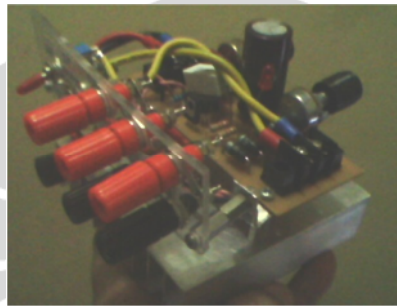
Peak Wavelength (nm)	808
CW output power (mW)	1000
Operation Mode	CW
Power Stability	$\pm 10\%$ rms, 2 minutes
Spectral Line width	<8nm
Wavelength temperature coefficient (nm/)	0.3
Emitting area (μ m)	50 x 1
Beam divergence \times	(deg.) 45/50
Slope efficiency (W/A)	1
Operating voltage (V)	2.2-3.1
Threshold current (mA)	400
Operating current (mA)	1300
Serial resistance (-)	---
Power Supply Needed	12 – 15 volts DC
Cooling Mode	Aluminum Heat Sink
Expected Lifetime	over 5000hours



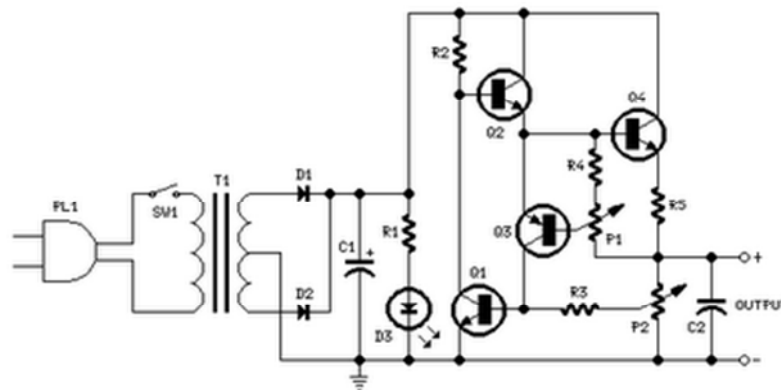
Gb 3.3 Laser Diode 1000 mw

Komponen rangkaian yang dipersiapkan diantaranya adalah :

- 2 buah Potensiometer (B1K dan B10K),
- 1 buah Kondensator elektrolit (35 v, 3300 μ F);
- 1 buah resistor 5 W 1 J;
- 4 buah resistor, 3 buah transistor, 1 buah transistor 2N3055.
- 4 buah dioda, 1 buah kondensator mika, 2 buah terminal kabel;
- 6 buah terminal untuk tegangan, arus dan laser;
- 1 buah jack input, 1 buah saklar, 1 buah headsink, Kabel, baut dan mur.



Gb 3.4 Rangkaian kontrol tegangan dan arus



Gb 3.5 Rangkaian listrik kontrol tegangan dan arus [14].

3.4 Pengujian Laser Diode

Proses pengujian laser diode dengan bantuan mesin CNC (lihat pada Gb 3.6 Proses pemotongan dan *sintering* laser diode pada mesin CNC) yang ada di laboratorium manufaktur departemen teknik mesin Universitas Indonesia. Mesin CNC ini memiliki gerakan 3 axis, sehingga sangat cocok digunakan untuk berbagai gerakan dan yang utama dapat bergerak otomatis.



Gb 3.6 Proses pemotongan dan *sintering* laser diode pada mesin CNC

Data-data pengujian laser diode yang dilakukan diantaranya adalah sebagai berikut :

Untuk system pemotongan.

- Bahan-bahan uji yang digunakan adalah *acrylic* hitam dan *acrylic* hijau.
- Ada beberapa besar *speed* yang digunakan, yaitu : 10,20,30,40 dan 50 mm/menit.
- Terdapat 3 lintasan yang dilakukan, yaitu : 1, 2 dan 3 lintasan.
- Jumlah *pass* yang dilakukan adalah 1 *pass*, 3 *pass* dan 5 *pass*.

Untuk system sintering.

- Bahan-bahan uji yang digunakan: serbuk *acrylic* hitam dan *acrylic* hijau.
- Besar *speed* yang digunakan, yaitu : 50, 60, 70 dan 80 mm/menit.
- Lintasan yang dilakukan, yaitu : 50 lintasan.
- Jumlah *layer* yang dilakukan adalah 1 *layer*, 2 *layer* dan 3 *layer*.
- Tegangan dan arus listriknya adalah 13.9 V dan 1.1 A, 11.8 V dan 1.04 A, 10.3 V dan 0.87 A, dan 9.7 V dan 0.79 A.

3.5 Pembuatan Simulasi *Depth of cutting* untuk Proses pemotongan

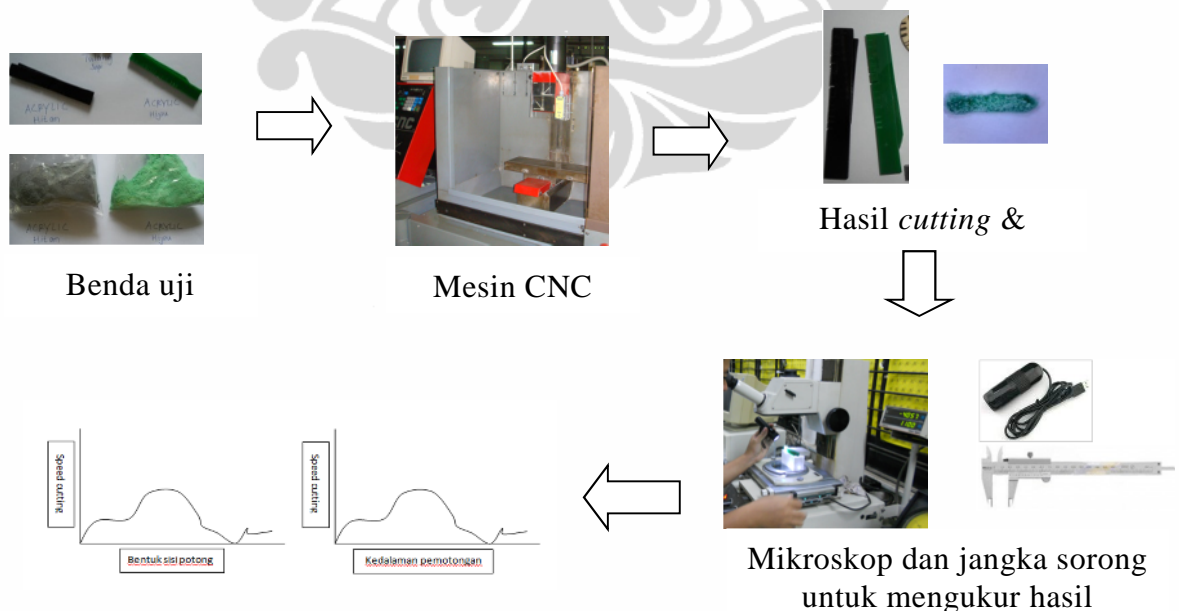
Pembuatan simulasi *depth of cutting* atau kedalaman penetrasi laser diode menggunakan program matlab. Simulasi ini dibuat untuk analisis proses pemotongan saja, sedangkan proses *sintering* tidak dibuat simulasinya. Proses pembuatannya mengacu pada literatur-literatur yang sudah ada. Misalnya jurnal simulasi las, jurnal ini bisa digunakan sebagai referensi untuk proses pembuatannya, atau bisa juga literatur dari laser diode itu sendiri. Dalam pembuatan simulasi ini, parameter laser diode sudah harus ada (lihat pada tabel 3.1 parameter laser diode) dan spesifikasi dari benda kerja (*acrylic*) yang akan digunakan untuk proses pemotongan oleh laser diode sudah harus tersedia (spesifikasi benda kerja (material *acrylic*) dapat dilihat pada tabel 3.2).

Tabel 3.2 Spesifikasi benda kerja (material *acrylic*)

Parameter	Nilai	Keterangan
Refraction (n)	1.5025	Literatur [15]
Extinction (k)	0	Literatur [15]
Density (Kg/m ³)	1190	Literatur [16]
Specific Heat (J/kg.K)	5.344	Literatur [16]
Thermal Conductivity (W/m. K)	0.000729	Literatur [17]
Factor Correction (C2)	4.31	Literatur [7]
Temperatur Cair (K)	1103.15	Literatur [18]
Diameter beam (m)	0.002	Laser diode
Traverse speed (m/s)	0.0016	Speed eretan CNC frais

3.6 Analisis Data

Hasil pengujian selanjutnya dikumpulkan untuk dianalisis (proses kerja indentifikasi hasil pemotongan dan *sintering* laser diode dapat dilihat pada Gb 3.7). Proses ini dilakukan untuk melihat kinerja program kemampuan laser diode dalam melakukan proses pemotongan dan *sintering*. Bila hasil yang dikumpulkan tidak sesuai dengan bentuk dan ukuran yang diinginkan, maka proses diulang kembali ke tahap pembuatan program. Proses analisis menggunakan mikroskop untuk mengukur kedalaman potong dan jangka sorong untuk ketebalan produk *sintering*.

Gb 3.7 Proses kerja indentifikasi hasil pemotongan dan *sintering*

BAB IV KARAKTERISTIK MATERIAL BAHAN BAKU

Proses analisis system pemotongan dan sintering menggunakan beberapa material, diantaranya adalah *acrylic* hitam dan *acrylic* hijau. Penggunaan material *acrylic* hitam dan *acrylic* hijau ini karena tidak membahayakan bila dibandingkan dengan material pvc. Material *acrylic* ini mudah diperoleh di pasar dan harganya relatif murah.

4.1 Jenis Material

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 4.1 dan gambar *acrylic* pada Gb 4.1 di bawah ini.

Tabel 4.1 *Properties acrylic*

Mechanical Properties		
Properties	Value	Unit
Young Modulus	3.2	Gpa
Tensile strength	35-62	Mpa
Elongation	5-70	%
Compressive strength	28-97	Mpa
Yield strength	48-97	Mpa
Physical Properties		
Properties	Value	Unit
Thermal expansion	48-80	$e-6/^{\circ}C$
Thermal conductivity	0.000729	$W/m.^{\circ}K$
Specific heat	5.344	$J/kg.^{\circ}K$
Melting temperature	1103.15	K
Density	1190	Kg/m^3
Acrylic hitam	795-1000	nm
Acrylic hijau	492-577	nm



Gb 4.1 Material *acrylic* hitam dan *acrylic* hijau

4.2 Metode Pengujian Material

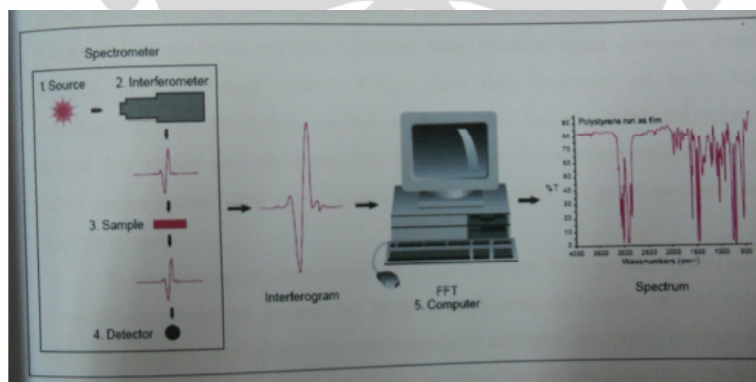
Untuk mendapat kepastian dari properties material yang diperoleh di pasar seperti *acrylic* hitam dan *acrylic* hijau, maka perlu dilakukan pengujian. Pengujian dilakukan di laboratorium Sentra Teknologi Polimer (STP) yang terletak di kawasan BPPT-PUSPIPTEK, Serpong. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui komposisi dari material tersebut dan berapa prosentase masing-masing komposisinya. Selain itu juga dilakukan identifikasi terhadap material untuk mengetahui apakah material yang sudah didapat di pasaran sesuai dengan namanya atau tidak. Proses pengujian dilakukan dengan dua macam metode, yaitu: FTIR (Fourier Transform Infra Red) dan TGA (Thermogravimetric Analysis).

4.2.1 FTIR (Fourier Transform Infra Red)

FTIR merupakan salah satu jenis spektrofotometer yang menggunakan infra merah. Spektrofotometer sendiri merupakan alat yang terdiri dari spectrometer dan fotometer. Spektrometer menghasilkan sinar dari spectra dengan panjang gelombang tertentu dan fotometer adalah alat pengukur intensitas cahaya yang ditransmisikan atau yang diserap. Belakangan ini telah berkembang metode spektroskopi untuk menentukan komposisi kimiawi dari suatu senyawa organik. Spektroskopi adalah suatu metode untuk mengamati interaksi molekul dengan radiasi elektromagnetik. Dengan metode spektroskopi, penentuan struktur dan identifikasi senyawa organik baik yang sederhana maupun yang kompleks dari suatu bahan dapat ditentukan secara cepat. Ada bermacam-macam metode

spektroskopi mulai dari spektroskopi cahaya tampak, UV, Raman, inframerah dan lain sebagainya. Metode-metode tersebut memiliki bagian utama berupa perangkat optic, spectrometer atau monokromator yang memiliki daerah kerja pada panjang gelombang sekitar 350 – 700 nm.

Spektra yang dihasilkan dari spektroskopi adalah unik, atau spectra dari senyawa organik dari suatu bahan memiliki bentuk yang berbeda dengan senyawa organik yang lain. Penggunaan spektroskopi inframerah pada bidang kimia organik menggunakan bilangan gelombang dari $650 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ atau pada panjang gelombang 2,5 – 15,4 mm, dengan metode yang meliputi teknik serapan, teknik emisi dan teknik fluoresensi. Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dari spektroskopi inframerah, digunakan spektroskopi inframerah transformasi fourier (FTIR). Pada dasarnya spektroskopi FTIR adalah sama dengan spektroskopi inframerah, yang membedakan ialah pengembangan pada system optiknya. Spektroskopi FTIR memiliki banyak keunggulan dibandingkan spektroskopi inframerah, diantaranya yaitu lebih cepat karena pengukuran dilakukan secara serentak, serta mekanik optic lebih sederhana dengan sedikit komponen yang bergerak. Dasar dari FTIR ini berasal dari persamaan gelombang yang dirumuskan oleh Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) seorang ahli matematika dari Perancis.



Gb 4.2 Skema FTIR

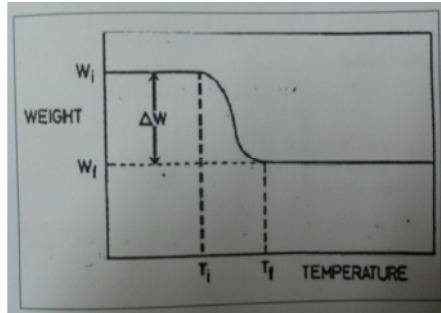
Sistem optic spektrofotometer FTIR seperti Gb 4.2 dilengkapi dengan cermin yang bergerak tegak lurus dan cermin yang diam. Dengan demikian radiasi inframerah akan menimbulkan perbedaan jarak yang ditempuh menuju cermin

yang bergerak (M) dan jarak cermin yang diam (F). Perbedaan jarak tempuh radiasi tersebut adalah 2 , yang selanjutnya disebut sebagai retardasi (δ). Hubungan antara intensitas radiasi IR yang diterima detector terhadap retardasi disebut sebagai interferogram. Sedangkan system optic dari spektrofotometer infra red yang didasarkan atas bekerjanya interferometer disebut sebagai system optic FTIR. Pada system optic fourier transform infra red digunakan radiasi LASER yang berfungsi sebagai radiasi yang diinterferensikan dengan radiasi infra merah agar sinyal radiasi infra merah yang diterima oleh detector secara utuh dan lebih baik.

4.2.2 TGA (Thermogravimetric Analysis)

TGA merupakan salah satu jenis pengujian material berdasarkan analisis thermal untuk mengukur besarnya penyusutan berat dari material berdasarkan peningkatan suhu. Istilah analisis termal seringkali digunakan untuk sifat-sifat spesifik tertentu. Misalnya entalpi, kapasitas panas, massa dan koefisien ekspansi termal. Pengukuran koefisiensi termal dari batangan logam merupakan contoh sederhana dari analisis termal. Contoh lainnya adalah pengukuran perubahan berat dari garam-garam oksida dan hidrat pada saat mengalami dekomposisi akibat pemanasan. Dengan menggunakan peralatan modern, sejumlah besar material dapat dipelajari dengan metode ini. Penggunaan analisis termal pada ilmu mengenai zat padat telah demikian luas dan bervariasi, mencakup studi reaksi keadaan padat, dekomposisi termal dan transisi fasa dan penentuan diagram fasa. Kebanyakan padatan bersifat “aktif secara termal” dan sifat ini menjadi dasar analisis zat padat menggunakan analisis termal.

Tujuan penelitian yang dilakukan dengan metode TGA sendiri adalah untuk menentukan perubahan penyusutan berat (weight-loss) dari suatu sample dalam kaitannya dengan perubahan suhu, sehingga dapat diketahui komposisi polimer dari material yang diuji. Hasil dari pengujian biasanya berupa rekaman diagram yang kontinyu, reaksi dekomposisi satu tahap yang skematik diperlihatkan pada Gb 4.3 di bawah ini.



Gb 4.3 Skema termogram bagi reaksi dekomposisi satu tahap

Prinsip kerja thermogravimetric analysis (TGA) adalah pemanasan suatu bahan pada tempat khusus dengan suhu dan waktu tertentu, hingga mengalami penurunan pada massanya

4.3 Kondisi Pengujian

4.3.1 Pengujian dengan metode FTIR

Pengujian berdasarkan pada standar uji ASTM E1252-98. Preparasi sampel dilakukan dengan cara sampel diiris tipis. Selanjutnya sampel langsung dianalisis menggunakan FTIR dengan metode ATR.

4.3.2 Pengujian dengan metode TGA

Sample ditimbang sekitar 17-18 mg kemudian dimasukkan ke dalam *crucible*. *Crucible* berisi *sample* yang ditempatkan pada *chamber* pengujian dengan program pemanasan dari temperature 50 °C – 600 °C dengan kecepatan kenaikan temperature 10 °C/menit, dan kecepatan aliran gas nitrogen 50 ml/menit. Kemudian ditahan (*isothermic*) selama 5 menit dengan suhu 600 °C dan pemanasan dilanjutkan kembali hingga 900 °C pada lingkungan gas oksigen dengan kecepatan aliran gas 50 ml/menit.

4.4 Hasil Pengujian

4.4.1 Pengujian dengan FTIR

Hasil identifikasi material dengan metode FTIR dapat dilihat pada spectra terlampir. Pada spectra sampel tersebut terlihat beberapa puncak khas yang diuraikan dalam tabel 4.2 di bawah ini.

Tabel 4.2 Jenis material hasil identifikasi dengan metode FTIR

No	Nama Sampel	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)	Jenis Material
1	Acrylic Hitam	2996; 2951; 2841; 1727; 1437; 1389; 1266; 1241; 1192; 1148; 1046; 990; 842; 752 dan 655.	Polymethyl methacrylate (PMMA), sesuai ref. no. 2122
2	Acrylic Hijau	2998; 2952; 2842; 1727; 1437; 1389; 1266; 1241; 1193; 1148; 1066; 990; 844; 752 dan 648.	Polymethyl methacrylate (PMMA), sesuai ref. no. 2122

Dari bilangan gelombang di atas, maka dibuatlah grafik spectra seperti pada daftar lampiran. Dari spectra pengujian untuk material acrylic hitam, maka spectra tersebut sesuai referensi nomor 2122. Sehingga material yang diuji adalah benar material acrylic. Sama halnya dengan spectra pengujian untuk material acrylic hijau, menunjukkan kesesuaian dengan referensi nomor 2122, sehingga material acrylic hijau ini juga termasuk material acrylic.

4.4.2 Pengujian dengan TGA

Untuk hasil analisis komposisi dengan TGA dapat dilihat pada tabel 4.3 di bawah ini:

Tabel 4.3 Jenis material hasil identifikasi dengan metode TGA

No	Nama Material	Komposisi (%)			
		Material-1	Material-2	Residu Organik	Residu Anorganik
1	Acrylic hitam	99,5701	---	0,3989	---
2	Acrylic hijau	3,5452	96,4282	---	---

Setelah dilakukan pengujian pada kedua material, maka dihasilkan grafik penurunan massa setelah dipanaskan. Grafik penurunan massa pada reaksi dekomposisi dari masing-masing material dapat dilihat pada daftar lampiran.

BAB V PEMBAHASAN

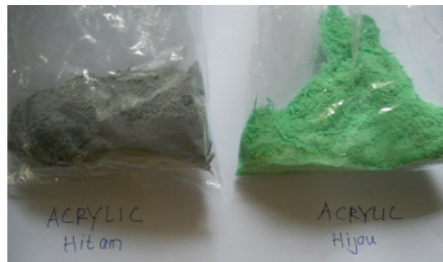
5.1 Persiapan Benda Kerja dan Laser Diode

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

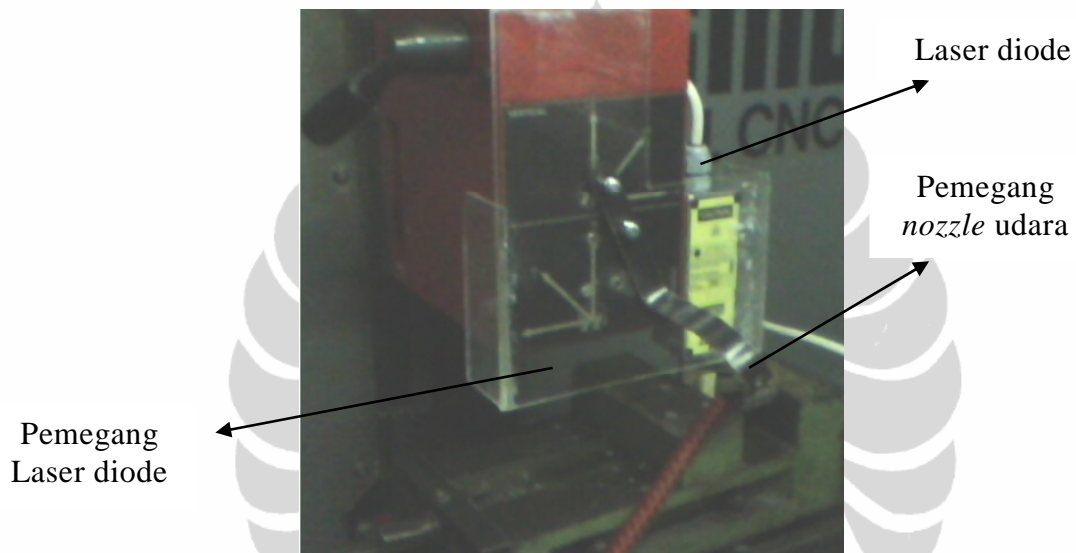
- Pengadaan material dan laser diode yang dibutuhkan;
- Proses pemotongan benda kerja sesuai dengan ukuran yang dikehendaki dalam penelitian;
- Merapikan hasil pemotongan, terutama pada bagian sisi material yang sudah dipotong, mengingat pada bagian sisi inilah yang akan menjadi acuan untuk mengukur kedalaman dari pemotongan yang akan dilakukan oleh laser diode;
- Mengelompokkan beberapa benda kerja untuk memudahkan dalam proses pemotongannya dalam beberapa parameter yang akan dilakukan;
- Membuat serbuk atau tepung *acrylic* dengan proses gerinda (Gb 5.2 untuk bahan baku proses *sintering*);
- Pembuatan pemegang laser diode (Gb 5.3 Pemegang laser diode dan pemegang *nozzle* udara) untuk dipasang pada mesin CNC frais;
- Pembuatan pemegang *nozzle* (Gb 5.3 Pemegang laser diode dan pemegang *nozzle* udara) udara pada pemegang laser diode.



Gb 5.1 Benda kerja penelitian untuk proses pemotongan



Gb 5.2 Benda kerja penelitian untuk proses *sintering*



Gb 5.3 Pemegang laser diode dan pemegang *nozzle* udara

5.2 Kalibrasi Alat Bantu Pengujian

Peralatan untuk proses analisis proses pemotongan dan *sintering* pada bahan polymer menggunakan laser diode daya rendah ini adalah:

1. Laser diode 1 Watt;
2. Pengujian suhu laser diode;
3. Rangkaian kontrol tegangan dan arus listrik untuk laser diode.

Kondisi uji

1. Laser diode 1 Watt

Hasil uji yang saya lakukan di Puspitek BPPT-Serpong unit Departemen Mesin ternyata laser yang digunakan untuk proses penelitian menunjukkan nilai daya

bukan 1 Watt tapi ternyata hanya 0,7369 Watt. Hasil uji dapat dilihat pada Gb 5.4 di bawah ini.



Gb 5.4 Uji laser 1 Watt ternyata hanya 0,7369 Watt

2. Pengujian suhu laser diode

Proses pengujian suhu laser diode ini menggunakan alat thermocouple dan thermocontrol (gambar alat dapat dilihat pada Gb 5.5) yang ada di laboratorium thermodinamika - Departemen Teknik Mesin UI (DTM-UI).



Gb 5.5 Thermocouple dan thermocontrol

Hasil proses pengukuran suhu laser diode ini dapat dilihat pada tabel 5.1 di bawah ini.

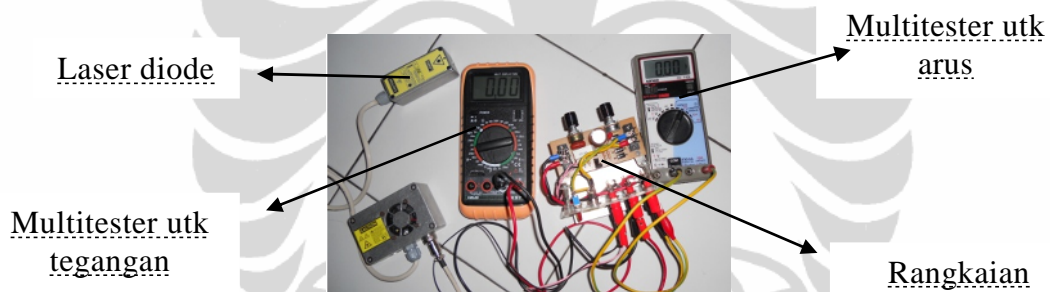
Tabel 5.1 Hasil uji suhu laser diode dengan thermocouple

No	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Tinggi laser (mm)	Suhu (°C)
1	13.6	1,1	33	182
2	13.6	1,1	32	185
3	13.6	1,1	31	187

4	13.6	1,1	30	189
5	13.6	1,1	29	190
6	13.6	1,1	28	191
7	13.6	1,1	27	192
8	13.6	1,1	26	193
9	13.6	1,1	25	194
10	13.6	1,1	24	195
11	13.6	1,1	23	196
12	13.6	1,1	22	196
13	13.6	1,1	21	197
14	13.6	1,1	20	198
15	13.6	1,1	19	201
16	13.6	1,1	18	205
17	13.6	1,1	17	206
18	13.6	1,1	16	206
19	13.6	1,1	15	207
20	13.6	1,1	14	208
21	13.6	1,1	13	210
22	13.6	1,1	12	215
23	13.6	1,1	11	217
24	13.6	1,1	10	218
25	13.6	1,1	9	215
26	13.6	1,1	8	215
27	13.6	1,1	35	176
28	13.6	1,1	34,5	177
29	13.6	1,1	34,2	178
30	13.6	1,1	34,1	178
31	13.6	1,1	34	179
32	10,3	0,87	33	148
33	10,3	0,87	32,5	149
34	10,3	0,87	32,2	150
35	10,3	0,87	32,1	150
36	10,3	0,87	32	150
37	11,9	1	15	190
38	11,3	0,95	15	182
39	10,3	0,87	15	166

3. Rangkaian kontrol arus dan tegangan listrik untuk laser

Proses uji ini hanya dilakukan dengan menghubungkan rangkaian dengan alat multimeter. Proses pengujian dengan langsung menghubungkan laser dengan rangkaian control dimana rangkaian kontrol sudah terhubung dengan supply energy dan juga terhubung dengan dua buah multimeter yaitu untuk arus dan tegangan. Dengan menekan tombol running untuk supply energy, rangkaian kontrol sudah aktif. Selanjutnya potensiometer untuk tegangan diputar dan besarnya tinggal dilihat dimonitor multimeter untuk tegangan dan selanjutnya memutar potensiometer untuk arus dan lihat besar arus yang keluar pada monitor multimeter arus. Besar arus dan tegangan yang disetel adalah 12-15 Volt dan 0.6-1.3 Ampere. Hasil uji yang dilakukan ternyata untuk arus hanya maksimal sampai 1.1 Ampere. Gambar alat rangkaian kontrol dan multimeter yang digunakan dapat dilihat pada Gb 5.6 di bawah ini.



Gb 5.6 Rangkaian kontrol dan multimeter

5.3 Proses Pemotongan dan *Sintering* Benda Kerja dengan Laser Diode

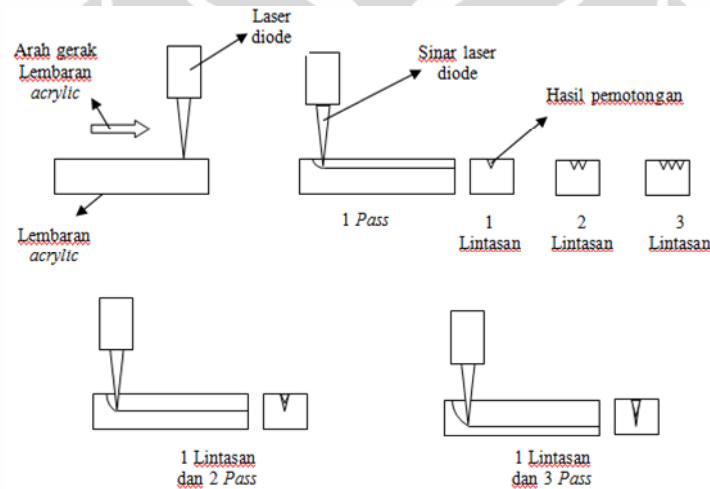
Proses pemotongan dan *sintering* benda kerja dengan laser diode menggunakan bantuan mesin CNC frais EMCO, mengingat mesin CNC frais ini dapat bergerak dengan 3 axis dan otomatis. Langkah-langkah yang dilakukan dalam proses pemotongan ini diantaranya adalah :

- Pemasangan pemegang laser diode dimesin CNC frais;
- Memasang laser diode dipemegang dengan cara memutar 2 (dua) baut yang ada dipemegang, sehingga laser diode terjepit diantara pemegang dan mesin CNC frais;
- Pemasangan pemegang *nozzle* udara di pemegang laser diode dengan cara mengencangkan 2 (dua) baut yang ada pada pemegang *nozzle*. Tapi sebelum

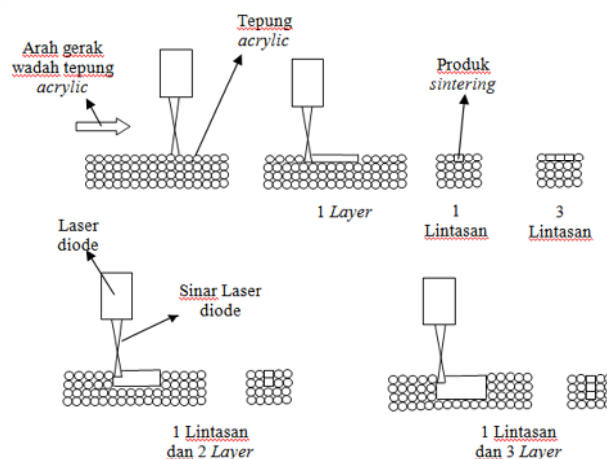
dikembangkan terlebih dahulu dicocokkan dulu antara titik laser diode dengan arah udara (ini untuk proses pemotongan);

- Penyetelan rangkaian kontrol tegangan dan arus untuk laser diode;
- Pembuatan program pergerakan meja eretan untuk menggerakkan benda kerja pada monitor mesin CNC frais EMCO;
- Menyetel posisi ketinggian laser diode dengan benda kerja,;
- Mengaktifkan laser diode;
- Menjalankan pergerakan eretan mesin CNC frais;

Keterangan skema proses pemotongan dapat dilihat pada Gb 5.7 dan proses *sintering* pada Gb 5.8 di bawah ini.



Gb 5.7 Skema proses pemotongan



Gb 5.8 Skema proses *sintering*

5.4 Pengukuran Hasil Pemotongan dan *Sintering*

Untuk proses pengukuran hasil pemotongan menggunakan mikroskop yang dapat mengukur kedalaman penetrasi. Mikroskop ini dilengkapi dengan monitor yang menampilkan besar ukuran pergeseran terhadap arah x dan arah y, karena pada meja atau landasan tempat meletakkan benda kerja dimikroskop terdapat eretan terhadap arah x dan arah y yang dapat bergerak. Gambar mikroskop tersebut dapat dilihat pada Gb 5.9 dibawah ini.



Gb 5.9 Mikroskop pengukur kedalaman pemotongan

Langkah-langkah proses pengukuran hasil pemotongan tersebut diantaranya adalah :

- Benda kerja hasil pemotongan harus dibersihkan dulu dari kotoran hasil pembakaran oleh laser diode;
- Benda kerja diletakkan diatas meja eretan;
- Mikroskop dihubungkan dengan listrik, untuk mengaktifkan monitor ukuran dan mengaktifkan lampu (dalam pelaksanaannya lampu mikroskop tidak berfungsi, sehingga menggunakan lampu senter dari luar untuk penerangan benda kerja);
- Menyetel fokus benda kerja sebelum diukur dengan bantuan penerangan dari senter;
- Menyetel sumbu x dan sumbu y yang ada dilensa mikroskop dengan posisi lubang hasil pemotongan, bila sudah tepat, nol kan besaran ukuran yang ada pada monitor ukuran;
- Gerakan eretan sepanjang kedalaman hasil pemotongan;
- Hasil pengukuran akan tertampil pada monitor ukuran.

Sedangkan untuk proses pengukuran ketebalan produk hasil proses *sintering* dengan menggunakan jangka sorong dan untuk menganalisa bagian dalam dari produk yang sudah *disintering* menggunakan mikroskop digital.

Langkah-langkah proses pengukuran ketebalan hasil *sintering* dan analisa bagian dalamnya adalah :

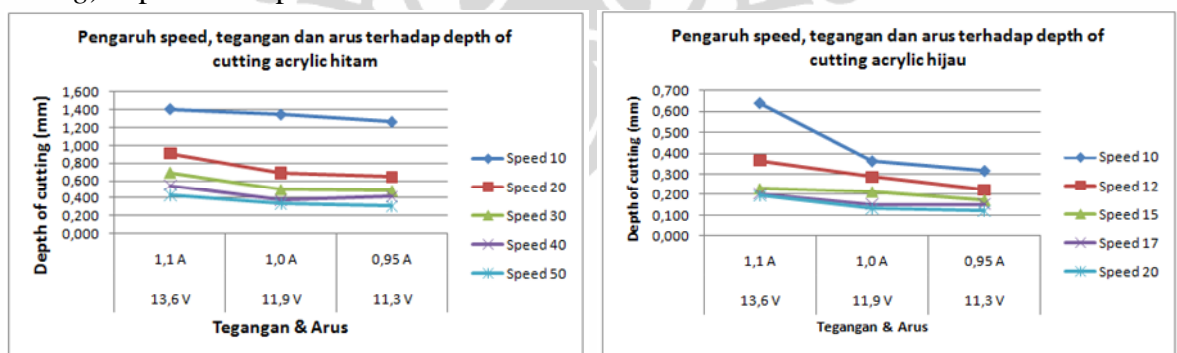
- Benda kerja hasil *sintering* harus dibersihkan dulu dari serbuk yang masih menempel;
- Ketebalan benda kerja diukur dengan jangka sorong;
- Bagian dalam benda kerja dilihat dengan mikroskop digital (mikroskop digital diaktifkan melalui komputer);

5.4.1 Hasil proses pemotongan

Untuk proses pemotongan hasil yang dilihat adalah pengaruh dari parameter seperti kecepatan potong (*speed*), tegangan dan arus listrik, *pass*, lintasan dan hembusan udara terhadap kedalaman pemotongan (*depth of cutting*).

A. Pengaruh kecepatan potong (*speed*), tegangan dan arus terhadap kedalaman pemotongan





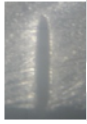
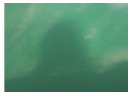

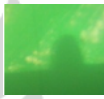
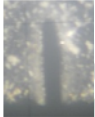



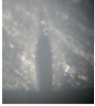

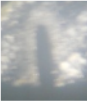
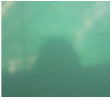

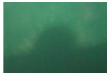



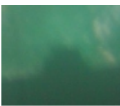
Pengaruh kecepatan potong terhadap kedalaman pemotongan (*depth of cutting*) dapat dilihat pada Gb 5.10 di bawah ini.

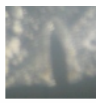
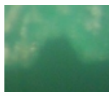
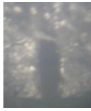

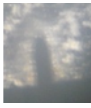
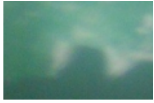

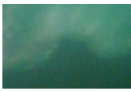


Gb 5.10 Kedalaman pemotongan *acrylic* dipengaruhi oleh *speed*, tegangan dan arus

Gambar hasil pemotongan yang dipengaruhi oleh *speed* ini dapat dilihat pada tabel 5.2 di bawah ini.

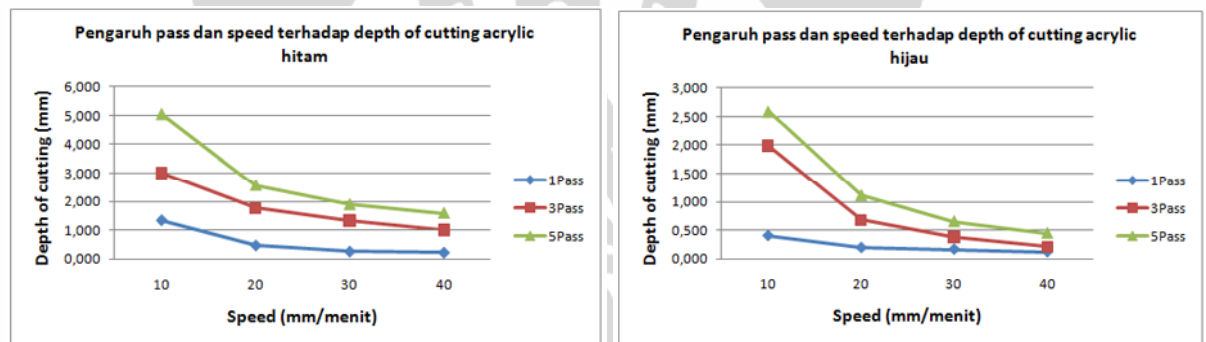
Tabel 5.2 Pengaruh *speed*, tegangan dan arus terhadap kedalaman pemotongan (Teg. 13.6 Volt, Arus 1.1 Ampere, 1 lintasan, Tinggi pada sumbu z untuk *acrylic* hitam 11mm dan *acrylic* hijau 15mm)

No	Speed (mm/mnt)	Depth Acrylic hitam (mm)	Gambar depth of cutting acrylic hitam	Speed (mm/mnt)	Depth Acrylic hijau (mm)	Gambar depth of cutting acrylic hijau
1	10	1.408		10	0.641	
2	10	1.347		10	0.365	
3	10	1.263		10	0.318	
4	20	0.909		12	0.365	
5	20	0.686		12	0.287	
6	20	0.642		12	0.223	
7	30	0.691		15	0.229	
8	30	0.497		15	0.214	
9	30	0.485		15	0.171	
10	40	0.543		17	0.204	
11	40	0.373		17	0.153	

12	40	0.412		17	0.152	
13	50	0.434		20	0.195	
14	50	0.332		20	0.131	
15	50	0.307		20	0.120	

B. Pengaruh *pass* dan *speed* terhadap kedalaman pemotongan



Pengaruh *pass* dan *speed* terhadap kedalaman pemotongan (*depth of cutting*) dapat dilihat pada Gb 5.11 di bawah ini.

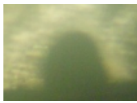

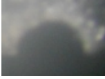

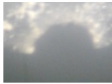



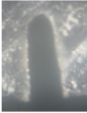



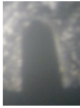



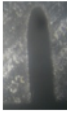

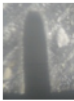
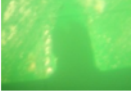

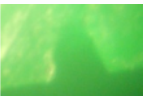


Gb 5.11 Kedalaman pemotongan *acrylic* dipengaruhi oleh *pass* dan *speed*

Gambar hasil pemotongan yang dipengaruhi oleh *pass* dan *speed* ini dapat dilihat pada tabel 5.3 di bawah ini.

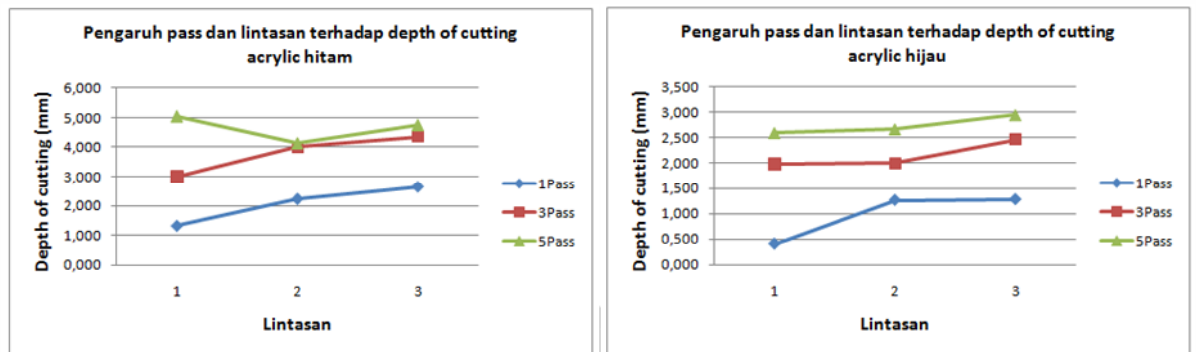
Tabel 5.3 Pengaruh *pass* dan *speed* terhadap kedalaman pemotongan
(Teg. 13.6 Volt, Arus 1,1 Ampere, 1 lintasan, Tinggi pada sumbu z 17mm)

No	Pass	Speed (mm/mnt)	Depth Acrylic hitam (mm)	Gambar depth of cutting acrylic hitam	Depth Acrylic hijau (mm)	Gambar depth of cutting acrylic hijau
1	1	10	1.328		0.405	

2	1	20	0.461		0.192	
3	1	30	0.251		0.164	
4	1	40	0.212		0.119	
5	3	10	3000		1.990	
6	3	20	1.771		0.681	
7	3	30	1.328		0.380	
8	3	40	1.010		0.209	
9	5	10	5.031		2.595	
10	5	20	2.566		1.112	
11	5	30	1.895		0.653	
12	5	40	1.590		0.447	

C. Pengaruh lintasan dan *pass* terhadap kedalaman pemotongan

Pengaruh lintasan dan *pass* terhadap kedalaman pemotongan (*depth of cutting*) dapat dilihat pada Gb 5.12 di bawah ini.







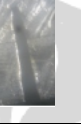
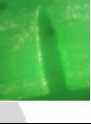


Gb 5.12 Kedalaman pemotongan *acrylic* dipengaruhi oleh lintasan dan *pass*

Gambar hasil pemotongan yang dipengaruhi oleh lintasan dan *pass* dapat dilihat pada tabel 5.4 di bawah ini.

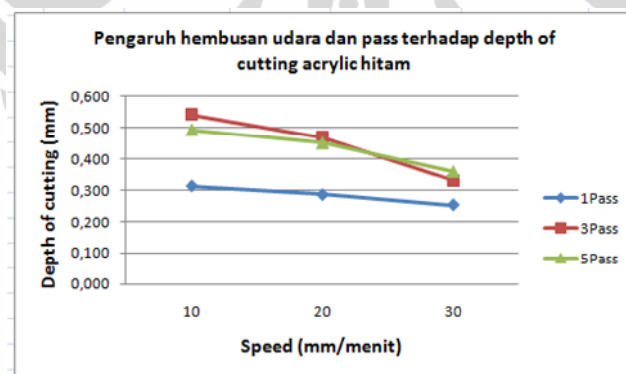
Tabel 5.4 Pengaruh lintasan dan *pass* terhadap kedalaman pemotongan (Tinggi pada sumbu z 17mm, *speed* 10 mm/mnt, tegangan 13.6 Volt dan arus 1.1 Ampere)

No	Lintasan	Pass	Depth Acrylic hitam (mm)	Gambar depth of cutting acrylic hitam	Depth Acrylic hijau (mm)	Gambar depth of cutting acrylic hijau
1	1	1	1.328		0.405	
2	2	1	2.216		1.259	
3	3	1	2.628		1.273	
4	1	3	3.000		1.990	
5	2	3	4.004		2.004	

6	3	3	4.360		2.470	
7	1	5	5.031		2.595	
8	2	5	4.139		2.670	
9	3	5	4.743		2.952	

D. Pengaruh hembusan udara dan *pass* terhadap kedalaman pemotongan



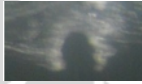

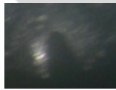

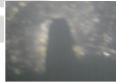


Pengaruh hembusan udara dan *pass* terhadap kedalaman pemotongan (*depth of cutting*) dapat dilihat pada Gb 5.13 di bawah ini.



Gb 5.13 Kedalaman pemotongan *acrylic* dipengaruhi oleh hembusan udara dan *pass*

Gambar hasil pemotongan yang dipengaruhi oleh lintasan dan *pass* dapat dilihat pada tabel 5.5 di bawah ini.

Tabel 5.5 Pengaruh hembusan udara dan *pass* terhadap kedalaman pemotongan
(Tinggi pada sumbu z 17mm, tegangan 13.6 Volt dan arus 1.1 Ampere)

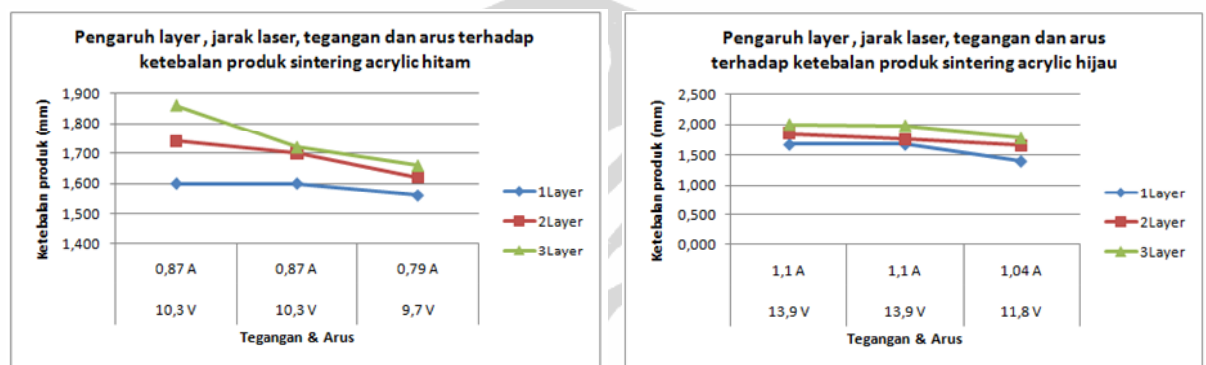
No	Hembusan Udara	Pass	Speed (mm/mnt)	Depth Acrylic hitam (mm)	Gambar depth of cutting acrylic hitam
1	ada	1	10	0.314	
2	ada	1	20	0.286	
3	ada	1	30	0.253	
4	ada	3	10	0.542	
5	ada	3	20	0.470	
6	ada	3	30	0.331	
7	ada	5	10	0.494	
8	ada	5	20	0.452	
9	ada	5	30	0.361	

5.4.2 Hasil proses *sintering*

Untuk proses *sintering* hasil yang dilihat adalah pengaruh dari parameter seperti kecepatan lintasan, tegangan dan arus listrik laser diode, dan *layer* terhadap ketebalan produk.

A. Pengaruh *layer*, tegangan dan arus terhadap ketebalan produk *sintering*







Pengaruh *layer*, tegangan dan arus terhadap ketebalan produk *sintering* dapat dilihat pada Gb 5.14 di bawah ini.

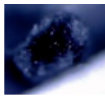
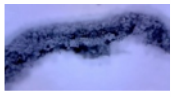
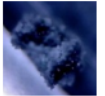
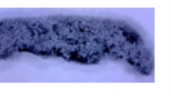
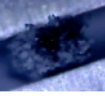
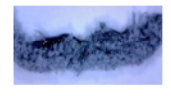
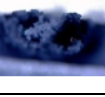
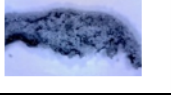

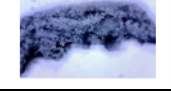
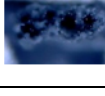
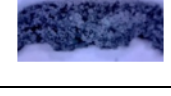


Gb 5.14 Ketebalan produk sintering *acrylic* dipengaruhi oleh *layer*, tegangan dan arus





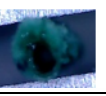
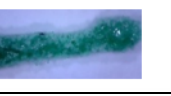
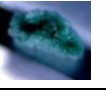
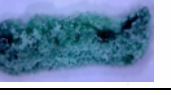

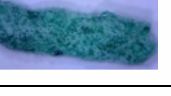

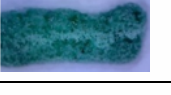


Untuk gambar produk *acrylic* hitam dan *acrylic* hijau pada proses *sintering* dapat dilihat pada tabel 5.6 dan tabel 5.7 di bawah ini.





Tabel 5.6 Pengaruh *layer*, tegangan dan arus terhadap ketebalan produk *sintering acrylic* hitam (*speed* 60 mm/menit)

No	Layer	Jarak Laser ke permukaan bahan (mm)	Teg. (Volt)	Arus (Ampere)	Tebal Produk (mm)	Gambar Penampang potong	Gambar Produk
1	1	32	10,3	0,87	1.600		
2	1	32	10,3	0,87	1.600		
3	1	32	9,7	0,79	1.560		

4	2	32 & 32.1	10,3	0,87	1.740		
5	2	32 & 32.5	10,3	0,87	1.700		
6	2	32 & 32.1	9,7	0,79	1.620		
7	3	32, 32.1 & 32.2	10,3	0,87	1.860		
8	3	32, 32.5 & 33	10,3	0,87	1.720		
9	3	32, 32.1 & 32.2	9,7	0,79	1.660		

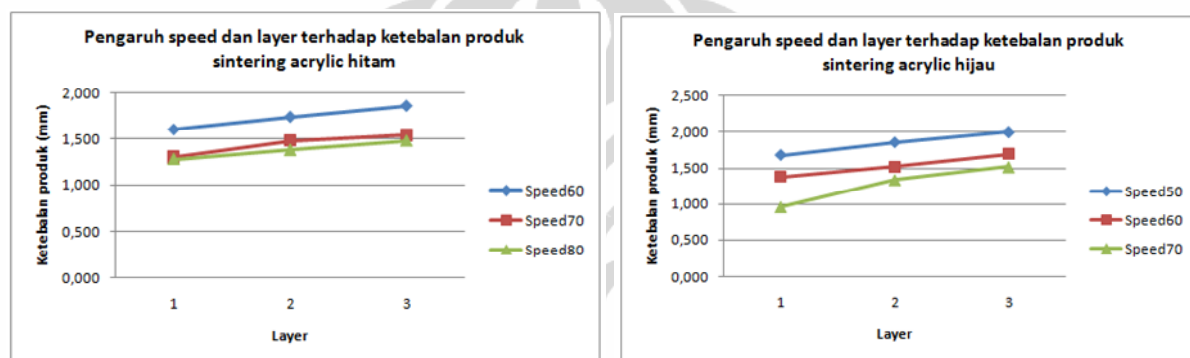
Tabel 5.7 Pengaruh *layer*, tegangan dan arus terhadap ketebalan produk *sintering acrylic hijau* (speed 60 mm/menit)

No	Layer	Jarak Laser ke permukaan bahan (mm)	Teg. (Volt)	Arus (Ampere)	Tebal Produk (mm)	Gambar Penampang potong	Gambar Produk
1	1	34	13,9	1,1	1.680		
2	1	34	13,9	1,1	1.680		
3	1	34	11,8	1,04	1.400		
4	2	34 & 34.1	13,9	1,1	1.860		
5	2	34 & 34.5	13,9	1,1	1.760		
6	2	34 & 34.1	11,8	1,04	1.660		
7	3	34, 34.1 & 34.2	13,9	1,1	2.000		

8	3	34, 34.5 & 35	13,9	1,1	1.980		
9	3	34, 34.1 & 34.2	11,8	1,04	1.780		

B. Pengaruh *speed* dan *layer* terhadap ketebalan produk *sintering*






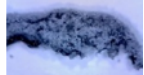


Pengaruh *speed* dan *layer* terhadap ketebalan produk *sintering* dapat dilihat pada Gb 5.15 di bawah ini.

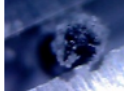
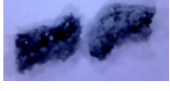
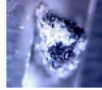
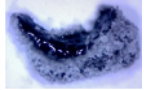
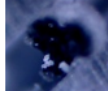
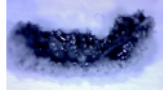

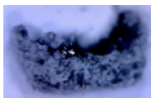




Gb 5.15 Ketebalan produk *sintering acrylic* dipengaruhi oleh *speed* dan *layer*




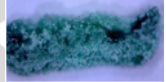

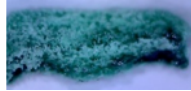






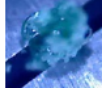
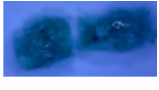

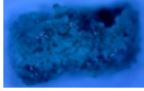
Untuk gambar produk *acrylic* hitam dan *acrylic* hijau pada proses *sintering* dapat dilihat pada tabel 5.8 dan tabel 5.9 di bawah ini.


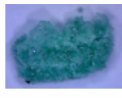
Tabel 5.8 Pengaruh *speed* dan *layer* terhadap ketebalan produk *sintering acrylic* hitam

No	Layer	Jarak Laser ke permukaan bahan (mm)	Speed (mm/mnt)	Tebal Produk (mm)	Gambar Penampang potong	Gambar Produk
1	1	32	60	1.600		
2	2	32 & 32.1	60	1.740		
3	3	32, 32.1 & 32.2	60	1.860		
4	1	32	70	1.300		

5	2	32 & 32.1	70	1.480		
6	3	32, 32.1 & 32.2	70	1.540		
7	1	32	80	1.380		
8	2	32 & 32.1	80	1.480		
9	3	32, 32.1 & 32.2	80	1.280		

Tabel 5.9 Pengaruh *speed* dan *layer* terhadap ketebalan produk *sintering acrylic* hijau

No	Layer	Jarak Laser ke permukaan bahan (mm)	Speed (mm/mnt)	Tebal Produk (mm)	Gambar Penampang potong	Gambar Produk
1	1	34	50	1.680		
2	2	34 & 34.1	50	1.860		
3	3	34, 34.1 & 34.2	50	2.000		
4	1	34	60	1.380		
5	2	34 & 34.1	60	1.520		
6	3	34, 34.1 & 34.2	60	1.700		
7	1	34	70	0.960		
8	2	34 & 34.1	70	1.340		

9	3	34, 34.1 & 34.2	70	1.520		
---	---	--------------------	----	-------	------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------

5.5 Perbandingan Daya Potong Laser Dengan Daya Potong Mesin Bubut

Daya potong laser diode yang digunakan sebesar 0.7369 Watt seperti yang diperoleh dari hasil pengujian di BPPT Serpong. Besar daya laser 0,7369 Watt ini dapat memotong *acrylic* hitam dengan kedalaman pemotongan sebesar 1,408 mm dari hasil eksperimen. Untuk menghitung besar daya potong mesin bubut diperoleh dari persamaan [19]:

$$P = \frac{F_v \cdot V}{60} \text{ (Watt)}$$

Sedangkan gaya potong pada mesin bubut persamaannya adalah [19]:

$$F_v = k_s \cdot A$$

$$k_s = k_{s1.1} \cdot h^{-z}$$

$$A = b \cdot h$$

Keterangan :

V = kecepatan potong (m/menit)

F_v = gaya potong (N)

k_s = gaya potong spesifik (N/mm²)

A = luas penampang beram sebelum terpotong (mm²)

k_{s11} = gaya potong spesifik, merupakan harga k_s ekstrapolatif yaitu untuk proses permesinan dengan axf_z=1x1= 1mm², dan berlaku bagi sudut potong utama k_r=90⁰. Nilai k_{s1.1} untuk plastik adalah 190 N/mm² (lihat lampiran tabel 4.1).

h = tebal beram sebelum terpotong (mm)

z = pangkat tebal beram, rata-rata berharga=0,2

b = lebar beram sebelum terpotong (mm)

a = kedalaman potong (mm)

f_z = gerak pemakanan (mm/putaran/mata potong) [19]

Bila h=1.408 mm, b=10 mm, dan V = 90m/menit [20] (lihat lampiran tabel 22.4), maka perhitungan daya potong mesin bubut adalah:

$$A = 10 \times 1,408 = 14,08 \text{ mm}^2$$

$$k_s = 190 \times (1,408)^{-0,2} = 177,43 \frac{N}{mm^2}$$

$$F_v = 177,43 \times 14,08 = 2498,21 N$$

$$P = \frac{2498,21 \times 90}{60} = 3747,32 Watt$$

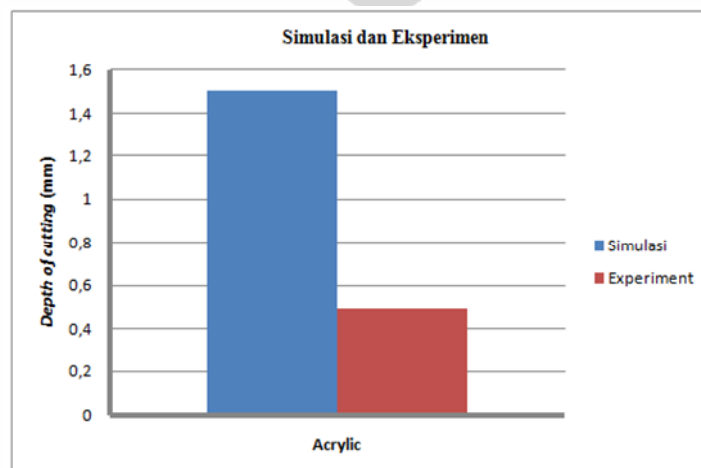
Jadi besar daya potong mesin untuk memotong *acrylic* hitam dengan kedalaman 1,408 mm membutuhkan daya potong sebesar 3747,32 Watt, bila dibandingkan dengan daya potong laser yang hanya 0,7369 Watt untuk memotong *acrylic* dengan kedalaman potong yang sama (1,408mm) ternyata penggunaan laser jauh lebih efisien.

5.6 Pembuatan Simulasi Kedalaman Pemotongan

Untuk membuat simulasi kedalaman pemotongan untuk proses pemotongan, program yang digunakan berbasis pada matlab. Dari hasil pembuatan program diperoleh 2 file, pertama file program pemanggil file program perhitungan dan kedua file program perhitungan kedalaman. File program pemanggil bernama `melpool_depth1.m` dan file perhitungan kedalaman bernama `melpooldepth1.m` (program ini dapat dilihat pada lembar lampiran).

5.7 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen

Perbandingan hasil pengukuran benda kerja yang sudah dipotong dan hasil proses simulasi dapat dilihat pada Gb 5.16 di bawah ini.



Gb 5.16 Diagram perbandingan hasil simulasi dan eksperimen

Dari hasil perbandingan ini terlihat bahwa nilai simulasi untuk *acrylic* lebih besar bila dibandingkan dengan nilai eksperimennya, jadi besar nilai error dari kedua metode ini adalah 1,01 mm.

5.8 Analisis Hasil

5.8.1 Analisis varian 2 arah tanpa interaksi untuk proses pemotongan

A. Pengaruh kecepatan, tegangan dan arus

A.1 Acrylic hitam

Tabel 5.10 Data *acrylic* hitam pengaruh kecepatan, tegangan dan arus

	Metode 1	Metode2	Metode3	Total Baris
Speed10	1,408	1,347	1,263	4,018
Speed20	0,909	0,686	0,642	2,237
Speed30	0,691	0,497	0,485	1,673
Speed40	0,543	0,373	0,412	1,328
Speed50	0,434	0,332	0,307	1,073
Tot.Kolm	3,985	3,235	3,109	10,329

Tabel 5.11 Analisis varian *acrylic* hitam pengaruh kecepatan, tegangan dan arus

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 1,842	db numer1 r-1= 5-1=4	$s^2B=KTB=$ JKB/r-1= 1,842/4= 0,46	fhitung = KTB/KTG= 0,46/0,002= =272,41	= 1 % db numer1 = 4 db denum= 8 f tabel = 7,01
Rata-rata kolom	JKK= 0,090	db numer2 k-1= 3-1=2	$s^2K=KTK=$ JKK/k-1= 0,09/2= 0,045	fhitung = KTK/KTG= 0,045/0,002= = 26,5	= 1 % db numer2 = 2 db denum= 8 f tabel = 8,65
Galat	JKG= 0,014	db denum (r-1)(k-1)= 4x2=8	$s^2G=KTG=$ JKG/(r-1)(k-1)= 0,014/8= 0,002		
total	JKT= 1,945	r.k-1= 5x3-1=14			

Kesimpulan: $F_{hitung} > F_{tabel}$ menandakan bahwa kedalaman pemotongan *acrylic* hitam tdk sama

A.2 Acrylic hijau

Tabel 5.12 Data *acrylic* hijau pengaruh kecepatan, tegangan dan arus

	Metode 1	Metode2	Metode3	Total Baris
Speed10	0,641	0,365	0,318	1,324
Speed12	0,365	0,287	0,223	0,875
Speed15	0,229	0,214	0,171	0,614
Speed17	0,204	0,153	0,152	0,509
Speed20	0,195	0,131	0,120	0,446
Tot.Kolm	1,634	1,150	0,984	3,768

Tabel 5.13 Analisis varian *acrylic* hijau pengaruh kecepatan, tegangan dan arus

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 1,842	db numer1 r-1= 5-1=4	$s^2B=KTB=$ JKB/r-1= 1,842/4= 0,043	fhitung = KTB/KTG= 0,043/0,004= =10,6	= 1 % db numer1 = 4 db denum= 8 f tabel = 7,01
Rata-rata kolom	JKK= 0,090	db numer2 k-1= 3-1=2	$s^2K=KTK=$ JKK/k-1= 0,09/2= 0,023	fhitung = KTK/KTG= 0,023/0,004= = 5,6	= 1 % db numer2 = 2 db denum= 8 f tabel = 8,65
Galat	JKG= 0,014	db denum (r-1)(k-1)= 4x2=8	$s^2G=KTG=$ JKG/(r-1)(k-1)= 0,014/8= 0,004		
total	JKT= 1,945	r.k-1= 5x3-1=14			

Kesimpulan: $F_{hitung} > F_{tabel}$ menandakan bahwa kedalaman *cutting acrylic* hijau pada Baris tdk sama, sedangkan $F_{hitung} < F_{tabel}$ menandakan bahwa kedalaman *cutting acrylic* hijau pada kolom dianggap sama kedalaman *cuttingnya*.

B. Pengaruh *pass* dan kecepatan

B.1 *Acrylic* hitam

Tabel 5.14 Data *acrylic* hitam pengaruh *pass* dan kecepatan

	Metode 1	Metode2	Metode3	Metode4	Total Baris
1 Pass	1,328	0,461	0,251	0,212	2,252
3 Pass	3,000	1,771	1,328	1,010	7,109
5 Pass	5,031	2,566	1,895	1,590	11,082
Tot.Kolm	9,359	4,798	3,474	2,812	20,443

Tabel 5.15 Analisis varian *acrylic* hitam pengaruh *pass* dan kecepatan

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 9,779	db numer1 r-1= 3-1=2	$s^2B=KTB=$ JKB/r-1= 9,779/2= 4,889	fhitung = KTB/KTG= 4,889/0,285= = 17,15	= 1 % db numer1 = 2 db denum= 6 f tabel = 10,92
Rata-rata kolom	JJK= 8,703	db numer2 k-1= 4-1=3	$s^2K=KTK=$ JJK/k-1= 8,703/3=2,901	fhitung = KTK/KTG= 2,901/0,285= = 10,17	= 1 % db numer2 = 3 db denum= 6 f tabel = 9,78
Galat	JKG= 1,711	db denum (r-1)(k-1)= 2x3=6	$s^2G=KTG=$ JKG/(r-1)(k-1)= 1,711/6= 0,285		
total	JKT= 20,192	r.k-1= 3x4-1=11			

Kesimpulan: fhitung > Ftabel menandakan bahwa kedalaman *cutting acrylic* hitam tdk sama.

B.2 *Acrylic* hijau

Tabel 5.16 Data *acrylic* hijau pengaruh *pass* dan kecepatan

	Metode 1	Metode2	Metode3	Metode4	Total Baris
1 Pass	0,405	0,192	0,164	0,119	0,880
3 Pass	1,990	0,681	0,380	0,209	3,260
5 Pass	2,595	1,112	0,653	0,447	4,807
Tot.Kolm	4,99	1,985	1,197	0,775	8,947

Tabel 5.17 Analisis varian *acrylic* hijau pengaruh *pass* dan kecepatan

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 1,957	db numer1 r-1= 3-1=2	$s^2B=KTB=$ JKB/r-1= 1,957/2= 0,978	fhitung = KTB/KTG= 0,978/0,200= = 4,88	= 5 % db numer1 = 2 db denum= 6 f tabel = 5,14
Rata-rata kolom	JKK= 3,621	db numer2 k-1= 4-1=3	$s^2K=KTK=$ JKK/k-1= 3,621/3=1,207	fhitung = KTK/KTG= 1,207/0,200= = 6,02	= 5 % db numer2 = 3 db denum= 6 f tabel = 4,76
Galat	JKG= 1,203	db denum (r-1)(k-1)= 2x3=6	$s^2G=KTG=$ JKG/(r-1)(k-1)= 1,203/6= 0,200		
total	JKT= 6,780	r.k-1= 3x4-1=11			

Kesimpulan: Fhitung < Ftabel menandakan bahwa kedalaman *cutting acrylic* hijau pada Baris sama, sedangkan Fhitung > Ftabel menandakan bahwa kedalaman *cutting acrylic* hijau pada kolom dianggap tidak sama kedalaman *cuttingnya*.

C. Pengaruh pass dan lintasan

C.1 Acrylic hitam

Tabel 5.18 Data *acrylic* hitam pengaruh *pass* dan lintasan

	Metode 1	Metode2	Metode3	Total Baris
1 Pass	1,328	2,216	2,628	6,172
3 Pass	3,000	4,004	4,36	11,364
5 Pass	5,031	4,139	4,743	13,913
Tot.Kolm	9,359	10,359	11,731	31,449

Tabel 5.19 Analisis varian *acrylic* hitam pengaruh *pass* dan lintasan

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 10,375	db numer1 $r-1 = 3-1=2$	$s^2B=KTB=$ $JKB/r-1=$ $10,375/2=$ $= 5,188$	fhitung = $KTB/KTG=$ $5,188/0,337=$ $= 15,41$	= 2,5 % db numer1 = 2 db denum= 4 f tabel = 10,65
Rata-rata kolom	JKK= 0,945	db numer2 $k-1=3-1=2$	$s^2K=KTK=$ $JKK/k-1=$ $0,945/2=$ $=0,473$	fhitung = $KTK/KTG=$ $0,473/0,337=$ $= 1,40$	= 2,5 % db numer2 = 2 db denum= 4 f tabel = 10,65
Galat	JKG= 1,347	db denum $(r-1)(k-1)=$ $2 \times 2=4$	$s^2G=KTG=$ $JKG/(r-1)(k-1)=$ $1,347/4=0,337$		
total	JKT= 12,667	r.k-1= $3.3-1=8$			

Kesimpulan: Fhitung > Ftabel menandakan bahwa kedalaman *cutting acrylic* hitam pada baris tidak sama, sedangkan Fhitung < Ftabel menandakan bahwa kedalaman *cutting acrylic* hitam pada kolom dianggap sama kedalaman *cuttingnya*

C.2 Acrylic hijau

Tabel 5.20 Data *acrylic* hijau pengaruh *pass* dan lintasan

	Metode 1	Metode2	Metode3	Total Baris
1 Pass	0,405	1,259	1,273	2,937
3 Pass	1,990	2,004	2,470	6,464
5 Pass	2,595	2,670	2,952	8,217
Tot.Kolm	4,99	5,933	6,695	17,618

Tabel 5.21 Analisis varian *acrylic* hijau pengaruh *pass* dan lintasan

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 4,821	db numer1 $r-1=3-1=2$	$s^2B=KTB=$ $JKB/r-1=$ $4,821/2=$ $= 2,411$	fhitung = $KTB/KTG=$ $2,411/0,057=$ $= 42,27$	= 1 % db numer1 = 2 db denum= 4 f tabel = 18,00
Rata-rata kolom	JKK= 0,486	db numer2 $k-1=3-1=2$	$s^2K=KTK=$ $JKK/k-1=$ $0,486/2=$ $=0,243$	fhitung = $KTK/KTG=$ $0,486/0,057=$ $= 4,26$	= 1 % db numer2 = 2 db denum= 4 f tabel = 18,00
Galat	JKG= 0,228	db denum $(r-1)(k-1)=$ $2 \times 2=4$	$s^2G=KTG=$ $JKG/(r-1)(k-1)=$ $0,228/4=0,057$		
total	JKT= 5,536	r.k-1= $3.3-1=8$			

Kesimpulan: Fhitung > Ftabel menandakan bahwa kedalaman *cutting acrylic* hijau pada Baris tidak sama, sedangkan Fhitung < Ftabel menandakan bahwa kedalaman *cutting acrylic* hijau pada kolom dianggap sama kedalaman *cuttingnya*.

D. Pengaruh hembusan udara dan *pass*

D.1 Acrylic hitam

Tabel 5.22 Data *acrylic* hitam pengaruh hembusan udara dan *pass*

	Metode 1	Metode2	Metode3	Total Baris
1 Pass	0,314	0,286	0,253	0,853
3 Pass	0,542	0,470	0,331	1,343
5 Pass	0,494	0,452	0,361	1,307
Tot.Kolm	1,350	1,208	0,945	3,503

Tabel 5.23 Analisis varian *acrylic* hitam pengaruh hembusan udara dan *pass*

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 0,050	db numer1 $r-1= 3-1=2$	$s^2B=KTB=$ $JKB/r-1=$ $0,050/2=$ $= 0,025$	$f_{hitung} =$ $KTB/KTG=$ $0,025/0,001=$ $= 16,67$	$= 2,5 \%$ db numer1 = 2 db denum= 4 f tabel = 10,65
Rata-rata kolom	JKK= 0,028	db numer2 $k-1=3-1=2$	$s^2K=KTK=$ $JKK/k-1=$ $0,028/2=$ $= 0,014$	$f_{hitung} =$ $KTK/KTG=$ $0,014/0,001=$ $= 9,44$	$= 2,5 \%$ db numer2 = 2 db denum= 4 f tabel = 10,65
Galat	JKG= 0,006	db denum $(r-1)(k-1)=$ $2 \times 2=4$	$s^2G=KTG=$ $JKG/(r-1)(k-1)=$ $0,006/4= 0,001$		
total	JKT= 0,084	r.k-1= $3 \times 3-1=8$			

Kesimpulan: $F_{hitung} > F_{tabel}$ menandakan bahwa kedalaman *cutting acrylic* hitam pada Baris tidak sama, sedangkan $F_{hitung} < F_{tabel}$ menandakan bahwa kedalaman *cutting acrylic* hitam pada kolom dianggap sama kedalaman *cuttingnya*.

Hasil analisis proses pemotongan

Dari hasil analisis varian (ANOVA) untuk proses pemotongan diperoleh kesimpulan untuk material *acrylic* hitam dan *acrylic* hijau seperti tabel 5.24 di bawah ini.

Tabel 5.24 Hasil analisis varian pada proses pemotongan

<i>Acrylic Hitam</i>	<i>Acrylic Hijau</i>
Speed, tegangan dan arus mempengaruhi proses pemotongan, terlihat dengan tidak samanya rata-rata nilai kedalaman pemotongan (nilai Fhitung > Ftabel)	Speed, tegangan dan arus mempengaruhi nilai rata-rata kedalaman pemotongan pada baris tidak sama ($F_{hitung} > F_{tabel}$), sedangkan pada kolom , speed, tegangan dan arus tidak berpengaruh, karena nilai rata-ratanya sama ($F_{hitung} < F_{tabel}$).
Pass dan speed mempengaruhi proses pemotongan, terlihat dengan tidak samanya	Pass dan speed tidak berpengaruh, karena nilai rata-ratanya sama ($F_{hitung} < F_{tabel}$),

rata-rata nilai kedalaman pemotongan (nilai Fhitung > Ftabel)	sedangkan pada kolom, pass dan speed mempengaruhi nilai rata-rata kedalaman pemotongan, karena nilai rata-ratanya tidak sama (Fhitung > Ftabel),
Lintasan dan pass mempengaruhi nilai rata-rata kedalaman pemotongan pada baris tidak sama (Fhitung > Ftabel), sedangkan pada kolom, lintasan dan pass tidak berpengaruh, karena nilai rata-ratanya sama (Fhitung < Ftabel).	Lintasan dan pass mempengaruhi nilai rata-rata kedalaman pemotongan pada baris tidak sama (Fhitung > Ftabel), sedangkan pada kolom, lintasan dan pass tidak berpengaruh, karena nilai rata-ratanya sama (Fhitung < Ftabel).
Hembusan udara dan pass mempengaruhi nilai rata-rata kedalaman pemotongan pada baris tidak sama (Fhitung > Ftabel), sedangkan pada kolom, hembusan udara dan pass tidak berpengaruh, karena nilai rata-ratanya sama (Fhitung < Ftabel).	Tidak ada kedalaman pemotongan, dengan variabel yang sama dengan <i>acrylic</i> hitam.
Kesimpulan: Rata-rata parameter speed, tegangan, arus, pass, lintasan, dan hembusan udara mempengaruhi proses pemotongan (kedalaman pemotongan).	

5.8.2 Analisis varian 2 arah tanpa interaksi proses *sintering*

A. Pengaruh *layer*, tegangan dan arus

A.1 *Acrylic* hitam

Tabel 5.25 Data *acrylic* hitam pengaruh *layer*, tegangan dan arus

	Metode 1	Metode2	Metode3	Total Baris
1 Pass	1,600	1,600	1,560	4,760
3 Pass	1,740	1,700	1,620	5,060
5 Pass	1,860	1,720	1,660	5,240
Tot.Kolm	5,2	5,020	4,84	15,06

Tabel 5.26 Analisis varian *acrylic* hitam pengaruh *layer*, tegangan dan arus

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 0,039	db numer1 $r-1=3-1=2$	$s^2B=KTB=$ $JKB/r-1=$ $0,039/2= 0,020$	$f_{hitung} =$ $KTB/KTG=$ $0,020/0,002=$ $= 9,8$	$= 2,5 \%$ db numer1 = 2 db denum= 4 $f_{tabel} = 10,65$
Rata-rata kolom	JJK= 0,022	db numer2 $k-1=3-1=2$	$s^2K=KTK=$ $JJK/k-1=$ $0,022/2 = 0,011$	$f_{hitung} =$ $KTK/KTG=$ $0,011/0,002=$ $= 5,4$	$= 2,5 \%$ db numer2 = 2 db denum= 4 $f_{tabel} = 10,65$
Galat	JKG= 0,008	db denum $(r-1)(k-1)=$ $2 \times 2=4$	$s^2G=KTG=$ $JKG/(r-1)(k-1)=$ $0,008/4= 0,002$		
total	JKT= 0,069	r.k-1= $3.3-1=8$			

Kesimpulan: $f_{hitung} < F_{tabel}$ menandakan bahwa ketebalan produk *sintering acrylic* hitam sama

A.2 Acrylic hijau

Tabel 5.27 Data *acrylic* hijau pengaruh *layer*, tegangan dan arus

	Metode 1	Metode2	Metode3	Total Baris
1 Pass	1,680	1,680	1,400	4,760
3 Pass	1,860	1,760	1,660	5,280
5 Pass	2,000	1,980	1,780	5,760
Tot.Kolm	5,540	5,420	4,840	15,800

Tabel 5.28 Analisis varian *acrylic* hijau pengaruh *layer*, tegangan dan arus

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	$JKB = 0,167$	db numer1 $r-1=3-1=2$	$s^2B=KTB=$ $JKB/r-1=$ $0,167/2=0,083$	$f_{hitung} =$ $KTB/KTG=$ $0,083/0,002=$ $= 39,49$	$= 1 \%$ db numer1 = 2 db denum= 4 f tabel = 18,00
Rata-rata kolom	$JKK = 0,093$	db numer2 $k-1=3-1=2$	$s^2K=KTK=$ $JKK/k-1=$ $0,093/2 = 0,047$	$f_{hitung} =$ $KTK/KTG=$ $0,047/0,002=$ $= 22,13$	$= 1 \%$ db numer2 = 2 db denum= 4 f tabel = 18,00
Galat	$JKG = 0,008$	db denum $(r-1)(k-1)=$ $2 \times 2 = 4$	$s^2G=KTG=$ $JKG/(r-1)(k-1)=$ $0,008/4 = 0,002$		
total	$JKT = 0,269$	r.k-1= $3.3-1=8$			

Kesimpulan: $f_{hitung} > F_{tabel}$ menandakan bahwa ketebalan produk *sintering acrylic* hijau tidak sama

B. Pengaruh speed dan layer

A.1 Acrylic hitam

Tabel 5.29 Data *acrylic* hitam pengaruh *speed* dan *layer*

	Metode 1	Metode2	Metode3	Total Baris
Speed60	1,600	1,740	1,860	5,200
Speed70	1,300	1,480	1,540	4,320
Speed80	1,280	1,380	1,480	4,140
Tot.Kolm	4,180	4,600	4,880	13,660

Tabel 5.30 Analisis varian *acrylic* hitam pengaruh *speed* dan *layer*

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 0,214	db numer1 $r-1=3-1=2$	$s^2B=KTB=$ $JKB/r-1=$ $0,214/2= 0,107$	$f_{hitung} =$ $KTB/KTG=$ $0,107/0,001=$ $= 185,6$	= 1 % db numer1 = 2 db denum= 4 f tabel = 18,00
Rata-rata kolom	JKK= 0,083	db numer2 $k-1=3-1=2$	$s^2K=KTK=$ $JKK/k-1=$ $0,083/2= 0,041$	$f_{hitung} =$ $KTK/KTG=$ $0,041/0,001=$ $= 71,6$	= 1 % db numer2 = 2 db denum= 4 f tabel = 18,00
Galat	JKG= 0,002	db denum $(r-1)(k-1)=$ $2 \times 2=4$	$s^2G=KTG=$ $JKG/(r-1)(k-1)=$ $0,002/4= 0,001$		
total	JKT= 0,300	r.k-1= $3 \times 3-1=8$			

Kesimpulan: $F_{hitung} > F_{tabel}$ menandakan bahwa ketebalan produk *sintering acrylic* hitam tidak sama.

B.2 Acrylic hijau

Tabel 5.31 Data *acrylic* hijau pengaruh *speed* dan *layer*

	Metode 1	Metode2	Metode3	Total Baris
Speed50	1,680	1,860	2,000	5,540
Speed60	1,380	1,520	1,700	4,600
Speed70	0,960	1,340	1,520	3,820
Tot.Kolm	4,020	4,72	5,220	13,960

Tabel 5.32 Analisis varian *acrylic* hijau pengaruh *speed* dan *layer*

Sumber Keragaman (SK)	Jlh Kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Rata-rata baris	JKB= 0,494	db numer1 r-1=3-1=2	$s^2B=KTB=$ $JKB/r-1=$ $0,494/2= 0,247$	fhitung = KTB/KTG= $0,247/0,006=$ $= 40,90$	= 1 % db numer1 = 2 db denum= 4 f tabel = 18,00
Rata-rata kolom	JKK= 0,242	db numer2 k-1=3-1=2	$s^2K=KTK=$ $JKK/k-1=$ $0,242/2 = 0,121$	fhitung = KTK/KTG= $0,121/0,006=$ $= 20,04$	= 1 % db numer2 = 2 db denum= 4 f tabel = 18,00
Galat	JKG= 0,024	db denum (r-1)(k-1)= 2x2=4	$s^2G=KTG=$ $JKG/(r-1)(k-1)=$ $0,024/4= 0,006$		
total	JKT= 0,761	r.k-1= 3.3-1=8			

Kesimpulan: Fhitung > Ftabel menandakan bahwa ketebalan produk *sintering acrylic* hijau tidak sama.

Hasil analisis proses *sintering*

Dari hasil analisis varian (ANOVA) untuk proses *sintering* diperoleh kesimpulan untuk material *acrylic* hitam dan *acrylic* hijau seperti tabel 5.33 di bawah ini.

Tabel 5.33 Hasil analisis varian pada proses *sintering*

Acrylic Hitam	Acrylic Hijau
Layer, tegangan dan arus tidak mempengaruhi proses <i>sintering</i> , terlihat dengan samanya rata-rata nilai ketebalan produk <i>sintering</i> (nilai Fhitung < Ftabel)	Layer, tegangan dan arus mempengaruhi proses <i>sintering</i> , terlihat dengan tidak samanya rata-rata nilai ketebalan produk <i>sintering</i> (nilai Fhitung > Ftabel)
Speed dan Layer mempengaruhi proses <i>sintering</i> , terlihat dengan tidak samanya rata-rata nilai ketebalan produk <i>sintering</i> (nilai Fhitung > Ftabel)	Speed dan Layer mempengaruhi proses <i>sintering</i> , terlihat dengan tidak samanya rata-rata nilai ketebalan produk <i>sintering</i> (nilai Fhitung > Ftabel)
Kesimpulan: Rata-rata parameter <i>speed</i>, tegangan, arus, dan <i>layer</i> mempengaruhi proses <i>sintering</i> (ketebalan produk <i>sintering</i>).	

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dalam penelitian yang sudah dilakukan dengan cara eksperimen dan simulasi ini dapat disimpulkan sebagai berikut :

- Kedalaman pemotongan dipengaruhi oleh faktor: kecepatan potong, pass, lintasan, hembusan udara, tegangan dan arus.
- Faktor hembusan udara mengurangi proses pemotongan benda kerja *acrylic* hitam dan *acrylic* hijau, karena dengan adanya hembusan udara mengakibatkan energy panas yang ada pada laser menjadi berkurang kemampuannya.
- Proses simulasi dan eksperimen pada system pemotongan memiliki error 1,01 mm.
- Ketebalan produk hasil proses *sintering* dipengaruhi oleh faktor : kecepatan potong, tegangan dan arus listrik, kenaikan nilai *layer* dan kenaikan nilai lintasan.

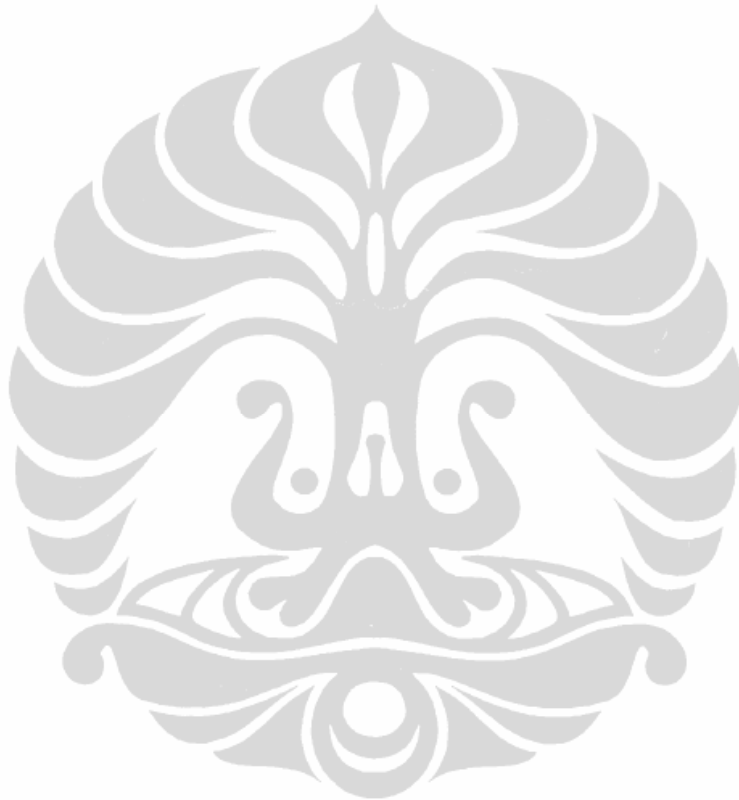
6.2 Saran

- Penelitian ini bisa menjadi dasar untuk pengembangan mesin laser *cutting* selanjutnya.
- Perlu dilakukan analisis untuk jenis material lain, agar lebih banyak lagi referensi yang bisa digunakan.
- Pengontrolan tegangan dan arus listrik harus lebih diperhatikan, mengingat kedua faktor ini berpengaruh terhadap kemampuan laser.
- Pada proses *sintering*, keakuratan nilai lapisan tepung pada setiap laser harus benar-benar diperhatikan.
- Mempergunakan *sweeper* selebar tempat wadah tepung, agar lapisan tiap *layer* rata dan tekanannya sama, sehingga produk yang sudah terbentuk posisinya tidak berubah.
- Ukuran besar butiran partikel tepung mesti seragam, agar ikatan sama dan memperkecil timbulnya rongga.

DAFTAR REFERENSI

- [1] <http://iroiro78.blogspot.com/2011/04/lebih-lanjut-tentang-laser-engraving.html>
- [2] Achmad Sa'roni,"Analisis Pengaruh Jenis Material Pada Mesin Rapid Prototyping Berbasis FDM", Skripsi-UI, Desember 2010.
- [3] Munasir.MS, "Radioaktif dan Sinar Katoda", Departemen Pendidikan Nasional, 2004.
- [4] Sugata Pikatan,"Laser", Seminar intern FT. Ubaya ,Januari 1991.
- [5] T.A. El-Taweel, A. M. Abdel-Maaboud, B. S. Azzam, A. E. Mohammad, "Parametric studies on the CO2 laser cutting of Kevlar-49 composite", Journal Advance Manufacturing Technology, februari 2008, Download tanggal 30 Agustus 2010.
- [6] 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, Download tanggal 30 Agustus 2010.
- [7] J. Lawrence, A.A.Peligrad, E.Zhou, L.Li, and D.Morton,"Prediction of Melt Depth in Selected Architectural Materials during High Power Diode Laser Treatment", University of Manchester Institute of Science and Technology.
- [8] M.Labudovic, D. HU.R.Kovacevic,"A Three Dimensional Model for Direct Laser Metal Powder Deposition and Rapid Prototyping", Journal Of Material Science, 2003.
- [9] <http://www.johns-company.com/index.php?lang=id&cat=395&month=2009-12&id=44752>
- [10] <http://www.ptgoldensun.com/showProductClass.php>
- [11] <http://express.redeyeondemand.com/SLS.aspx>.
- [12] <http://belalangtue.wordpress.com/2010/08/13/analisis-varian-anova-dengan-spss/>
- [13] www.thomasysg.staff.gunadarma.ac.id/Downloads/files/8194/ANOVA.pdf –
- [14] <http://skema-rangkaian-elektronika.blogspot.com/2009/08/rangkaian-power-supply-dc-2n3055.html>
- [15] <http://refractiveindex.info/?group=PLASTICS&material=PMMA>.

- [16] <http://www.astraproducts.com/info-acrylic-non-glare-sheet.asp>.
- [17] http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html.
- [18] http://www.machinist-materials.com/comparison_table_for_plastics.htm.
- [19] Ir.Sugeng Isdwiyani, MT, "Teknik Permesinan Lanjut", Teknik Mesin Politeknik Negeri Bandung, 2004.
- [20] Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid, "Manufakturing Engineering And Technology", Prentice Hall International, 2001.



DAFTAR LAMPIRAN

- Program file metlpool_depth1.m

```
clear all;
```

```
clc;
```

```
close all
```

```
win1=figure(...
```

```
    'units','points',...
```

```
    'position',[100 150 700 400],...
```

```
    'color',[.8 .8 .9],...
```

```
    'menubar','none',...
```

```
    'resize','off',...
```

```
    'numbertitle','off',...
```

```
    'name','Simulasi Moltenpool Depth');
```

```
frame1=uicontrol('parent',win1,...
```

```
    'units','points',...
```

```
    'position',[0 360 700 400],...
```

```
    'backgroundcolor',[.3 .3 .4],...
```

```
    'style','Frame');
```

```
frame1=uicontrol('parent',win1,...
```

```
    'units','points',...
```

```
    'position',[0 0 700 70],...
```

```
    'backgroundcolor',[.3 .3 .4],...
```

```
    'style','Frame');
```

```
label1=uicontrol('parent',win1,...
```

```
    'units','points',...
```



```
'position',[280 365 270 20],...  
'backgroundcolor',[.3 .3 .4],...  
'style','Text',...  
'horizontalalignment','left',...  
'string','Hitung Kedalaman Moltenpool',...  
'fontname','arial',...  
'fontsize',12,...  
'fontweight','bold',...  
'foregroundcolor',[1 1 1]);
```

```
label2=uicontrol('parent',win1,...  
'units','points',...  
'position',[20 320 180 15],...  
'backgroundcolor',[.8 .9 .9],...  
'style','Text',...  
'string','INPUT Variabel Absorptivity (A)',...  
'fontname','arial',...  
'fontsize',10);
```

```
label3=uicontrol('parent',win1,...  
'units','points',...  
'position',[10 300 100 15],...  
'backgroundcolor',[.8 .9 .9],...  
'style','Text',...  
'string','Koef. Refraction (n)',...  
'fontname','arial',...  
'fontsize',10);
```

```
label4=uicontrol('parent',win1,...  
'units','points',...  
'position',[10 280 100 15],...  
'backgroundcolor',[.8 .9 .9],...
```

```
'style','Text',...  
'string','Koef. Extinction (kl)',...  
'fontname','arial',...  
'fontsize',10);
```

```
label5=uicontrol('parent',win1,...  
    'units','points',...  
    'position',[20 240 180 15],...  
    'backgroundcolor',[.8 .9 .9],...  
    'style','Text',...  
    'string','INPUT Variabel Moltenpool Depth (Ym)',...  
    'fontname','arial',...  
    'fontsize',10);
```

```
label6=uicontrol('parent',win1,...  
    'units','points',...  
    'position',[10 220 100 15],...  
    'backgroundcolor',[.8 .9 .9],...  
    'style','Text',...  
    'string','Berat Jenis (p)',...  
    'fontname','arial',...  
    'fontsize',10);
```

```
label7=uicontrol('parent',win1,...  
    'units','points',...  
    'position',[10 200 100 15],...  
    'backgroundcolor',[.8 .9 .9],...  
    'style','Text',...  
    'string','Specific Heat (Cp)',...  
    'fontname','arial',...  
    'fontsize',10);
```

```
label8=icontrol('parent',win1,...  
    'units','points',...  
    'position',[10 180 100 15],...  
    'backgroundcolor',[.8 .9 .9],...  
    'style','Text',...  
    'string','Kond.Thermal (k)',...  
    'fontname','arial',...  
    'fontsize',10);
```

```
label9=icontrol('parent',win1,...  
    'units','points',...  
    'position',[10 160 100 15],...  
    'backgroundcolor',[.8 .9 .9],...  
    'style','Text',...  
    'string','Factor koreksi (C2)',...  
    'fontname','arial',...  
    'fontsize',10);
```

```
label10=icontrol('parent',win1,...  
    'units','points',...  
    'position',[10 140 100 15],...  
    'backgroundcolor',[.8 .9 .9],...  
    'style','Text',...  
    'string','Suhu leleh (Tm)',...  
    'fontname','arial',...  
    'fontsize',10);
```

```
label11=icontrol('parent',win1,...  
    'units','points',...  
    'position',[10 120 100 15],...  
    'backgroundcolor',[.8 .9 .9],...  
    'style','Text',...
```

```
'string','Diameter Laser (d)',...
'fontname','arial',...
'fontsize',10);
```

```
label12=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[10 100 100 15],...
'backgroundcolor',[.8 .9 .9],...
'style','Text',...
'string','Traverse Speed (v)',...
'fontname','arial',...
'fontsize',10);
```

```
label13=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[400 40 100 25],...
'backgroundcolor',[.8 .9 .9],...
'style','Text',...
'string','Moltenpool Depth >> Ym (meter)',...
'fontname','arial',...
'fontsize',10);
```

```
label14=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[560 40 100 15],...
'backgroundcolor',[.8 .9 .9],...
'style','Text',...
'string','Luas Moltenpool (Ssl)',...
'fontname','arial',...
'fontsize',10);
```

```
label15=uicontrol('parent',win1,...
```

```

'units','points',...
'position',[230 260 100 15],...
'backgroundcolor',[.8 .9 .9],...
'style','Text',...
'string','Dy Laser Awal (PL0)',...
'fontname','arial',...
'fontsize',10);

```

```

label16=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[230 200 100 15],...
'backgroundcolor',[.8 .9 .9],...
'style','Text',...
'string','Jari-jari beam (Rm)',...
'fontname','arial',...
'fontsize',10);

```

```

label17=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[230 140 100 15],...
'backgroundcolor',[.8 .9 .9],...
'style','Text',...
'string','Interval jari-jari (IP)',...
'fontname','arial',...
'fontsize',10);

```

```

edit1=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[110 300 90 15],...
'backgroundcolor',[1 1 1],...
'style','Edit',...

```

```
'string','0',...  
'fontname','arial',...  
'fontsize',10);
```

```
edit2=icontrol('parent',win1,...  
  'units','points',...  
  'position',[110 280 90 15],...  
  'backgroundcolor',[1 1 1],...  
  'style','Edit',...  
  'string','0',...  
  'fontname','arial',...  
  'fontsize',10);
```

```
edit3=icontrol('parent',win1,...  
  'units','points',...  
  'position',[110 220 90 15],...  
  'backgroundcolor',[1 1 1],...  
  'style','Edit',...  
  'string','0',...  
  'fontname','arial',...  
  'fontsize',10);
```

```
edit4=icontrol('parent',win1,...  
  'units','points',...  
  'position',[110 200 90 15],...  
  'backgroundcolor',[1 1 1],...  
  'style','Edit',...  
  'string','0',...  
  'fontname','arial',...  
  'fontsize',10);
```

```
edit5=icontrol('parent',win1,...
```

```

'units','points',...
'position',[110 180 90 15],...
'backgroundcolor',[1 1 1],...
'style','Edit',...
'string','0',...
'fontname','arial',...
'fontsize',10);

```

```

edit6=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[110 160 90 15],...
'backgroundcolor',[1 1 1],...
'style','Edit',...
'string','0',...
'fontname','arial',...
'fontsize',10);

```

```

edit7=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[110 140 90 15],...
'backgroundcolor',[1 1 1],...
'style','Edit',...
'string','0',...
'fontname','arial',...
'fontsize',10);

```

```

edit8=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[110 120 90 15],...
'backgroundcolor',[1 1 1],...
'style','Edit',...
'string','0',...

```

```
'fontname','arial',...  
'fontsize',10);
```

```
edit9=uicontrol('parent',win1,...  
    'units','points',...  
    'position',[110 100 90 15],...  
    'backgroundcolor',[1 1 1],...  
    'style','Edit',...  
    'string','0',...  
    'fontname','arial',...  
    'fontsize',10);
```

```
edit10=uicontrol('parent',win1,...  
    'units','points',...  
    'position',[410 20 80 15],...  
    'backgroundcolor',[1 1 1],...  
    'style','Edit',...  
    'string','0',...  
    'fontname','arial',...  
    'fontsize',10);
```

```
edit11=uicontrol('parent',win1,...  
    'units','points',...  
    'position',[580 20 60 15],...  
    'backgroundcolor',[1 1 1],...  
    'style','Edit',...  
    'string','0',...  
    'fontname','arial',...  
    'fontsize',10);
```

```
edit12=uicontrol('parent',win1,...  
    'units','points',...
```



```
'position',[230 240 100 15],...  
'backgroundcolor',[1 1 1],...  
'style','Edit',...  
'string','0',...  
'fontname','arial',...  
'fontsize',10);
```

```
edit13=uicontrol('parent',win1,...  
    'units','points',...  
    'position',[230 180 100 15],...  
    'backgroundcolor',[1 1 1],...  
    'style','Edit',...  
    'string','0',...  
    'fontname','arial',...  
    'fontsize',10);
```

```
edit14=uicontrol('parent',win1,...  
    'units','points',...  
    'position',[230 120 100 15],...  
    'backgroundcolor',[1 1 1],...  
    'style','Edit',...  
    'string','0',...  
    'fontname','arial',...  
    'fontsize',10);
```

```
grafik1=axes('parent',win1,...  
    'units','points',...  
    'position',[400 120 280 220],...  
    'xgrid','on',...  
    'ygrid','on',...  
    'xcolor',[0.4 0 .15],...
```

```
'ycolor',[0.4 0 .15],...
'fontsize',8,...
'color',[1 1 1]);
```

```
tomproses=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[80 30 80 15],...
'style','pushbutton',...
'callback','metpooldpth1',...
'string','Proses',...
'fontname','arial',...
'fontsize',10);
```

```
tomtutup=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[220 30 80 15],...
'style','pushbutton',...
'string','Tutup',...
'fontname','arial',...
'fontsize',10,...
'callback','close');
```

- **Program file metpooldpth1.m**

```
Refraction=str2num(get(edit1,'String'));
Extinction=str2num(get(edit2,'String'));
p=str2num(get(edit3,'String'));
Cp=str2num(get(edit4,'String'));
k=str2num(get(edit5,'String'));
C2=str2num(get(edit6,'String'));
```

```

Tm=str2num(get(edit7,'String'));
d=str2num(get(edit8,'String'));
v=str2num(get(edit9,'String'));

PL0=str2num(get(edit12,'String')); % daya Awal
Rm=d/2;
set(edit13,'string',num2str(Rm)); % Daya akhir
%PL1=str2num(get(edit13,'String')); % Daya akhir

IP=str2num(get(edit14,'String')); % interval daya
x=-Rm:IP:Rm;
%x=[PL0:IP:PL1];

A=(4*Refraction)/(((Refraction+1)^2)+(Extinction)^2); %
menghitung heat absorptivity
Ym=(2*A*PL0)/(p*Cp*C2*Tm*((k.*d*v).^0.5)); % menghitung
kedalaman meltpool
% Ym=(2*A*PL0)/(p*Cp*C2*Tm*((k.*d*v).^0.5)); % menghitung
kedalaman meltpool
b=2*pi*x;
c=4*(Ym.^2).*(x.^2)/(Rm^2);
d=(1+c).^(1/2);
f=abs(b.*d);
k=f(1)/Ym;
gbr=f./k;

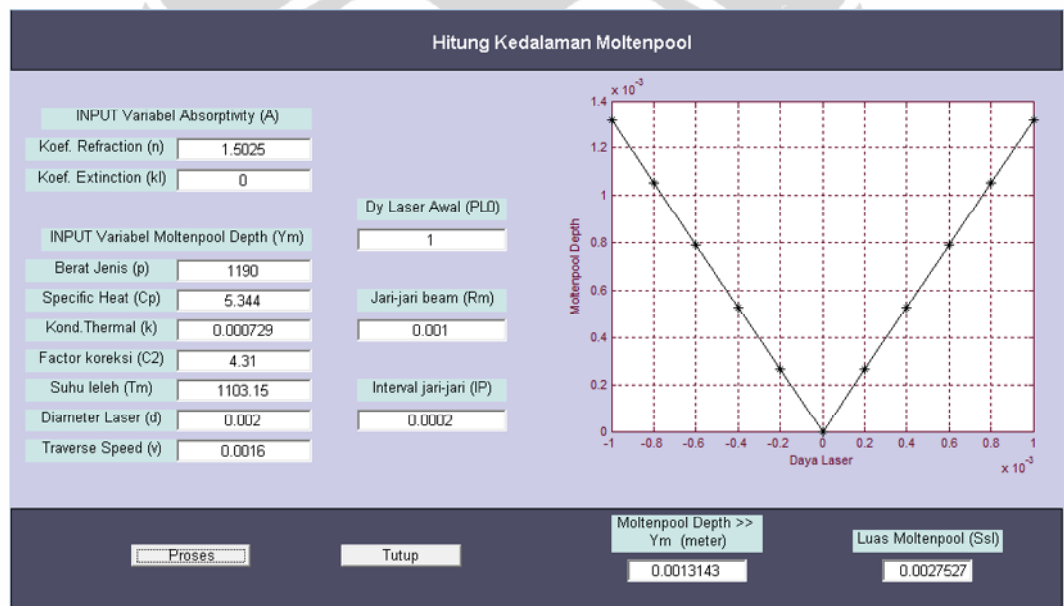
Ssl=4/3*(pi*d/2.*Ym); % menghitung luas meltpool
set(edit10,'string',num2str(Ym));
set(edit11,'string',num2str(Ssl));
set(win1,'CurrentAxes',grafik1);
Ym1=(-1*Ym);
plot(x,gbr,'*k-');

```

```
xlabel('Daya Laser');
ylabel('Moltenpool Depth');
```

```
set(grafik1,...
    'xgrid','on',...
    'ygrid','on',...
    'xcolor',[0.4 0 .15],...
    'ycolor',[0.4 0 .15],...
    'fontsize',8,...
    'color',[1 1 1]);
```

- **Tampilan GUI program untuk acrylic**





No.Lap. : R111313
Hal. 1 / 2

Laporan Pengujian

No. Laporan : R111313 Order No. : J1110184 Tanggal: 13 - 06 - 2011

Pelanggan : Universitas Indonesia
Fakultas Mesin, Kampus Baru Depok

Kontak Person : Bpk. Herwandi

Nama Sampel : 2 buah sampel produk Plastik dengan kode :
1. Acrylic Hitam
2. Acrylic Hijau

Penerimaan Sampel : 24 Mei 2011

Tanggal Pengujian : 08 Juni 2011

Jenis Pengujian : 1. Identifikasi Polimer dengan metoda FTIR (ASTM E 1252 – 98).
2. Analisa Komposisi dengan metode TGA (ASTM D 1131 – 98)

KONDISI PENGUJIAN

FTIR (*Fourier Transform Infra Red*)

Pengujian berdasarkan pada standar uji ASTM E1252-98. Preparasi sampel dilakukan dengan cara sampel diiris tipis. Selanjutnya sampel langsung dianalisis menggunakan FTIR dengan metode ATR.

TGA (*Thermal Gravimetric Analysis*)

Sampel ditimbang sekitar 17 - 18 mg dimasukan dalam *crucible*. *Crucible* berisi sampel ditempatkan pada *chamber* pengujian dengan program pemanasan dari 50°C hingga 600°C dengan kecepatan kenaikan temperatur 10°C/menit dengan kecepatan aliran gas nitrogen 50 ml/menit. Kemudian ditahan (*isothermic*) selama 5 menit pada suhu 600°C dan pemanasan dilanjutkan kembali hingga 900°C pada lingkungan gas oksigen dengan kecepatan aliran gas 50 ml/menit.

HASIL PENGUJIAN

FTIR

Hasil identifikasi material dengan metoda FTIR dapat dilihat pada spektra terlampir. Pada spektra sampel tersebut terlihat beberapa puncak khas yang diuraikan dalam tabel 1 di bawah ini.

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sampel yang diuji di STP, segala pengaduan sehubungan dengan pelayanan dapat disampaikan ke Manajer Mutu STP; dilarang menggandakan laporan ini tanpa persetujuan tertulis dari STP.

ORIGINAL

F-015,Ed.C,Rev:0

SENTRA TEKNOLOGI POLIMER - BPPT

Gedung 460, Kawasan PUSPIPTEK Tangerang Selatan 15314 - Banten Indonesia

Telp. (021) 756 3360 (Hunting) Fax. (021) 756 0057

Email. stpoffice@sentrapolimer.com www.sentrapolimer.com



TUV Rheinland®
CERT
ISO 9001

Universitas Indonesia

Tabel 1. Jenis material hasil identifikasi secara FTIR

No	Nama Sampel	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)	Jenis Material
1	Acrylic Hitam	2996; 2951; 2841; 1727; 1437; 1389; 1266; 1241; 1192; 1148; 1046; 990; 842; 752 dan 655	<i>Poly(methyl methacrylate)</i> (<i>PMMA</i>), Sesuai ref. no. 2122
2	Acrylic Hijau	2998; 2952; 2842; 1727; 1437; 1389; 1266; 1241; 1193; 1148; 1066; 990; 844; 752 dan 648	<i>Poly(methyl methacrylate)</i> (<i>PMMA</i>), Sesuai ref. no. 2122

TGA

Hasil analisa komposisi dengan TGA dapat dilihat pada tabel 2 di bawah.

Tabel 2. Komposisi sampel hasil pengujian dengan TGA

No	Nama Sampel	Komposisi (%)			
		Material-1	Material-2	Residu Organik	Residu Anorganik
1	Acrylic Hitam	99,5701	---	0,3989	---
2	Acrylic Hijau	3,5452	96,4282	---	---

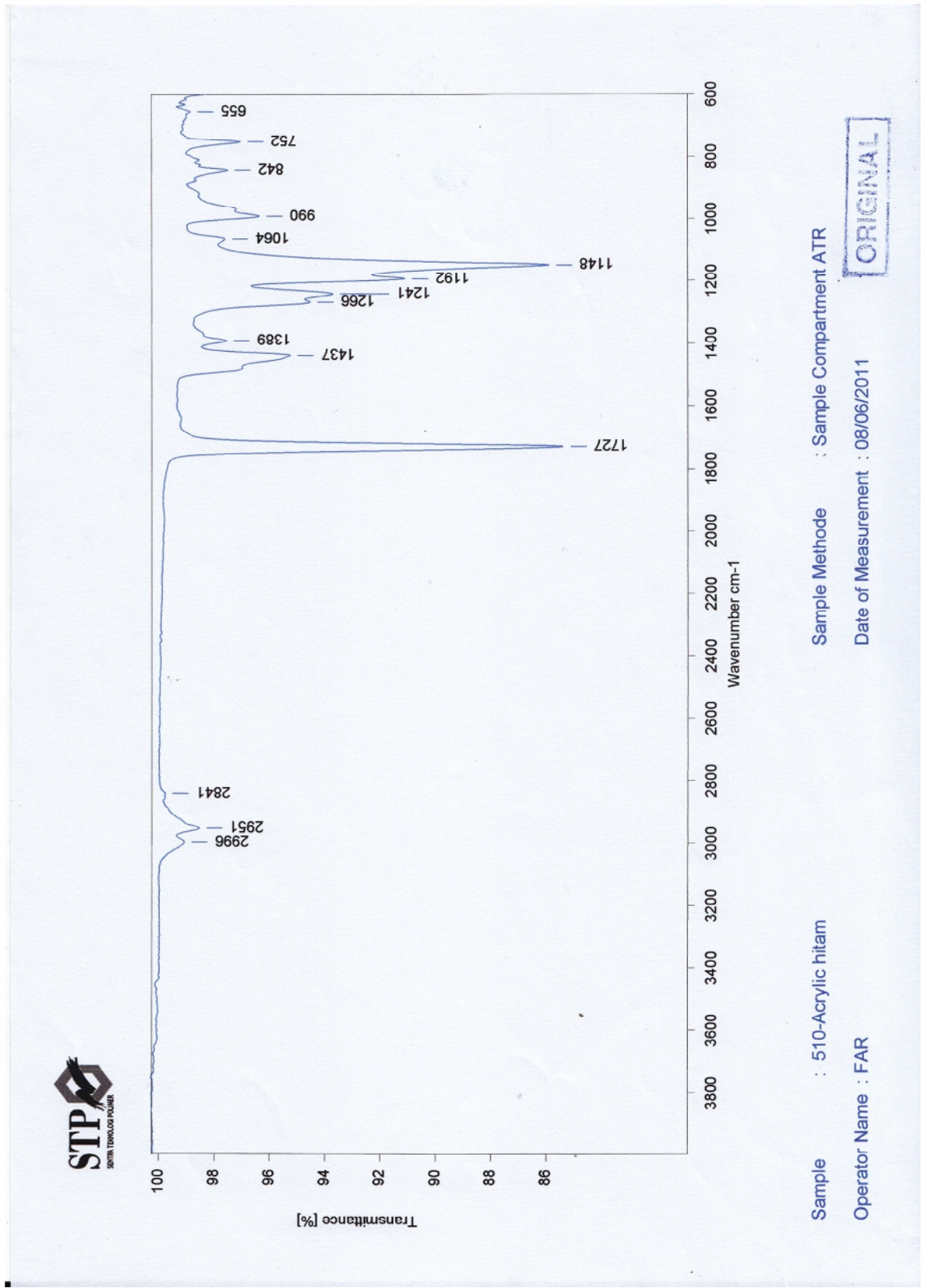
Manajer Teknik Pengujian Kimia,



Heru Santoso

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sampel yang diuji di STP, segala pengaduan sehubungan dengan pelayanan dapat disampaikan ke Manajer Mutu STP; dilarang menggandakan laporan ini tanpa persetujuan tertulis dari STP.

ORIGINAL



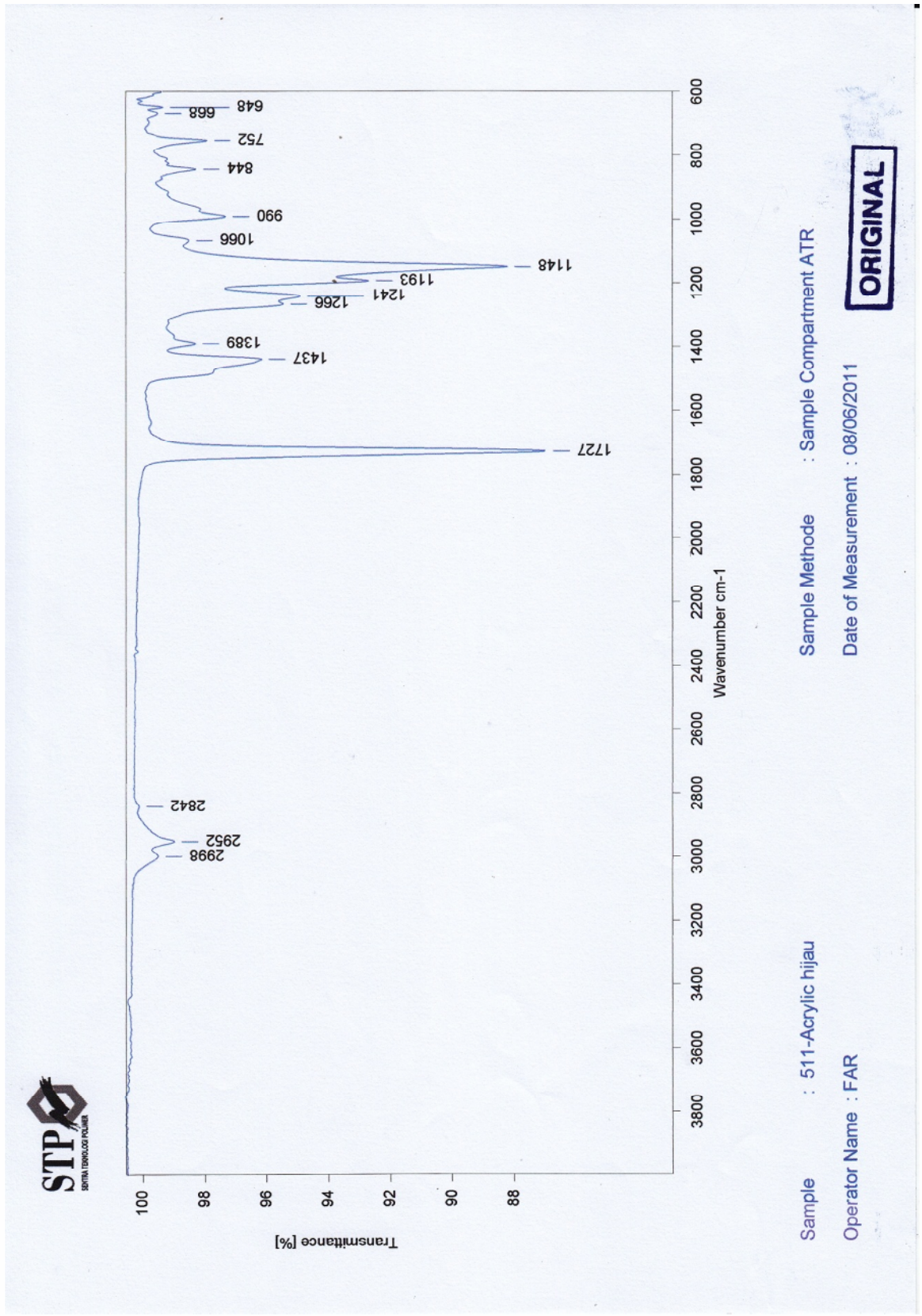
Sample Methode : Sample Compartment ATR

Date of Measurement : 08/06/2011

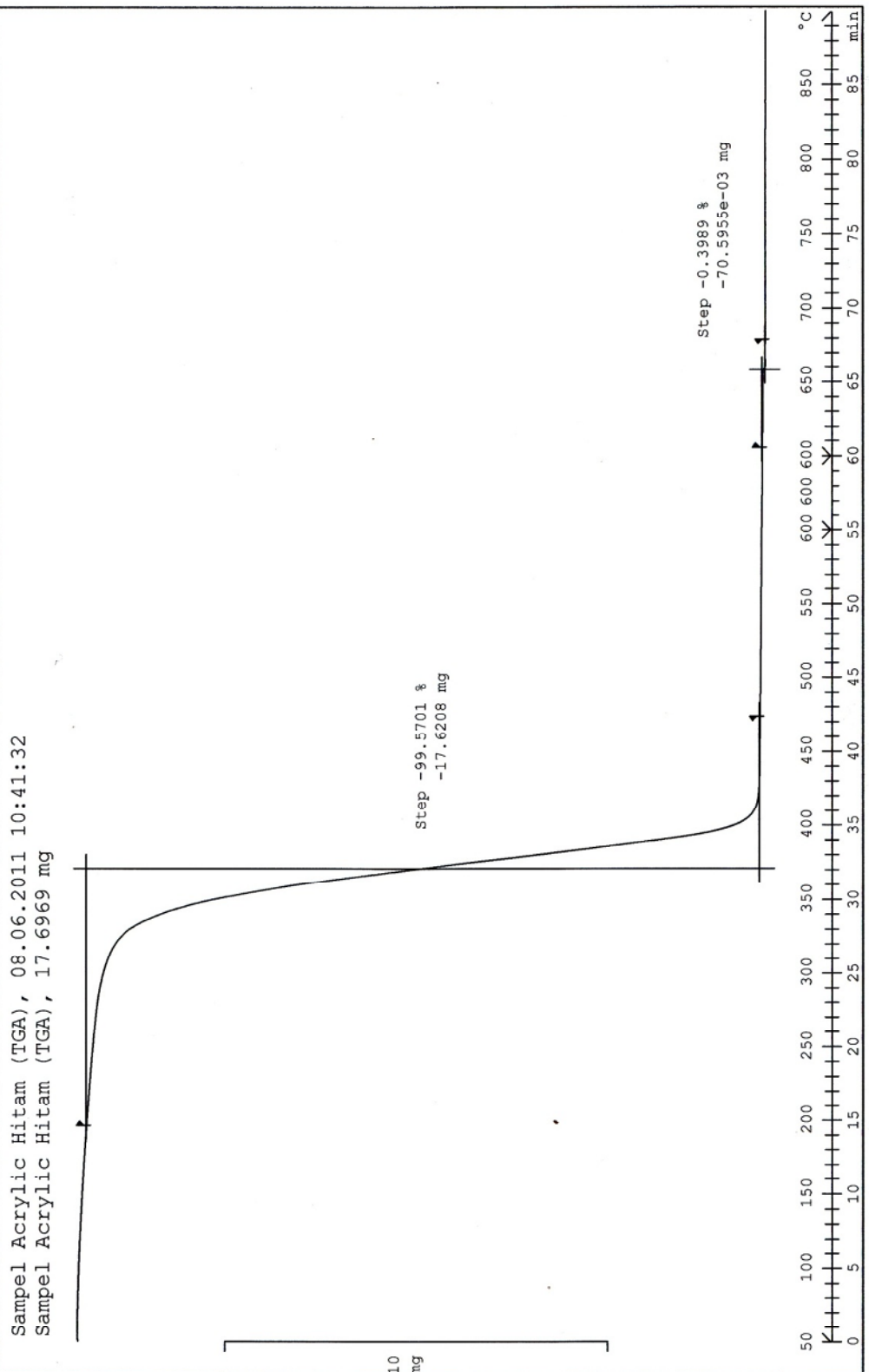
Sample : 510-Acrylic hitam

Operator Name : FAR

ORIGINAL



J1110184 Sample Acrylic Hitam (TGA) 08.06.2011 15:45:10

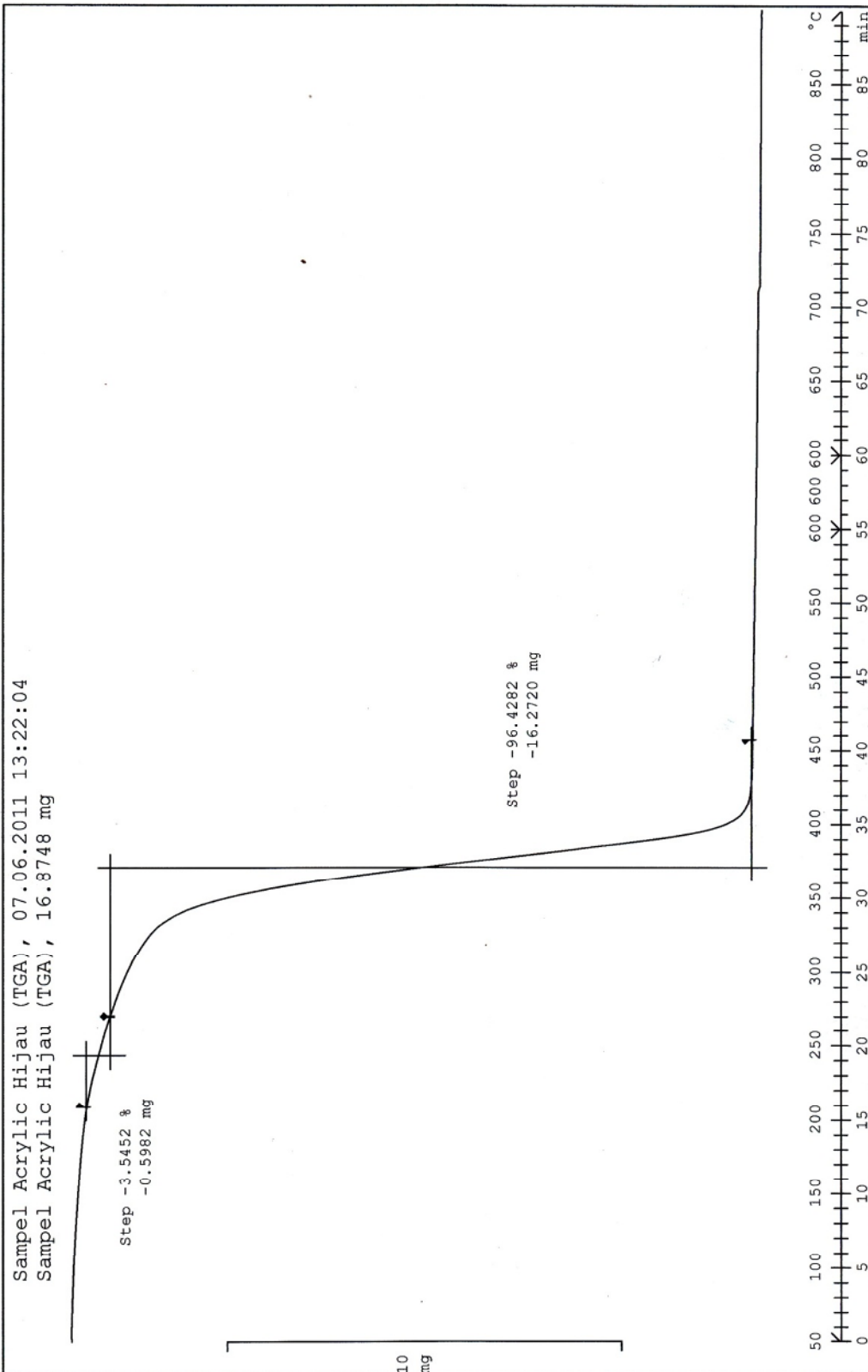


METTLER TOLEDO STAR System

ORIGINAL

Sentra Teknologi Polymer: METTLER

J1110184 Sample Acrylic Hijau (TGA) 08.06.2011 15:45:21



METTTLER TOLEDO STAR® System

ORIGINAL

Sentra Teknologi Polimer: METTLER

Tabel 4.1 Harga gaya potong ekstrapolatif $K_{s1.1}$ untuk proses bubut dengan jenis pahat karbida

Material benda kerja	Kekuatan tarik (σ) Atau kekerasan brinell (N/mm ²) atau BHN	Gaya potong spesifik referensi ($K_{s1.1}$); N/mm ²
Baja struktur		
- C 0.35 %	500	1500
- C 0.35 ÷ 0.6 %	500 ÷ 700	1650
- C 0.6 ÷ 1 %	700 ÷ 1000	1800
Baja paduan (kondisi annealed)	700 ÷ 850	1650
	850 ÷ 1000	1800
	1000 ÷ 1400	1950
	1400 ÷ 1800	2170
Baja Manganese (annealed)	500 ÷ 800	1650
Baja cor		
- GS 40	500	1300
- GS 50	500 ÷ 650	1420
- GS 55	650	1570
Besi cor	BHN <200	960
	BHN >200	1300
White cast iron	BHN <500	2020
	BHN >500	2250
Annealed cast iron	-	1050
Tembaga	-	1750
Perunggu	-	1200
Kuningan	-	530
Paduan Al & Mg	-	370
Plastik (ebonite, fiber)	-	190

Tabel 22.4 General recommendation for turning operations

Workpiece material	Cutting tool	General-purpose starting conditions			Range for roughing and finishing		
		Depth of cut mm (in)	Feed mm/rev (in/rev)	Cutting speed m/min (ft/min)	Depth of cut mm (in)	Feed mm/rev (in/rev)	Cutting speed m/min (ft/min)
Aluminium alloys, free machining	Uncoated	1.5 – 5.0	0.45	490	0.25-8.8	0.08-0.62	200-670
	Carbide	(0.06– 0.20)	(0.018)	(1600)	(0.01-0.35)	(0.003-0.025)	(650-2000)
High silicon	Polycrystalline	"	"	530	"	"	365-915
	Diamond	"	"	(1700)	"	"	(1200-3000)
Copper alloys	Uncoated	1.5 – 5.0	0.25	260	0.4-7.51	0.15-0.75	105-535
	Carbide	(0.06– 0.20)	(0.010)	(850)	(0.015-0.3)	(0.006-0.03)	(350-1750)
Thermoplastic and thermoset	Tin-coated	1.2	0.12	170	0.12-5.0	0.08-0.35	90-230
	Carbide	(0.10)	(0.005)	(550)	(0.005-0.20)	(0.003-0.015)	(300-750)