



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN SISTEM ROBOT DENGAN 5 DERAJAT
KEBEBASAN UNTUK APLIKASI PENGELASAN**

SKRIPSI

JEDIEL BILLY RAMADHAN

0706267111

FAKULTAS TEKNIK

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

DEPOK

JANUARI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN SISTEM ROBOT DENGAN 5 DERAJAT
KEBEBASAN UNTUK APLIKASI PENGELASAN**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik

JEDIEL BILLY RAMADHAN

0706267111

FAKULTAS TEKNIK

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

DEPOK

JANUARI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Jediel Billy Ramadhan

NPM : 0706267111

Tanda Tangan :



Tanggal : 20 Januari 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Jediel Billy Ramadhan
NPM : 0706267111
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : PENGEMBANGAN SISTEM ROBOT
DENGAN 5 DERAJAT KEBEBASAN UNTUK
APLIKASI PENGELASAN

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ario Sunar Baskoro, ST, MT., MEng.

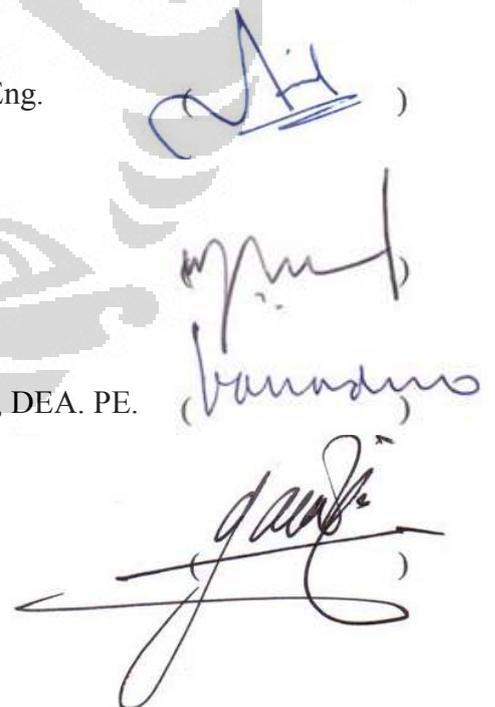
Penguji : Ir. Henky Suskito Nugroho, M.T.

Penguji : Dr. Ir. R. Danardono Agus Sumarsono, DEA. PE.

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

Ditetapkan di : Depok (Universitas Indonesia)

Tanggal : 20 Januari 2012



Handwritten signatures of the examiners and supervisor, including the signature of Dr. Ario Sunar Baskoro, Ir. Henky Suskito Nugroho, Dr. Ir. R. Danardono Agus Sumarsono, and Dr. Ir. Gandjar Kiswanto.

ABSTRAK

Nama : Jediel Billy Ramadhan

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Pengembangan Sistem Robot Dengan 5 Derajat Kebebasan Untuk Aplikasi Pengelasan

Perkembangan teknologi manufaktur modern untuk mampu merespon pasar yang sangat dinamis dengan memamerkan produk yang short life-cycle diperlukan peralatan dan proses manufaktur yang flexible serta agile cukup tinggi. Kebutuhan produksi pengelasan yang memerlukan flexible serta agile agar dapat memproses benda kerja yang kompleks dibutuhkan integrasi teknologi permesinan yang sudah ada seperti permesinan multi-axis. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sebuah robot gantry dengan 5 derajat kebebasan berserta sistem kontrol yang mampu menggerakkan kelima lengan robot hanya menggunakan satu buah mikrokontroller. Dalam penelitian ini digunakan sebuah komputer yang bertindak sebagai pengolah data. Komputer digunakan untuk mengolah data dan mikrokontroller untuk memberikan perintah pergerakan kelima lengan robot tersebut. Data yang diolah pada komputer berupa nilai dalam x,y,z dan i,j,k yaitu posisi dan orientasi. Dari data ini akan dibuat interpolasi kurva bezier dan hasil interpolasi ini digunakan agar mendapatkan kinematika inverse yang ditujukan untuk menggerakkan stepper motor pada lengan robot tersebut supaya end effector pada lengan robot mampu berada di posisi dan orientasi yang diinginkan. Dari hasil penelitian ini didapatkan eror posisi pergerakan pada lengan sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z akibat dari input yang telah diberikan.

Kata kunci:

Multi-axis, Robot Las, Robot Gantry

ABSTRACT

Name : Jediel Billy Ramadhan

Study Program : Mechanical Engineering

Title : Development of Robotic System Using 5 Degree of Freedom
For Welding Application

The development of modern manufacturing technology to respond to a very dynamic market with products exhibiting very short life-cycles needful tools and manufacturing process is flexible and quite agile high. Welding production needs that require flexible and agile in order to process the complex workpiece machining needed integration of existing technologies such as multi-axis machining. This study aims to design a gantry robot with 5 degrees of freedom along with a control system capable of moving 5 joint of robot arm using only one microcontroller. This study used a computer that acts as a data processor. Computers are used to process data and commands microcontroller to provide 5 joint movement of the robot arm. Data are processed on a computer in the form of a value in the x, y, z and i, j, k is the position and orientation. From this data will be made bezier curve interpolation and interpolation results are used to obtain inverse kinematics are intended to drive the stepper motors on the robot arm end effector to the robot arm can be in the desired position and orientation. From the results of this study found an error in the position of the movement arm x-axis, y-axis and z-axis as a result of the input that has been given.

Keywords:

Multi-axis, Robots Welding, Gantry Robots

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Saya sadar betul bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, penyusunan skripsi ini sangatlah sulit bagi saya. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu dan ketiga adik saya yang telah mendoakan dan memberikan dukungan moril serta materiil;
2. Dr. Ario Sunar Baskoro, S.T., M.T., M. Eng dan Dr.Ir.Gandjar Kiswanto, M.Eng selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktunya untuk menyemangati saya dan menginspirasi saya dalam pengerjaan skripsi ini;
3. Dr. Ir. R. Danardono Agus Sumarsono, DEA. PE., dan Ir. Henky Suskito Nugroho, M.T selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktunya untuk menguji dan memberikan masukan pada saat sidang skripsi, sehingga tulisan ini dapat menjadi lebih baik;
4. Dr.Ir.Harinaldi, M.Eng selaku kepala Departemen Teknik Mesin;
5. Mas Yasin selaku karyawan Departemen Teknik Mesin yang telah membantu pembuatan rangka konstruksi untuk robot;
6. Mas Nurul selaku karyawan Departemen Teknik Mesin yang telah membantu membongkar laptop saya dan menyelamatkan data – data skripsi;
7. Sahabat saya, Teguh Santoso, S.T., dan Ahmad Zakiyudin, S.T., yang telah memberikan pengetahuan elektronik dan membantu pemesanan barang – barang keperluan skripsi;

8. Abdul Jabar, Andi Nata, Achmad Handriyanto, dan Agus Siswanta yang telah meminjamkan motor untuk membeli komponen – komponen elektronik;
9. Anton Royanto Ahmad yang telah meminjamkan dan membantu pada saat proses pengeprintan;
10. Seluruh teman dalam Tim Robot Universitas Indonesia (TRUI) atas segala pengalaman dan pengetahuan yang saya dapat di TRUI;
11. Teman – teman seperjuangan saya mesin 2007;
12. Teman – teman satu kosan saya yang telah memberikan ide untuk saya dalam pengerjaan robot;

Depok, Januari 2012

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Jediel Billy Ramadhan

NPM : 0706267111

Program Studi : Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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

PENGEMBANGAN SISTEM ROBOT DENGAN 5 DERAJAT KEBEBASAN UNTUK APLIKASI PENGELASAN

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 20 Januari 2012

Yang menyatakan



(Jediel Billy Ramadhan)

ix

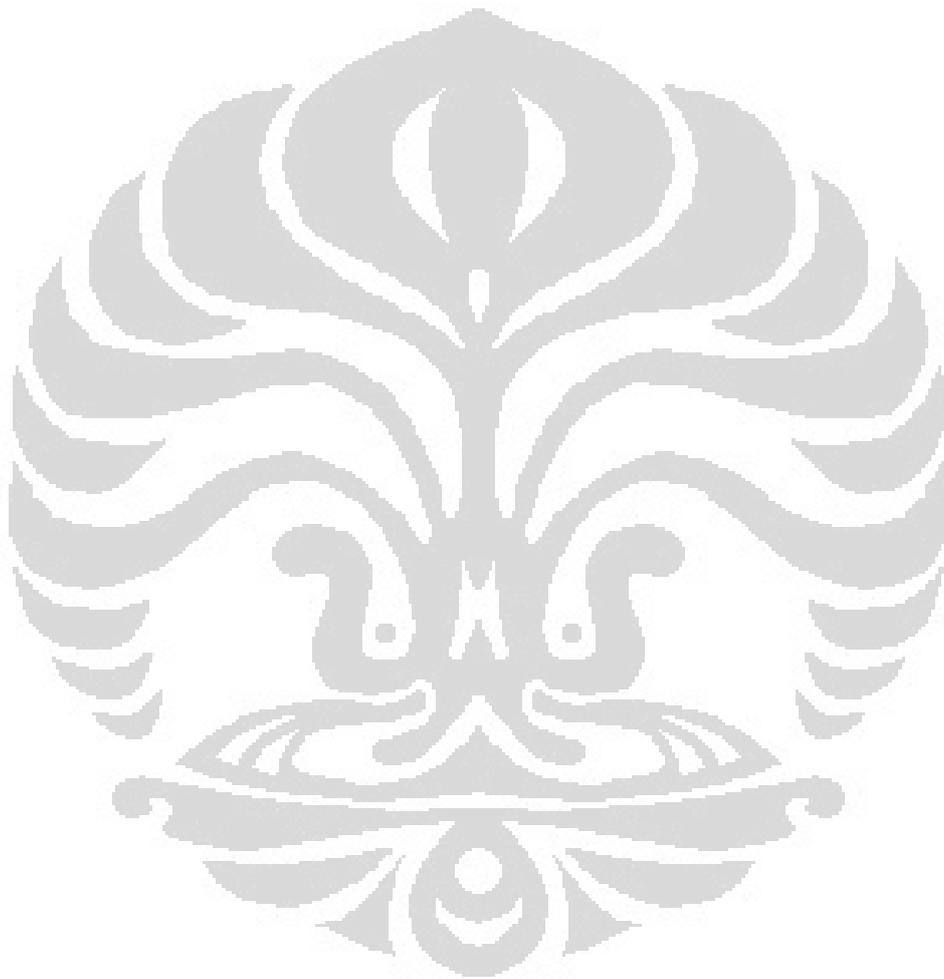
Universitas Indonesia

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR ISTILAH	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Metodologi Penelitian	5
1.5.1 Studi Literatur	5
1.5.2 Perancangan Alat	6
1.5.3 Evaluasi dan Simulasi	6
1.5.4 Manufaktur Alat	6
1.5.5 Pengujian dan Analisa Keseluruhan Fungsi Robot	7
1.6 Sistematika Penulisan	7
BAB 2 PERANCANGAN MEKANIKAL ROBOT	9
2.1 Alur Perancangan	9
2.1.1 Analisa Kebutuhan	10
2.1.2 Detail Desain	19
2.1.3 Simulasi Pembebanan	20
2.2 Manufaktur	29
2.2.1 Uji Coba	29
2.2.2 Simulasi Stress Analysis	30

2.3	Pemilihan Aktuator.....	34
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM KONTROL.....		38
3.1	SENSOR.....	38
3.1.1	Limit Switch.....	38
3.2	Kendali Digital	40
3.2.1	Mikrokontroler	40
3.2.2	Driver Stepper Motor	44
3.2.3	Driver Elektrik Brake.....	47
3.2.4	Modul LCD (Liquid Crystal Display).....	48
3.2.5	Power Supply	49
3.2.6	Sistem Kontrol Keseluruhan	49
BAB 4 PEMBANGUNAN <i>SOFTWARE INTERFACE</i>.....		51
4.1	PROGRAM PADA MIKROKONTRTOLLER.....	51
4.1.1	Embedded System.....	51
4.1.2	Program Pada Code Vision AVR.....	52
4.2	Program Pada PC.....	54
4.2.1	Interpolasi Bezier	55
4.2.2	Invers Kinematik.....	55
4.2.3	Program Pada Turbo C.....	59
BAB 5 PENGUJIAN ROBOT 5 DERAJAT KEBEBASAN		62
5.1	pergerakan sumbu-x	62
5.1.1	Penghitungan Jumlah Step Dari Jarak Antar Limit Switch	62
5.1.2	Uji <i>Linearity</i>	66
5.1.3	Uji Posisi Aktual Pada Sumbu-x.....	68
5.1.4	Analisa Pergerakan Sumbu-x.....	70
5.2	Pergerakan Sumbu-y dan Pergerakan Sumbu-z.....	70
5.2.1	Penghitungan Jumlah Step Dari Jarak Antar Limit Switch	71
5.2.2	Uji <i>Linearity</i> Pada Sumbu-y dan Sumbu-z	74
5.2.3	Uji Posisi Aktual Pada Sumbu-y dan Sumbu-z	77
5.2.4	Analisa Pergerakan Sumbu-y dan Sumbu-z.....	80
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN PENELITIAN LEBIH LANJUT		82
6.1	Kesimpulan.....	82
6.1.1	Sistem Kerja Pada Lengan Robot Sumbu-x.....	82
6.1.2	Sistem Kerja Pada Lengan Sumbu-y	83
6.1.3	Sistem Kerja Pada Lengan Sumbu-z.....	85

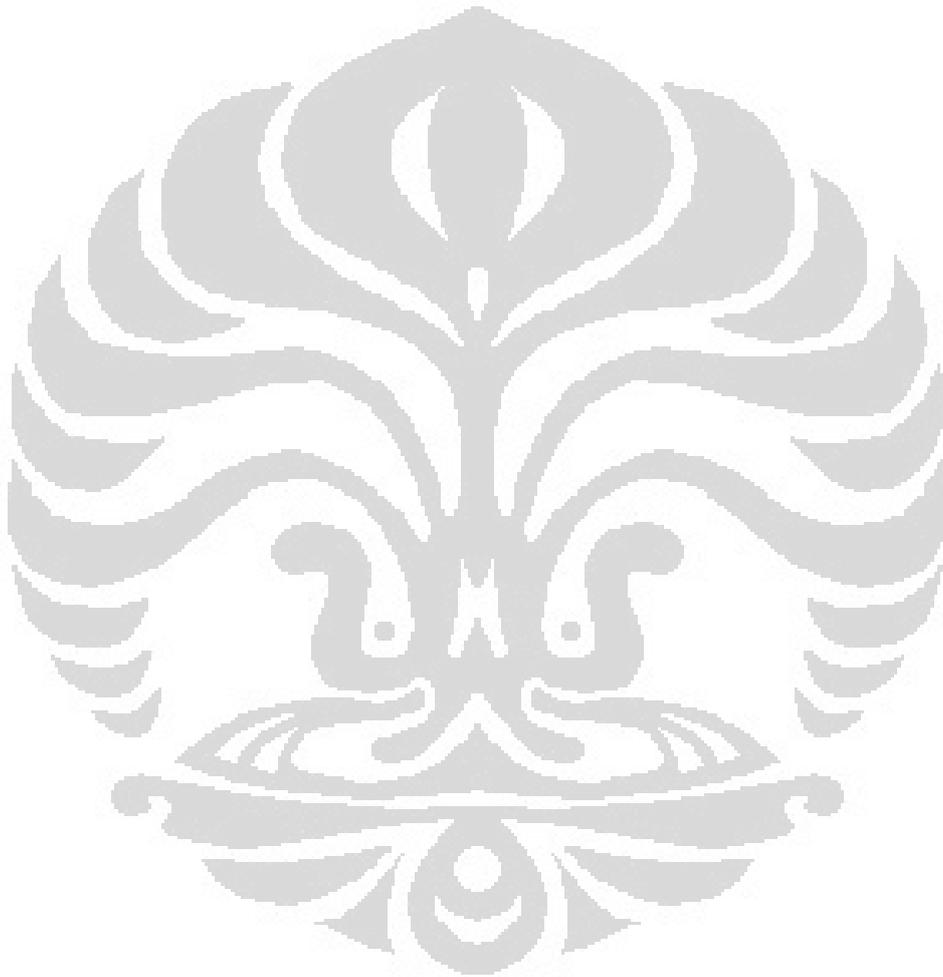
6.2	Saran.....	87
DAFTAR PUSTAKA		88
DAFTAR ACUAN		89
LAMPIRAN		90



DAFTAR GAMBAR

<i>Gambar 1.1 : Zona Robot Industri [1]</i>	1
<i>Gambar 1.2 : Las titik pada mobil menggunakan robot industri.</i>	2
<i>Gambar 1.3 : Robot Gantry untuk Adhesive Dispensing,</i>	3
<i>Gambar 1.4 Rancangan Sistem Keseluruhan</i>	4
<i>Gambar 2.1 : Pendekatan Concurrent Engineering</i>	10
<i>Gambar 2.2 : Robot Gantry 5 Derajat Kebebasan,</i>	10
<i>Gambar 2.3 : Stepper Motor, Sumber: Courtesy Ebay</i>	11
<i>Gambar 2.4 : Linear Guideway dan Ballscrew,</i>	11
<i>Gambar 2.5 : Elektrik Break pada Robot 5 Derajat Kebebasan</i>	12
<i>Gambar 2.6 : Kabel koneksi 42HB60-2, Nema 23 Unipolar Motor</i>	13
<i>Gambar 2.7 : Nema 23 Unipolar Motor yang digunakan</i>	13
<i>Gambar 2.8 : Grafik Frequency-Torque Nema 23 Unipolar Motor</i>	13
<i>Gambar 2.9 : SM-072-0060-KN, Nema 23 Unipolar</i>	14
<i>Gambar 2.10 : Susunan Utama Ballscrew dan Leadscrew,</i>	15
<i>Gambar 2.11 : Konsep Desain Awal</i>	19
<i>Gambar 2.12 : Pengembangan Dari Konsep Desain Sampai Detail Desain</i>	20
<i>Gambar 2.13 : Beban Terpusat dan Terdistribusi</i>	22
<i>Gambar 2.14 : Beban Diklasifikasikan Menurut Lokasi dan Metode</i>	23
<i>Gambar 2.15 : Robot 5 Derajat Kebebasan</i>	24
<i>Gambar 2.16 : Simulasi Pembebanan Pada Rangka</i>	25
<i>Gambar 2.17 : Simulasi Pembebanan Pada Jembatan Sumbu-Y</i>	26
<i>Gambar 2.18 : Simulasi Pembebanan Pada Tiang Sumbu-Z</i>	27
<i>Gambar 2.19 : Simulasi Pembebanan Pada Dudukan Aksis-4</i>	28
<i>Gambar 2.20 : Simulasi Pembebanan Pada Poros Penghubung</i>	29
<i>Gambar 2.21 : Simulasi Analisa Stress Pada Rangka Konstruksi</i>	30
<i>Gambar 2.22 : Simulasi Analisa Stress Pada Jembatan Sumbu-Y</i>	31
<i>Gambar 2.23 : Simulasi Analisa Stress Pada Tiang Sumbu-Z</i>	32
<i>Gambar 2.24 : Simulasi Analisa Stress Pada Dudukan Aksis-4</i>	33
<i>Gambar 2.25 : Simulasi Analisa Stress Pada Poros Penghubung</i>	34
<i>Gambar 2.26 : Gaya-gaya Yang Bekerja Pada Ballscrew</i>	35
<i>Gambar 2.27 : Gaya-gaya Yang Bekerja Pada End Effector</i>	36
<i>Gambar 3.1 : Limit Switch</i>	38
<i>Gambar 3.2 : Limit Switch Pada Robot 5 Derajat Kebebasan</i>	39
<i>Gambar 3.3 : Cara Penggunaan Limit Switch</i>	39
<i>Gambar 3.4 : Blok Diagram ATmega 2560v</i>	41
<i>Gambar 3.5 : Arsitektur Atmega 2560v</i>	42
<i>Gambar 3.6 : Skematik ATmega 2560v</i>	43
<i>Gambar 3.7 : Expansion Board Atmega 2560v Tampak Belakang</i>	44
<i>Gambar 3.8 : Expansion Board Atmega 2560v Tampak Depan</i>	44
<i>Gambar 3.9 : Spesifikasi SLA7062M</i>	45
<i>Gambar 3.10 : IC SLA7062M</i>	46
<i>Gambar 3.11 : Blok Diagram SLA7062M</i>	46

<i>Gambar 3.12 : Skematik SLA7062M.....</i>	<i>47</i>
<i>Gambar 3.13 : PCB Layout Stepper Motor Driver</i>	<i>47</i>
<i>Gambar 3.14 : Skematik L298D</i>	<i>48</i>
<i>Gambar 3.15 : LCD 20 x 4</i>	<i>49</i>
<i>Gambar 3.16 : Power Supply 5VDC dan 24VDC.....</i>	<i>49</i>
<i>Gambar 3.17 : Sistem Kontrol Keseluruhan.....</i>	<i>50</i>
<i>Gambar 4.1 : Output Hasil Eksekusi Dilihat Secara Aktual</i>	<i>52</i>
<i>Gambar 4.2 : Kuadratik Kurva Bezier</i>	<i>55</i>
<i>Gambar 4.3 : Arah Pergerakan Robot.....</i>	<i>55</i>
<i>Gambar 4.4 : Flowchart Pergerakan Robot.....</i>	<i>57</i>



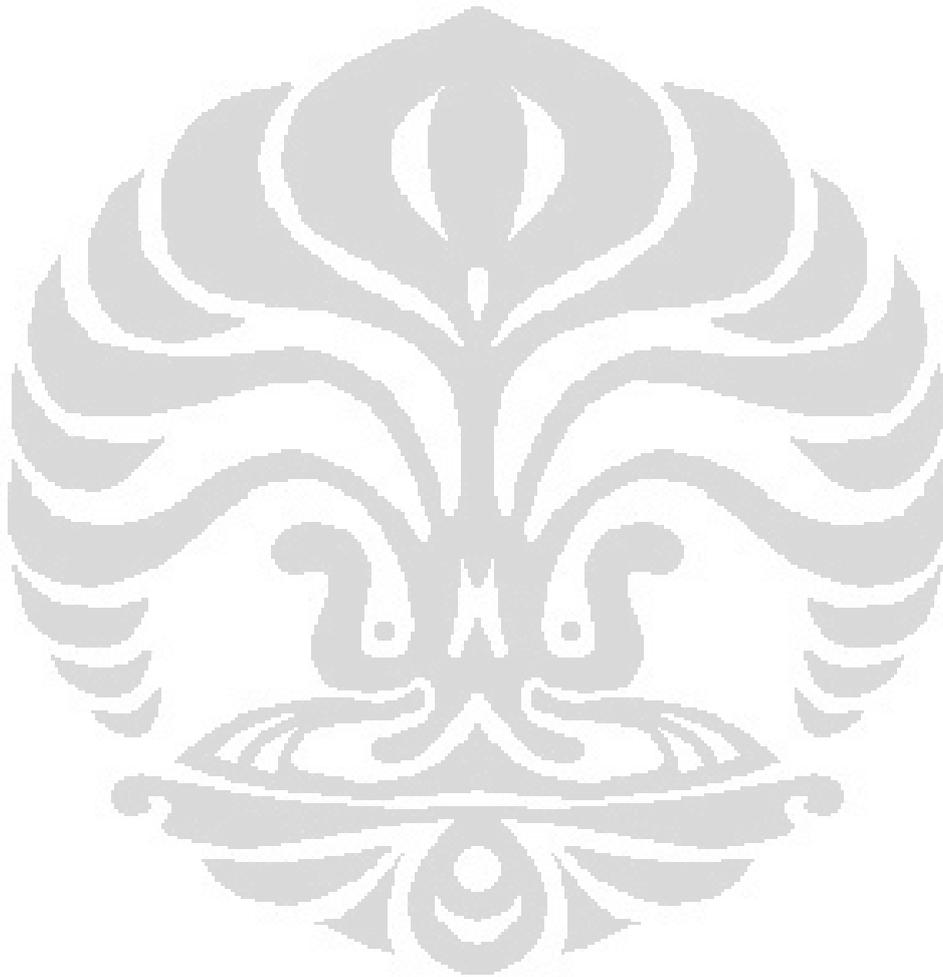
DAFTAR TABEL

<i>Tabel 2.1 : Data Teknis Ballscrew dan Nut</i>	15
<i>Tabel 2.2 : Data Teknis Linear Guideway dan Block</i>	16
<i>Tabel 2.3 : Data Material Aluminium</i>	17
<i>Tabel 2.4 : Data Material Besi Tuang</i>	18
<i>Tabel 2.5 : Data Material Stainless Steel</i>	18
<i>Tabel 3.1 : Spesifikasi Atmega 2560v</i>	40
<i>Tabel 5.1 : Perhitungan Jumlah Step Dari Jarak Limit Switch</i>	64
<i>Tabel 5.2 : Pengujian Linearity dari 10 mm – 200 mm</i>	67
<i>Tabel 5.3 : Pengujian Posisi Aktual Terhadap Posisi Teoritis</i>	68
<i>Tabel 5.4 : Perhitungan Jumlah Step Dari Jarak Limit Switch Pada Sumbu-y</i> ..	71
<i>Tabel 5.5 : Perhitungan Jumlah Step Dari Jarak Limit Switch Pada Sumbu-z</i> ..	73
<i>Tabel 5.6 : Pengujian Linearity dari 10 mm – 200 mm</i>	75
<i>Tabel 5.7 : Pengujian Linearity dari 800 step – 16000 step</i>	76
<i>Tabel 5.8 : Pengujian Posisi Aktual Terhadap Posisi Teoritis Pada Sumbu-y</i> ..	78
<i>Tabel 5.9 : Pengujian Posisi Aktual Terhadap Posisi Teoritis Pada Sumbu-z</i> ...	79



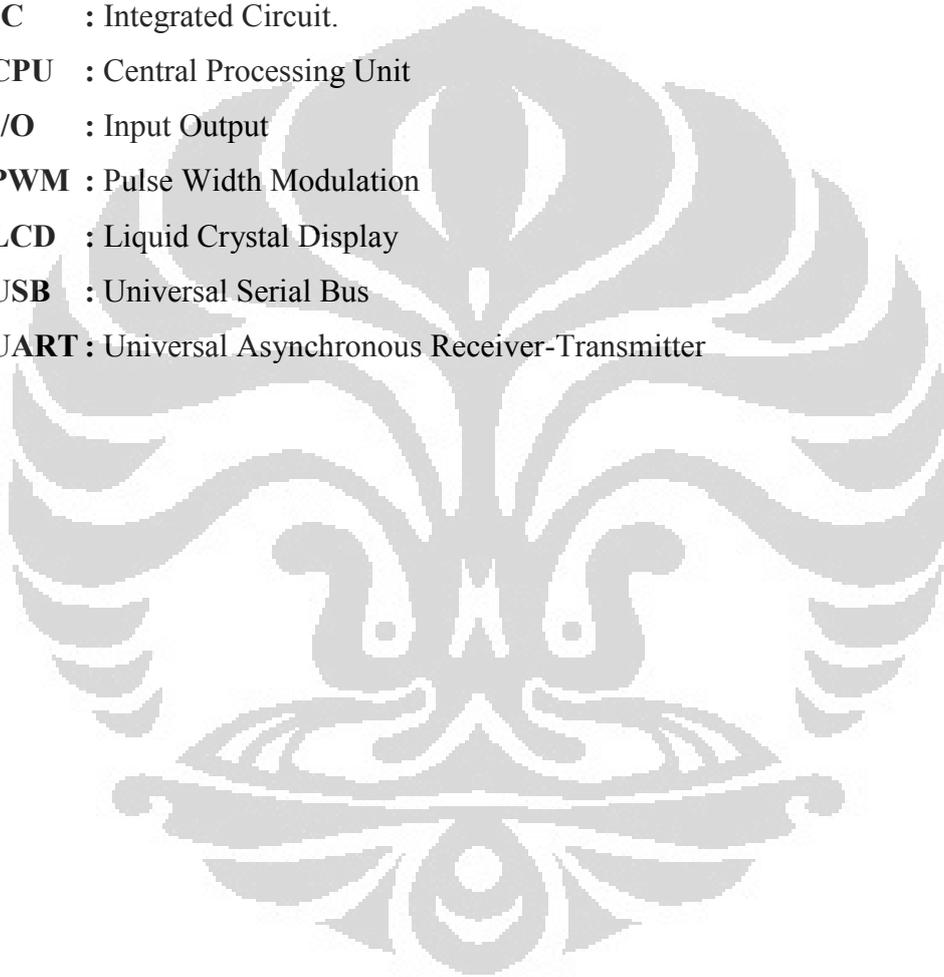
DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran :	Gambar Teknik Robot 5 Derajat Kebebasan.....	90
------------	--	----



DAFTAR ISTILAH

- ISO** : International Organization for Standardization.
DOF : Degree of Freedom.
DC : Direct Current.
NC : Normally Close.
NO : Normally Open.
IC : Integrated Circuit.
CPU : Central Processing Unit
I/O : Input Output
PWM : Pulse Width Modulation
LCD : Liquid Crystal Display
USB : Universal Serial Bus
UART : Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

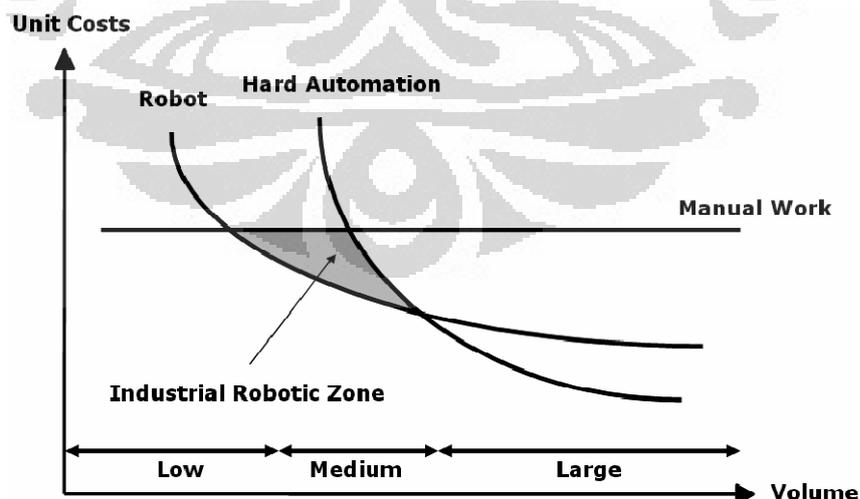


BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

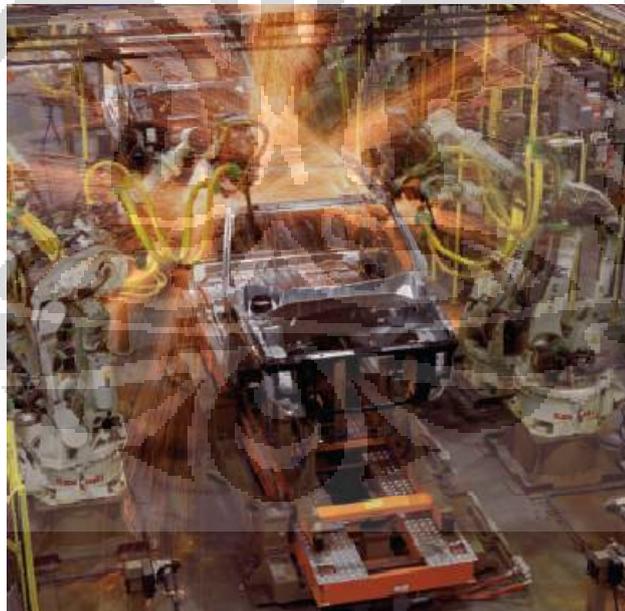
Saat ini, manufaktur modern menghadapi dua tantangan utama: yaitu, kualitas lebih dengan harga lebih rendah dan kebutuhan untuk meningkatkan produksi di pasaran. Kedua hal tersebut merupakan prasyarat untuk menjaga *manufacturing plants* di negara-negara maju, untuk menghadapi persaingan dari negara-negara yang memiliki *lowsalary*, seperti China. Karakteristik lain yang sangat penting dari sistem manufaktur adalah *flexibility* dan *agility* dari proses manufaktur itu sendiri, karena saat ini industri harus mampu untuk merespon pasar yang sangat dinamis dengan memamerkan produk yang *short life-cycle* karena kecenderungan akan fashion dan juga kompetisi di-era globalisasi [1]. Akibatnya, perusahaan manufaktur perlu menanggapi kebutuhan pasar secara efisien, dan menjaga agar produk tetap kompetitif di pasaran. Hal ini memerlukan proses manufaktur yang sangat efisien dan terkontrol, dimana fokus utamanya adalah pada *automation*, *computers*, dan *software*. Tujuan akhirnya adalah untuk mencapai sistem manufaktur yang *semi-autonomus*, yaitu sistem yang sangat *automated* dan bekerja hanya memerlukan sedikit campur tangan operator (Gambar 1.1).



Gambar 1.1 : Zona Robot Industri [1]

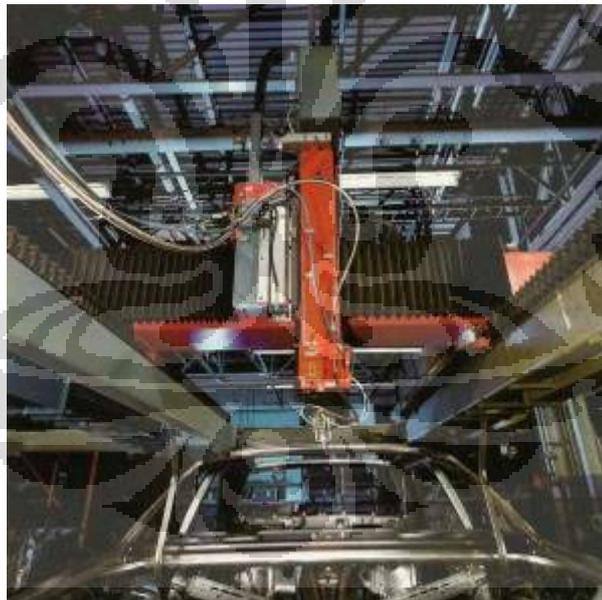
Untuk mencapai sistem *semi-autonomus* tersebutlah bukanlah hal yang sulit untuk di era sekarang. Dunia robotik sudah berkembang begitu pesat sejak diperkenalkan pada awal 60-an oleh J. Engelberger, sehingga pekerjaan yang dulunya dilakukan secara konvensional oleh operator, sekarang ini sudah dikerjakan oleh robot untuk mencapai sistem tersebut. Robot muncul sebagai hasil dari kombinasi dua teknologi: yaitu, *teleoperators*, dan *Computer Numerical Control* (CNC) dari mesin frais. *Teleoperators* dikembangkan selama Perang Dunia II untuk menangani bahan radioaktif, sedangkan CNC dikembangkan untuk meningkatkan presisi yang diperlukan untuk pembuatan suatu produk baru [2].

Robot pada industri merupakan komponen penting dari industri pada hari ini dan bahkan lebih penting lagi pada industri di masa depan. Permintaan untuk penggunaan robot berasal dari potensi dari robot itu sendiri yang fleksibel dan *intelligent machine* yang dapat melakukan tugas secara berulang-ulang dengan biaya yang dapat diterima dan kualitas tinggi. Industri yang paling aktif dalam aplikasi robot adalah industri otomotif dan minat yang besar paling besar untuk pengelasan, operasi perakitan, dan material *handling* (Gambar 1.2).



Gambar 1.2 : Las titik pada mobil menggunakan robot industri. Sumber: Courtesy of Ford Motor Co.

Robot industri yang banyak digunakan adalah robot artikulasi dan robot gantry. Robot artikulasi sudah banyak orang mengetahuinya karena bentuknya yang hampir menyerupai lengan. Robot gantry atau disebut juga dengan robot *linear cartesian* (Gambar 1.3). Robot gantry biasanya digunakan untuk sistem yang besar dalam aplikasi *pick* dan *place*, tetapi ada juga yang menggunakan robot gantry untuk aplikasi pengelasan ataupun aplikasi yang lainnya. Sistem robot gantry memiliki keuntungan dari *working area* dan posisi akurasi yang lebih baik. Posisi akurasi adalah kemampuan robot untuk menempatkan bagian dengan benar. Robot gantry yang dirancang dan di desain pada penelitian ini adalah Robot Gantry dengan 5 Aksis, yaitu terdiri dari tiga *prismatik joint* dan dua *revolute joint*. Dengan adanya tiga *prismatik joint* dan dua *revolute joint* ini, maka robot memiliki lima aksis atau lima derajat kebebasan (DOF) dalam pergerakan dan perubahan orientasi *end effector*. Kelima aksis tersebut adalah translasi *end effector* pada arah sumbu *x*, *y*, dan *z* relatif terhadap koordinat *base*; dan perubahan orientasi *roll* dan *pitch*.



Gambar 1.3 : Robot Gantry untuk Adhesive Dispensing, Source: Courtesy American Robot

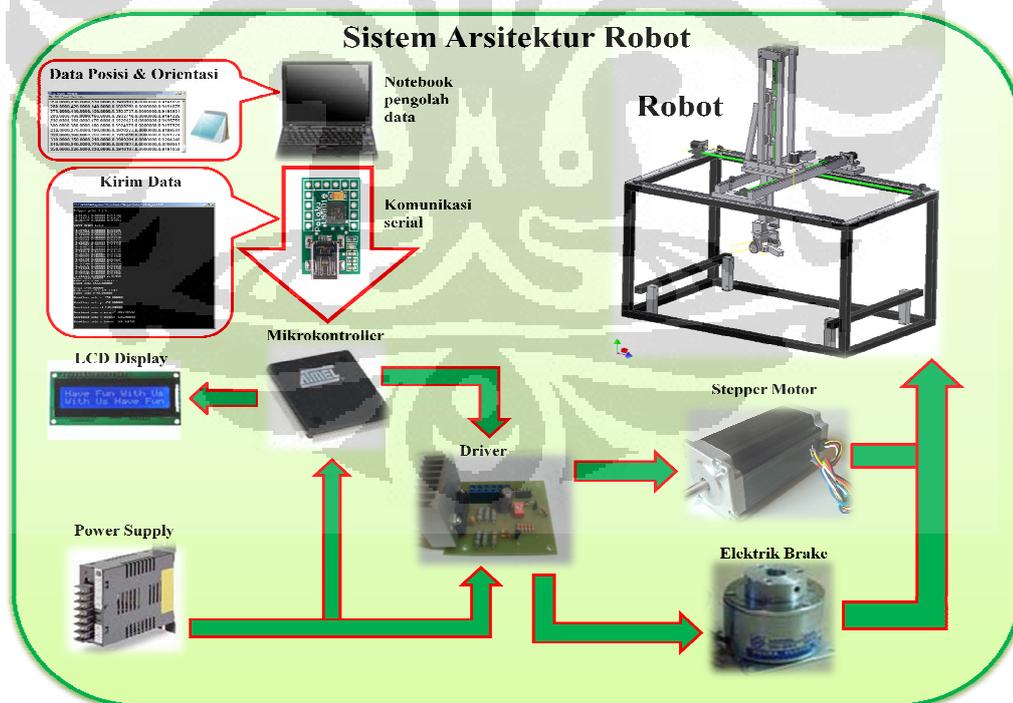
Di negara-negara berkembang, seperti negara Indonesia, penggunaan robot masih kurang untuk industri. Oleh karena itu, untuk menghasilkan produk-produk dengan hasil efisien dan waktu cepat Laboratorium Manufaktur DTM FTUI

Universitas Indonesia

mencoba merancang dan mendesain robot gantry untuk keperluan industri dengan skala laboratorium yang fungsinya untuk melakukan pengelasan dan serta mengembangkan *controller*, dan *software* dalam perancangannya.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Sebuah robot gantry dengan lima derajat kebebasan didesain dan dirancang sesuai dengan kebutuhan untuk pengelasan skala laboratorium. Perancangan tersebut dimulai dari desain mekanikal, perhitungan stress analisis, desain sistem kontrol, simulasi sistem kontrol, dan desain *software*. Semua itu dilakukan secara bertahap dan penuh perhitungan. Sehingga, hasil akhirnya robot tersebut dapat bergerak sesuai dengan posisi dan orientasi. Posisi dan orientasi ini berasal dari file *cutter location* (CL-File) jalur pengelasan yang dibaca dan diolah datanya oleh *personal computer* (PC) yang nanti hasilnya akan dikirimkan melalui komunikasi UART dari PC ke mikrokontroler. Mikrokontroler ini yang akan menggerakkan semua *actuator* pada robot.



Gambar 1.4 Rancangan Sistem Keseluruhan

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini merupakan bagian dari proyek riset yang bertujuan untuk mengembangkan sebuah prototipe robot gantry dengan 5 derajat kebebasan, yang tujuan akhirnya adalah untuk melakukan pengelasan dengan sistem *automation* menggunakan sensor vision. Oleh karena itu, penelitian ini dikhususkan untuk Rancang Bangun Robot 5 Aksis serta pengembangan sistem *controller* yang nantinya akan digabungkan dengan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan mengenai Identifikasi dan Pemilihan Jalur Pengelasan menggunakan Mesin *Vision*.

1.4 BATASAN MASALAH

Skripsi ini membahas mengenai perancangan mekanikal, elektrikal sebagai sistem kontrol, *embedded system*, perancangan perangkat lunak untuk *interface* pengolahan data pada PC yang nantinya dikirim ke mikrokontroler, dan pengujian gerakan untuk pada lengan *prismatic joint*. Pengolahan data tersebut berupa pembacaan CL-File yang berisikan posisi dan orientasi jalur pengelasan, yang nantinya posisi dan orientasi tersebut diolah melalui proses interpolasi tiga titik. Interpolasi yang digunakan adalah interpolasi bezier pada ruang tiga dimensi. Setelah dilakukan interpolasi, data diolah kembali untuk mendapatkan inverse kinematik yang nantinya hasil perhitungan data tersebut digunakan sebagai acuan pergerakan *actuator*. Pengolahan data secara keseluruhan dilakukan oleh PC. Sedangkan hasil pengolahan data, nantinya dikirim melalui komunikasi UART ke mikrokontroler untuk menggerakkan robot. Pada mikrokontroler dilakukan sistem multi *tasking* untuk menggerakkan kelima derajat kebebasan dengan menggunakan *embedded system*. *Embedded system* yang digunakan adalah CVAVR dan FreeRTOS. Sedangkan untuk mikrokontroler, digunakan ATMEGA 2560v dari ATMEL *Corporetation*.

1.5 METODOLOGI PENELITIAN

1.5.1 Studi Literatur

Studi literatur dalam penelitian ini adalah studi literatur di bidang perancangan mekanikal, khususnya pada topik beban dan reaksi tumpuan pada

konstruksi; tegangan dan regangan; serta pembebanan dan perhitungan kekuatan elemen mesin. Studi literatur lain adalah di bidang robotik dan CAD, khususnya mengenai inverse kinematik dan *geometric modelling* untuk pembuatan *bezier curve*. Untuk studi mengenai *embedded system*, literatur yang digunakan bersumber dari *tutorial-tutorial* yang disediakan produsen ATMEL. Sedangkan, untuk pembangunan *software* untuk *interface*, sumber literatur yang digunakan adalah *tutorial-tutorial* dari *User Manual*. Untuk pengembangan sistem kontrol robot berupa *interface* dari *actuator* ke mikrokontroler atau sering disebut dengan *driver* motor, studi literatur yang dilakukan adalah mencari melalui forum-forum robotika.

1.5.2 Perancangan Alat

Perancangan alat dibagi menjadi dua bagian: yaitu, perancangan mekanika alat dan perancangan sistem kontrol. Untuk perancangan mekanika alat, desain dibantu menggunakan *software* CAD, yaitu: Autodesk Inventor. Perancangan mekanika alat ini dibangun sesuai dengan prinsip *Design for Manufacturability, Assembly and Dissassembly* (DFMAD) sehingga memudahkan untuk proses *trouble-shooting*. Tujuan utama perancangan mekanika alat adalah untuk memperoleh kemampuan gerakan dari masing-masing *actuator*, yakni sumbu x, y, dan z relatif terhadap *end effector*. Sedangkan untuk perancangan sistem kontrol, desain dibantu menggunakan *software* CAD, yaitu: EAGLE. Perancangan sistem kontrol ini dibangun untuk mengontrol gerakan dari masing-masing *actuator* agar gerakan yang diperintahkan sesuai dengan yang seharusnya.

1.5.3 Evaluasi dan Simulasi

Pada tahap ini rancangan dari mekanika alat dan sistem kontrol dilakukan evaluasi simulasi dengan bantuan *software* CAD dan CAE agar berkurangnya faktor kegagalan yang diakibatkan oleh *human error*. Evaluasi dan simulasi ini dilakukan secara bertahap dan melalui pendekatan teoritis.

1.5.4 Manufaktur Alat

Pada tahap ini komponen-komponen mekanika alat dan komponen sistem kontrol yang sesuai dengan spesifikasi desain yang telah ditentukan sebelumnya

pada tahapan perancangan, dilakukan proses produksi dan proses perakitan. Proses produksi dilakukan hanya dilakukan untuk komponen mekanika. Sedangkan untuk proses perakitan dilakukan pada komponen mekanika dan juga sistem kontrol. Serta pembangunan *software* pada PC untuk *interface* ke mikrokontroler tak juga ketinggalan.

1.5.5 Pengujian dan Analisa Keseluruhan Fungsi Robot

Pada tahap ini robot dilakukan pengujian sistem gerakan, dan pengujian sistem kontrol. Dari hasil pengujian tersebut dilakukan evaluasi apakah robot sudah dapat bekerja sesuai dengan yang diinginkan atau belum. Jika belum sesuai dengan yang diinginkan, maka robot tersebut terjadi kesalahan. Kesalahan tersebut yang nantinya akan dianalisa. Jika kesalahan tersebut terjadi akibat faktor dari dalam, maka dilakukan kalibrasi gerakan dengan penambahan faktor kesalahan pada *software interface*.

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

BAB 1. PENDAHULUAN

Bab ini terdiri dari latar belakang masalah, tujuan penelitian, perumusan masalah, pembatasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB 2. PERANCANGAN MEKANIKAL ROBOT

Bab ini menjelaskan tentang proses perancangan mekanikal robot, dimulai dari proses desain sampai dengan manufaktur. Pada tahapan desain, proses diawali dengan melihat ketersediaan material dan komponen yang ada di pasaran. Setelah melihat ketersediaan tersebut barulah, dilakukan proses desain dan juga dilakukan proses simulasi untuk mencari *stress analysis*. Proses simulasi dilakukan pada *software* Autodesk Inventor. Sedangkan, untuk stepper motor dilakukan uji coba dengan pengambilan data.

BAB 3. PERANCANGAN SISTEM KONTROL ROBOT

Pada bab ini menjelaskan tentang proses perancangan sistem kontrol, dimulai dari proses pembuatan skematik sampai dengan proses *wiring*. Pada tahapan pembuatan skematik, proses diawali dengan pembuatan mikrokontroler. Pembuatan mikrokontroler itu sendiri sudah ada yang pernah membuatnya, sehingga tidak perlu pembuatan skematik. Sedangkan untuk *interface* dari

Universitas Indonesia

mikrokontroler ke stepper motor ada yang disebut dengan *driver* motor. Untuk *driver* motor sendiri dilakukan pembuatan skematik dengan referensi dari *datasheet* komponennya.

BAB 4. PEMBANGUNAN *SOFTWARE INTERFACE* PADA PC

Penulisan selanjutnya adalah menjelaskan mengenai pembangunan *software* yang dilakukan menggunakan bahasa C. *Compiler* yang digunakan untuk pembangunan *software* ini adalah Turbo C. Pada tahapan ini diawali dengan pembacaan CL-File yang berisikan posisi dan orientasi, lalu dilakukan proses pemilihan dan penyimpanan sementara dalam *array*. Setelah dilakukan proses pemilihan dan penyimpanan, langkah selanjutnya adalah pembuatan interpolasi dan perhitungan inverse kinematik yang lebih detailnya akan dijelaskan pada bagian perhitungan inverse kinematik. Pada proses akhir pembangunan *software* akan dijelaskan mengenai proses komunikasi UART dari mikrokontroler ke PC. Pada penulisan ini juga akan disinggung mengenai proses pemberian pulsa ke stepper motor dan perhitungan perubahan pulsa yang dikonversikan menjadi perubahan jarak.

BAB 5. PENGUJIAN ROBOT 5 DERAJAT KEBEBASAN

Sistematika penulisan selanjutnya adalah pembahasan mengenai proses pengujian yang bertujuan memperoleh besaran eror yang terjadi selama pengujian sedang berlangsung. Dari data-data besaran eror tersebut akan dilakukan analisa untuk mengetahui *repeatability* dan *responsibility* dari robot lima derajat kebebasan.

BAB 6. KESIMPULAN DAN SARAN PENELITIAN LEBIH LANJUT

Penutup penulisan ini adalah Bab Kesimpulan dan Saran Penelitian Lebih Lanjut. Pada bab ini akan dijelaskan mengenai perbaikan perancangan dalam hal bentuk dan pemilihan material, perancangan proses pemesinan agar diperoleh hasil yang sesuai toleransi, perancangan sistem kontrol, dan peranti keras pendukung lainnya yang lebih memadai.

BAB 2

PERANCANGAN MEKANIKAL ROBOT

2.1 ALUR PERANCANGAN

Alur perancangan pada Rancang Bangun Robot dan Pengembangan Sistem Kontrol Robot 5 Derajat Kebebasan (PPRR) Untuk Robot Las menerapkan pendekatan *concurrent engineering*. *Concurrent engineering* adalah salah satu metode dalam perancangan yang melibatkan seluruh bidang ilmu yang bersangkutan pada setiap langkah perancangan, baik itu langkah teknis seperti analisa desain, maupun langkah non-teknikal desain seperti analisa kebutuhan [3]. Cara pendekatan ini dapat mengurangi terjadinya kesalahan pada suatu langkah perancangan yang dapat mengakibatkan proses harus kembali ke langkah yang sebelumnya. Sebagai contoh kesalahan pada Pengembangan Sistem Robot Dengan 5 Derajat Kebebasan Untuk Aplikasi Pengelasan adalah apabila proses manufaktur seperti *drilling* dan *milling* yang tidak sesuai dengan toleransi yang kita inginkan, maka akan terjadi ketidak - lurusan dan menyebabkan kerusakan pada alat tersebut. Subbab berikut akan memaparkan secara singkat langkah-langkah yang dilakukan untuk Pengembangan Sistem Robot Dengan 5 Derajat Kebebasan Untuk Aplikasi Pengelasan berdasarkan pendekatan *concurrent engineering* (Gambar 2.1).



Gambar 2.1 : Pendekatan Concurrent Engineering

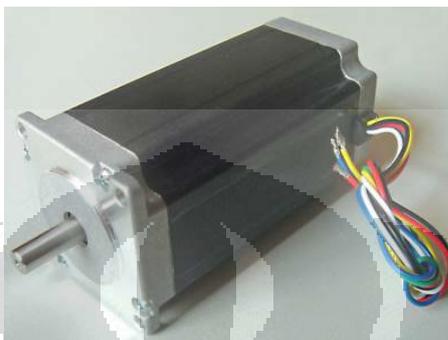
2.1.1 Analisa Kebutuhan

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada BAB 1 Pendahuluan tentang kebutuhan akan produk-produk dengan hasil yang efisien dan waktu cepat, maka dari itu Laboratorium manufaktur mencoba untuk merancang suatu robot untuk pengelasan agar dapat memproses benda kerja yang kompleks dan memerlukan fleksibilitas dalam gerakannya.

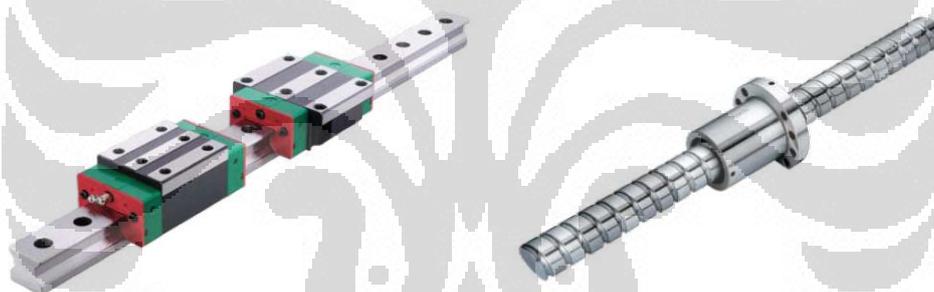


Gambar 2.2 : Robot Gantry 5 Derajat Kebebasan, Sumber: Courtesy American Robot

Untuk Rancang Bangun Robot 5 Derajat Kebebasan ini, dibutuhkan lima buah gerakan yang berbeda arah seperti (Gambar 2.2). Oleh karena itu, untuk mendapatkan kelima gerakan tersebut dibutuhkan lima buah 11ctuator. Aktuator yang digunakan adalah stepper motor (Gambar 2.3). Sedangkan untuk membantu pergerakan, dibutuhkan *ballscrew* dan *Linear Guideway* (Gambar 2.4).

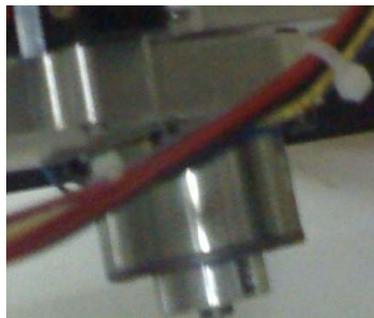


Gambar 2.3 : Stepper Motor, Sumber: Courtesy Ebay



Gambar 2.4 : Linear Guideway dan Ballscrew, Sumber: Courtesy Hiwin

Pergerakan yang dibantu oleh *ballscrew* dan *Linear Guideway* merupakan pergerakan untuk ketiga derajat kebebasan, yaitu: pergerakan searah sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z. Sedangkan untuk pergerakan dua derajat kebebasan yang lain dibantu oleh bantalan bearing, poros, dan elektrik break (Gambar 2.5). Perancangan harus memperhatikan kebutuhan-kebutuhan tersebut seperti yang telah dijelaskan di atas agar Rancang Bangun Robot 5 Derajat Kebebasan dapat bekerja secara efektif dan tepat guna.



Gambar 2.5 : Elektrik Break pada Robot 5 Derajat Kebebasan

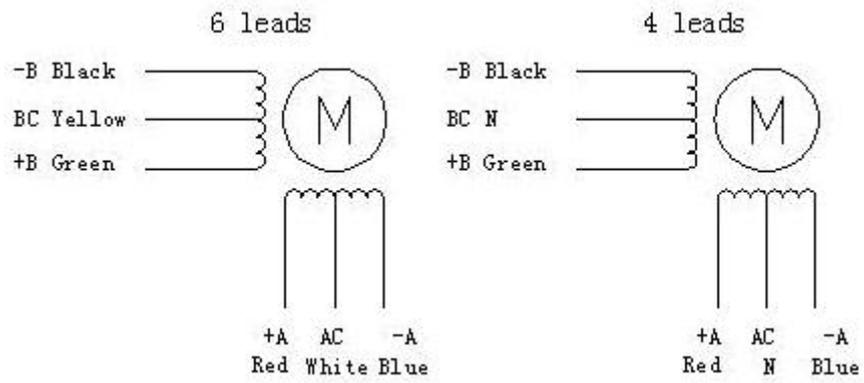
Untuk spesifikasi kebutuhan Rancang Bangun Robot 5 Derajat Kebebasan akan dijelaskan menjadi beberapa subbab komponen. Sedangkan untuk perhitungan berdasarkan kekuatan akan dijelaskan pada subbab lain.

2.1.1.1 Stepper Motor

Untuk Rancang Bangun Robot 5 Derajat Kebebasan digunakan dua jenis stepper motor. Stepper motor adalah motor yang bergerak tiap stepnya atas penerimaan perubahan frekuensi sinyal atau sering disebut dengan pulsa. Jenis-jenis dari stepper ada berbagai macam, tapi untuk Rancang Bangun Robot 5 Derajat Kebebasan digunakan unipolar stepper motor. Stepper jenis yang pertama adalah unipolar dengan jenis *high speed high torque*. Sedangkan untuk jenis kedua yang kedua digunakan *synchronous* unipolar stepper motor. Di bawah ini data spesifikasi mengenai stepper motor yang digunakan.

→ *High speed high torque*

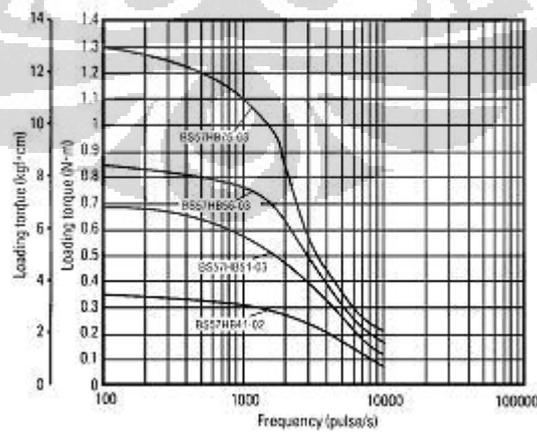
Model	: 42HB60-2, Nema 23 Unipolar
Step Angle ($^{\circ}$)	: 1.8
Length L(mm)	: 118
Holding Torque (Kg.cm)	: 28
Current (A/Phase)	: 4
Resistance (Ω)	: 0.7
Inductance (mH)	: 1.8
Rotor inertia(g.cm^2)	: 480
Weight (Kg)	: 1.6
Wire	: 6



Gambar 2.6 : Kabel koneksi 42HB60-2, Nema 23 Unipolar Motor



Gambar 2.7 : Nema 23 Unipolar Motor yang digunakan



Gambar 2.8 : Grafik Frequency-Torque Characteristics Nema 23 Unipolar Motor

→ *Synchronous*

Model	: SM-072-0060-KN, Nema 23 Unipolar
Step Angle (step/rev)	: 72
Length L(mm)	: 118
Holding Torque (oz.in)	: 60
Current (A/Phase)	: 2
Volt(V)	: 9
Weight (Kg)	: 0.6
Wire	: 6



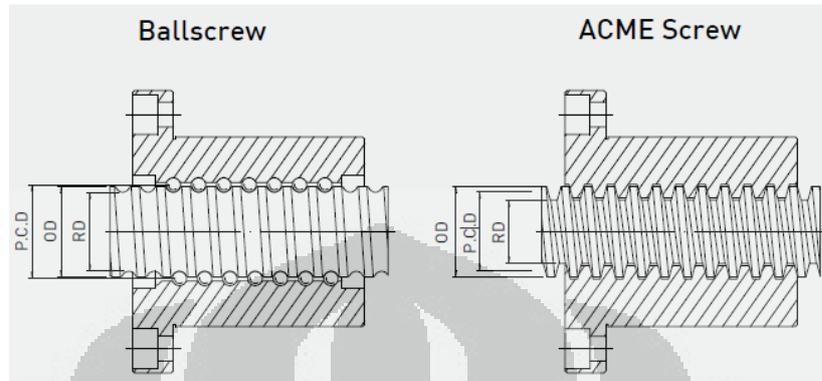
Gambar 2.9 : SM-072-0060-KN, Nema 23 Unipolar

Pada stepper motor jenis SM-072-0060-KN, dilakukan uji kemampuan dengan cara menarik beban (massa konstan) dan diukur berapa besar arus yang diterima (tegangan konstan) dengan variabel kecepatan berubah. Untuk perhitungan mengenai kebutuhan akan stepper motor akan dijelaskan pada subbab 1.3 Pemilihan Aktuator.

2.1.1.2 Ballscrew

Ballscrew, 14ctu disebut juga dengan *ball bearing screw*, yang terdiri atas screw spindle screw dan nut. *Ballscrew* adalah tipe yang paling umum digunakan dalam 14ctuator permesinan dan mesin pengukuran. Fungsi yang paling utama dari *ballscrew* adalah untuk merubah dari gerakan rotasi menjadi gerakan linear

begitupun sebaliknya dengan 15ctua utama performa tinggi, *reversibility* dan efisiensi tinggi jika dibandingkan dengan *leadscrew*. Untuk lebih jelasnya lihat (Gambar 2.10).



Gambar 2.10 : Susunan Utama Ballscrew dan Leadscrew, Sumber: Courtesy Hiwin

Ballscrew yang digunakan dalam Rancang Bangun Robot 5 Derajat Kebebasan ini adalah produk dari Hiwin dan spesifikasi dari *ballscrew* dapat dilihat pada (Tabel 2.1).

Tabel 2.1 : Data Teknis Ballscrew dan Nut

Model	Size		Ball Dia.	Circuits	Dynamic Load 1x10 ⁶ revs C [kgf]	Static Load Co [kgf]	W	F	L	B	C	T	M [max]
	Nominal Dia.	Lead											
14-4B1	14	4	2.361	2.5x1	376	682	34	13	35	26	22	6	30
14-4C1				3.5x1	498	943	34	13	35	26	22	6	30
14-5B1				2.5x1	636	1095	34	13	35	26	22	6	31
14-5B1	16	5	3.175	2.5x1	679	1224	42	16	36	32	22	21.5	32.5
20-5B1				2.5x1	745	1524	48	17	38	35	22	8	38
20-10B1	20	10	4.763	2.5x1	1280	2314	48	18	58	35	35	9	44

Linear Guideway adalah salah satu mekanisme yang memudahkan untuk gerakan linear. *Linear guideway* memanfaatkan *rolling elements*, seperti bola-bola yang kecil agar koefisien gesek semakin kecil. Dengan memanfaatkan 15ctuat sirkulasi ulang *rolling element* antara *rail* dan *block*, *linear guideway* dapat

mencapai gerakan linear yang presisi. Jika dibandingkan dengan slide yang tradisional, koefisien gesek untuk *linear guideway* mencapai 1/50 atau 0.02. Akibat dari penguncian antara *rail* dan *block*, *linear guideway* dapat dipasang dengan posisi beban dimana saja. Dengan kelebihan ini, *linear guideway* dapat gerakan yang akurasi. Di bawah ini spesifikasi dari linear guideway yang akan dipakai (Tabel 2.2).

Tabel 2.2 : Data Teknis Linear Guideway dan Block

Model No.	Dimensions of Assembly (mm)			Dimensions of Block (mm)										Dimensions of Rail (mm)										Mounting Bolt for Rail (mm)	Basic Dynamic Load Rating C (kN)	Basic Static Load Rating C ₀ (kN)	Static Rated Moment			Weight	
	H	H ₁	N	W	B	B ₁	C	L ₁	L	K ₁	G	MxL	T	H ₂	H ₃	W ₈	H ₈	D	h	d	P	E	M _z (kN-m)				M _y (kN-m)	M _x (kN-m)	Block (kg)	Rail (kg/m)	
EGH15SA	24	4.5	9.5	34	26	4	-	23.1	40.1	14.8	-	5.7	M4x6	6	5.5	6	15	12.5	6	4.5	3.5	60	20	M3x16	5.35	9.40	0.08	0.04	0.04	0.09	1.25
EGH15CA								26	39.8	56.8	10.15																				
EGH20SA	28	6	11	42	32	5	-	29	50	18.75	-	12	M5x7	7.5	6	6	20	15.5	9.5	8.5	6	60	20	M5x16	7.23	12.74	0.13	0.06	0.06	0.15	2.08
EGH20CA								32	48.1	69.1	12.3																				
EGH25SA	33	7	12.5	48	35	6.5	-	35.5	59.1	21.9	-	12	M6x9	8	8	8	23	18	11	9	7	60	20	M6x20	11.40	19.50	0.23	0.12	0.12	0.25	2.67
EGH25CA								35	59	82.6	16.15																				
EGH30SA	42	10	16	60	40	10	-	41.5	69.5	26.75	-	12	M8x12	9	8	9	28	23	11	9	7	80	20	M6x25	16.42	28.10	0.40	0.21	0.21	0.45	4.35
EGH30CA								40	70.1	98.1	21.05																				

Note : 1 kgf = 9.81 N

2.1.1.3 Aluminum

Salah satu material yang digunakan dalam Rancang Bangun Robot 5 Derajat Kebebasan adalah material aluminum. Material aluminum merupakan material yang mudah untuk diproses produksi dan banyak berada di pasaran. Pada Rancang Bangun Robot 5 Derajat Kebebasan, material aluminum digunakan 16ctuat pada semua komponen robot. Di bawah ini spesifikasi material aluminum yang digunakan (Tabel 2.3). Data material ini nantinya akan digunakan dalam perhitungan stress analisis.

Tabel 2.3 : Data Material Aluminium

2.71000	Density [g/cm ³]
68.9000	Young's Modulus [GPa]
0.330000	Poisson's Ratio
275.000	Yield Strength [MPa]
310.000	Ultimate Tensile Strength [MPa]
167.000	Thermal Conductivity [W/(m*K)]
2.36000	Linear Expansion [10 ⁻⁵ m/m/C]
1256.10	Specific Heat [J/(kg*K)]

2.1.1.4 Besi Tuang

Material lain yang digunakan dalam Rancang Bangun Robot 5 Derajat Kebebasan adalah material besi tuang atau *cast iron*. Material besi tuang dipilih karena banyak di pasaran dan juga harganya 17tuator murah. Material besi tuang digunakan hanya sedikit pada pembuatan rangka robot. Di bawah ini spesifikasi material besi tuang yang digunakan (Tabel 2.4). Sama halnya dengan material aluminum, data material ini nantinya akan digunakan dalam perhitungan stress analisis.

Tabel 2.4 : Data Material Besi Tuang

7.25000	Density [g/cm ³]
120.500	Young's Modulus [GPa]
0.300000	Poisson's Ratio
200.000	Yield Strength [MPa]
276.000	Ultimate Tensile Strength [MPa]
50.00000	Thermal Conductivity [W/(m*K)]
1.20000	Linear Expansion [10 ⁻⁵ m/m/C]
540.000	Specific Heat [J/(kg*K)]

2.1.1.5 Stainless Steel

Material yang terakhir yang digunakan adalah material stainless steel. Material stainless steel dipilih selain harganya terjangkau, material ini juga memiliki kemampuan tahan terhadap korosi. Material stainless steel digunakan hanya pada komponen-komponen poros. Di bawah ini spesifikasi dari material besi tuang yang digunakan (Tabel 2.5). Sama seperti material yang sebelumnya dijelaskan, data material ini nantinya akan digunakan dalam perhitungan stress analisis.

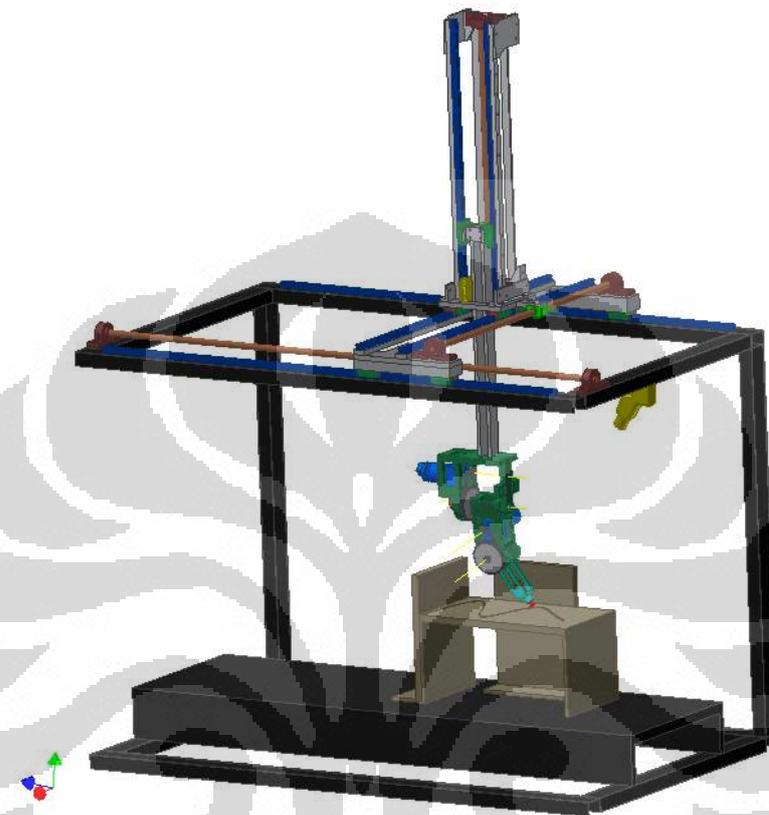
Tabel 2.5 : Data Material Stainless Steel

8.08000	Density [g/cm ³]
193.000	Young's Modulus [GPa]
0.300000	Poisson's Ratio
250.000	Yield Strength [MPa]
0.000000	Ultimate Tensile Strength [MPa]
16.00000	Thermal Conductivity [W/(m*K)]
1.04000	Linear Expansion [10 ⁻⁵ m/m/C]
477.000	Specific Heat [J/(kg*K)]

Konsep desain adalah gambaran secara kasar apa yang akan dirancang. Konsep desain yang dilakukan dalam Rancang Bangun Robot 5 Derajat

Universitas Indonesia

Kebebasan adalah berdasarkan desain yang telah dirancang sebelumnya oleh saudara Teguh Santoso, ST (Gambar 2.11). Dimana dalam perancangannya yang telah didesain belum diikutsertakan proses stress analisis.



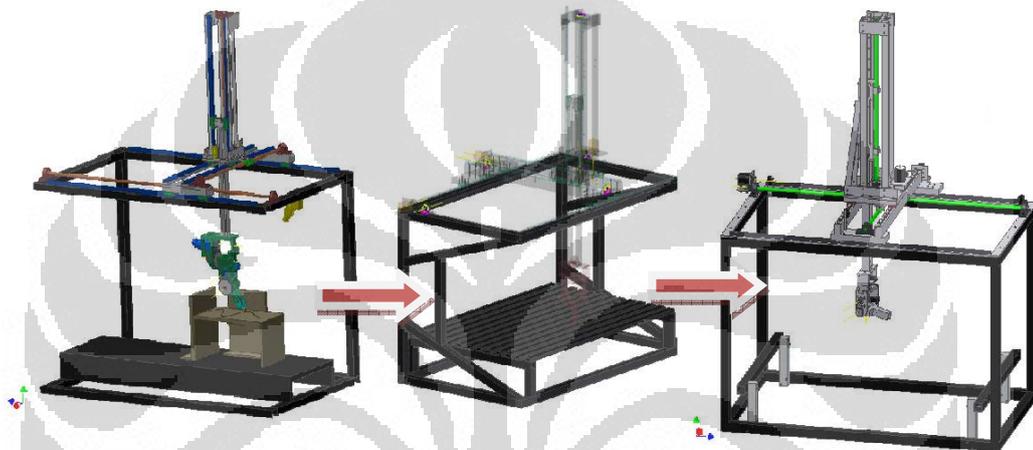
Gambar 2.11 : Konsep Desain Awal

Dalam pembuatan suatu alat, ide dan kreatifitas sangatlah dibutuhkan agar desain yang dibuat dapat terlaksana dengan baik. Ide dasar bentuk robot seperti ini adalah berdasarkan bentuk robot-robot gantry yang sudah banyak dibuat. Dengan mencari jenis-jenis komponen yang tersedia di pasaran dan ditambah dengan kemudahan dalam proses produksi, maka desain robot ini dapat terbentuk.

2.1.2 Detail Desain

Detail desain merupakan pengembangan dari konsep desain yang sudah dibuat sebelumnya dan sudah dianalisa tiap-tiap komponen yang dianggap cukup krusial (Gambar 2.12). Pada tahap detail desain ini perancangan robot difokuskan pada hal-hal berikut ini:

1. Pemilihan material dan profil untuk rangka konstruksi
2. Proses stress analisis untuk rangka konstruksi (Gambar 2.21)
3. Proses stress analisis untuk jembatan sumbu-y (Gambar 2.22)
4. Proses stress analisis untuk tiang sumbu-z (Gambar 2.23)
5. Proses stress analisis untuk dudukan pada aksis-4 (Gambar 2.24)
6. Proses stress analisis untuk poros penghubung aksis-4 dan aksis-5 (Gambar 2.25)
7. Pembuatan gambar teknik yang siap untuk dimanufaktur



Gambar 2.12 : Pengembangan Dari Konsep Desain Sampai Detail Desain

Penentuan tahapan tersebut dipengaruhi oleh beberapa 20ctuat, diantaranya adalah 20 ctuat dari deformasi material komponen, dan struktur geometri komponen. Pada 20ctuat deformasi material komponen, nilai yang terpenting adalah komponen tidak boleh terdeformasi lebih dari 0.5 mm. Jika lebih dari itu, maka resolusi dari Rancang Bangun Robot 5 Derajat Kebebasan ini tidak mencapai nilai yang diinginkan yaitu tidak boleh lebih dari 1 mm. Sedangkan 20 ctuat yang terakhir adalah struktur geometri, dimana 20 ctuat ini akan mempengaruhi pada saat proses manufaktur. Oleh karena itu, pada tahapan detail desain ini semua komponen didesain semudah mungkin diproses manufakturnya.

2.1.3 Simulasi Pembebanan

Pada proses simulasi pembebanan, hal yang terpenting harus diketahui terlebih dahulu adalah mengenai gaya yang timbul karena beban 20ctuat maupun

beban dinamik. Simulasi pembebanan Rancang Bangun Robot 5 Derajat Kebebasan hanya difokuskan pada pembebanan 21 tuat. Dimana gaya yang timbul hanya diakibatkan oleh *body load*. Untuk lebih jelasnya, pembebanan dibagi menjadi tiga bagian, yaitu:

1. Proses pembebanan dihubungkan terhadap waktu.
2. Proses pembebanan dihubungkan menurut area dimana diaplikasikannya.
3. Proses pembebanan dihubungkan menurut lokasi dan metode aplikasinya.

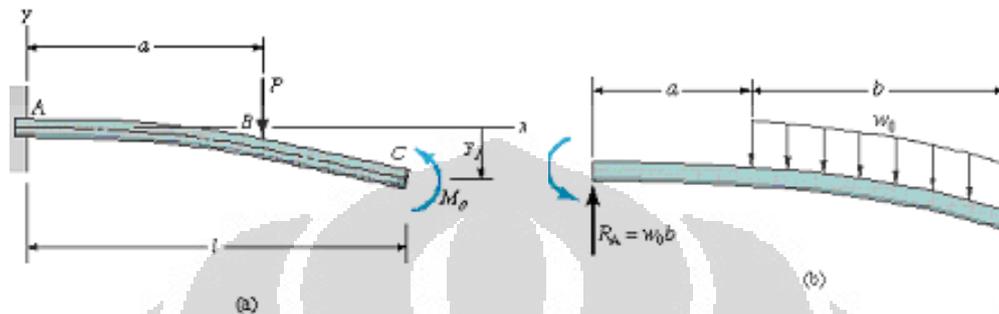
Pada proses pembebanan yang hubungannya terhadap waktu dapat diklasifikasikan menjadi beberapa bagian, yaitu:

1. *Static Load* → Beban yang diaplikasikan pada suatu lokasi dengan kondisi dimana keseimbangan tercapai dan waktunya relatif singkat, tidak ada efek dinamis.
2. *Sustained Load* → Beban yang terkandung, contohnya berat dari struktur itu sendiri dimana terjadinya konstan terhadap waktu.
3. *Impact Load* → Beban yang diaplikasikan secara cepat dan tiba-tiba, biasanya dipengaruhi pula oleh energi hasil impak terhadap struktur.
4. *Cyclic Load* → Beban yang bervariasi dan juga berulang yang memiliki karakteristik periode terhadap waktu

Proses pembebanan dihubungkan menurut area dimana diaplikasikannya dapat diklasifikasikan menjadi beberapa bagian, yaitu:

1. *Concentrated Load* (Gambar 2.13.a) → Beban yang diaplikasikan terkonsentrasi pada area yang jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan luas permukaan keseluruhan area. Contohnya beban yang diaplikasikan pada area yang luasnya 100 kali lebih kecil dari permukaan secara keseluruhan maka dapat dianggap beban diaplikasi pada titik di permukaan tersebut.

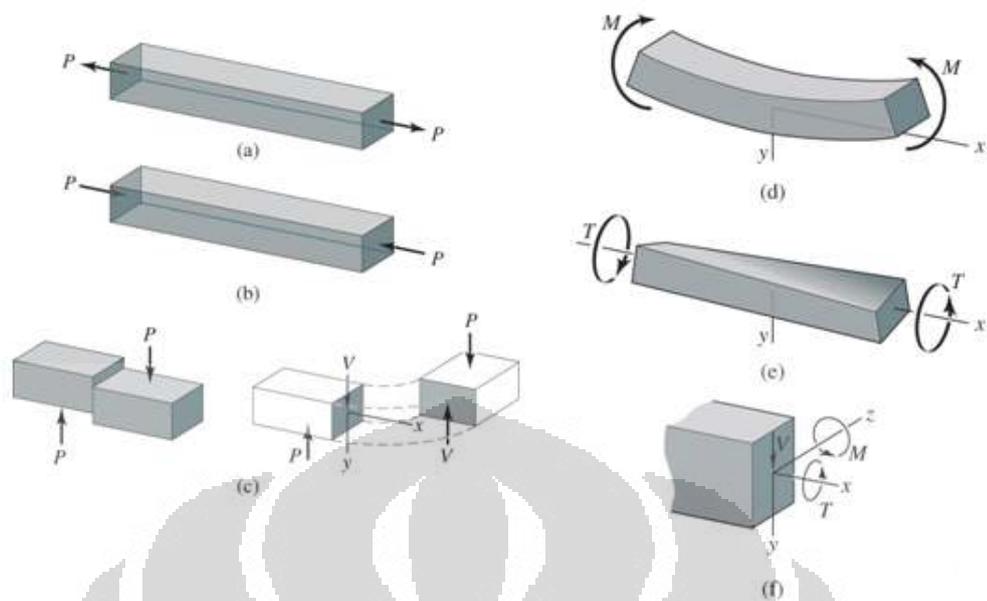
2. *Distributer Load* (Gambar 2.13.b) → Beban yang diaplikasikan tersebar melingkupi suatu area. Sebagai contoh yaitu beban dari berat lantai jembatan marmer dengan ketebalan yang *uniform*.



Gambar 2.13 : Beban Terpusat dan Terdistribusi

Prose pembebanan juga dapat dihubungkan menurut lokasi dan metode aplikasinya. Berdasarkan lokasi dan metode aplikasinya beban dibagi menjadi:

1. *Normal Load* → Beban yang searah dengan sumbu benda, kesepakatan tandanya yaitu mengalami tarik atau pemuluran maka nilainya positif sedangkan mengalami tekan atau pemendekan maka nilainya negatif (Gambar 2.14a dan Gambar 2.14b).
2. *Shear Load* → Beban yang mengakibatkan pergeseran bidang pada benda yang menumpunya (Gambar 2.14c).
3. *Bending Load* → Beban yang diaplikasikan tertransfer tegak lurus dengan sumbu longitudinal. Ini dipengaruhi oleh momen yang diberikan pada benda (Gambar 2.14d).
4. *Torsion Load* → Beban diberikan dengan gerakan memutar benda yang mengakibatkannya menjadi terpuntir (Gambar 2.14e).
5. *Combined Load* → Gabungan dari dua atau lebih beban yang terdefinisi sebelumnya. Sebagai catatan di gambar ini dapat dilihat kondisi positif dari *shear*, *bending* dan *torsion* (Gambar 2.14f).

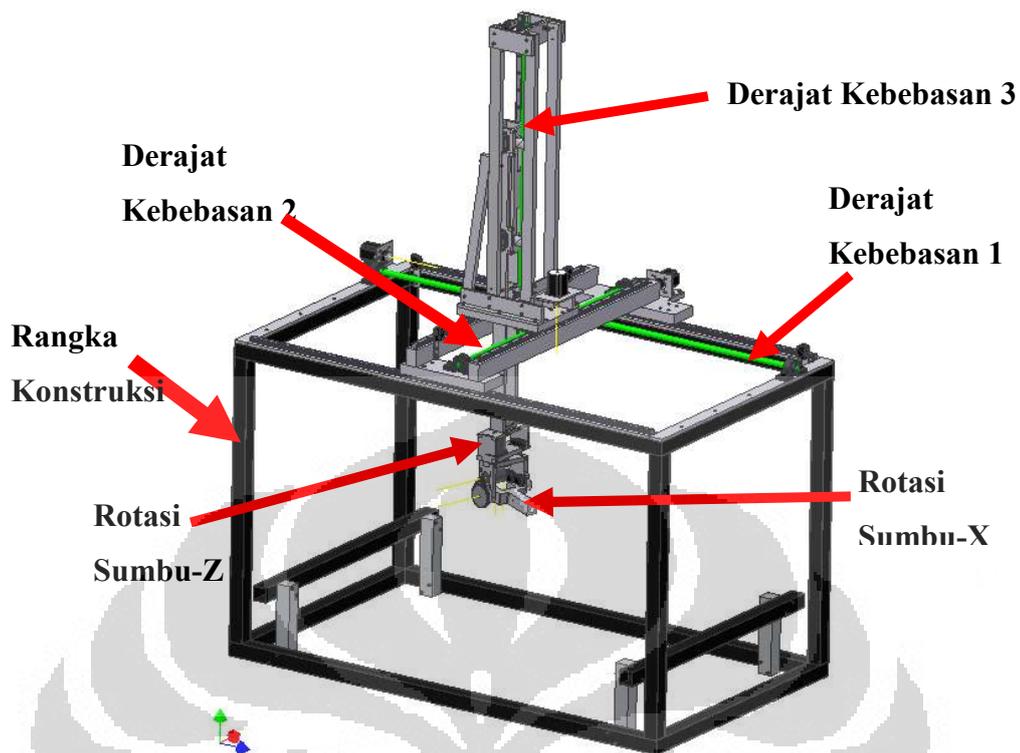


Gambar 2.14 : Beban Diklasifikasikan Menurut Lokasi dan Metode Aplikasinya

Pada subbab simulasi pembebanan ini, hanya komponen-komponen tertentu yang dianggap cukup krusial yang dilakukan proses simulasi pembebanan, seperti yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya.

- Rangka Konstruksi

Pada rangka konstruksi, simulasi pembebanan dilakukan untuk mencari seberapa besar deformasi yang terjadi. Besarnya deformasi yang diinginkan adalah tidak boleh lebih dari **0.5 mm**. Rangka konstruksi merupakan tempat pijakan dari seluruh beban pada robot (Gambar 2.15). Mulai dari derajat kebebasan yang pertama hingga derajat kebebasan yang terakhir yaitu yang kelima.

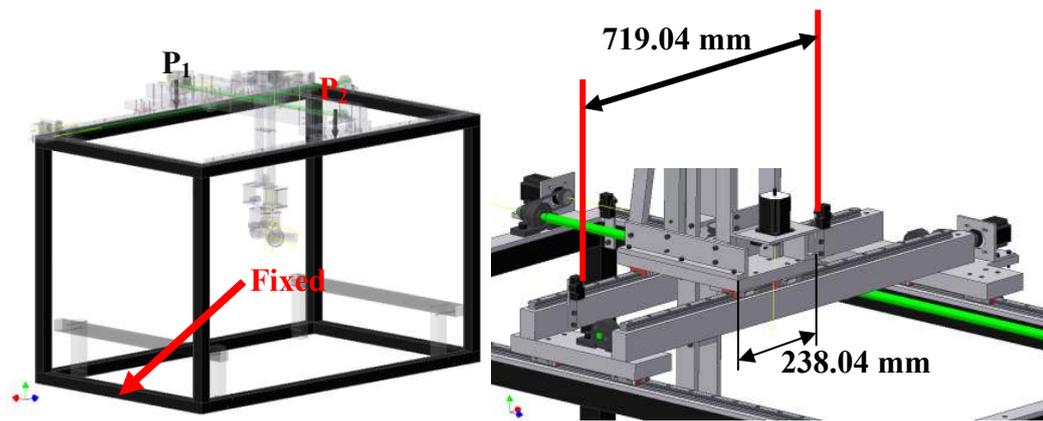


Gambar 2.15 : Robot 5 Derajat Kebebasan

Untuk memulai proses simulasi pembebanan, langkah awal yang harus diketahui adalah beban total yang diterima oleh rangka. Proses perhitungan massa dilakukan dengan bantuan software desain, dimana telah ditentukan terlebih dahulu material yang digunakan. Seperti yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya, material yang digunakan adalah mayoritas material aluminum. Untuk lebih jelasnya mengenai beban masing-masing pergerakan, dapat dilihat dibawah ini:

- Derajat kebebasan 2 = 34.218 Kg
- Derajat kebebasan 3 = 28.443 Kg
- Rotasi Sumbu-Z = 7.846 Kg
- Rotasi Sumbu-X = 2.473 Kg

Total massa = 72.98 Kg, jika diasumsikan eror dari perhitungan beban menggunakan software adalah 10% maka total massa menjadi 80.278 Kg.



Gambar 2.16 : Simulasi Pembebanan Pada Rangka

Untuk simulasi pembebanan pada rangka diambil pada saat rangka mendapatkan deformasi maksimum, yaitu pada keadaan sumbu-y di tengah-tengah sumbu-x (Gambar 2.16). Sehingga diperoleh beban P_1 dan P_2 di sumbu-x. Untuk besarnya P_1 dan P_2 diambil pada saat sumbu-y berada didekat P_1 atau P_2 .

Perbandingan jarak sumbu-y dan dudukan sumbu-z = 2:1

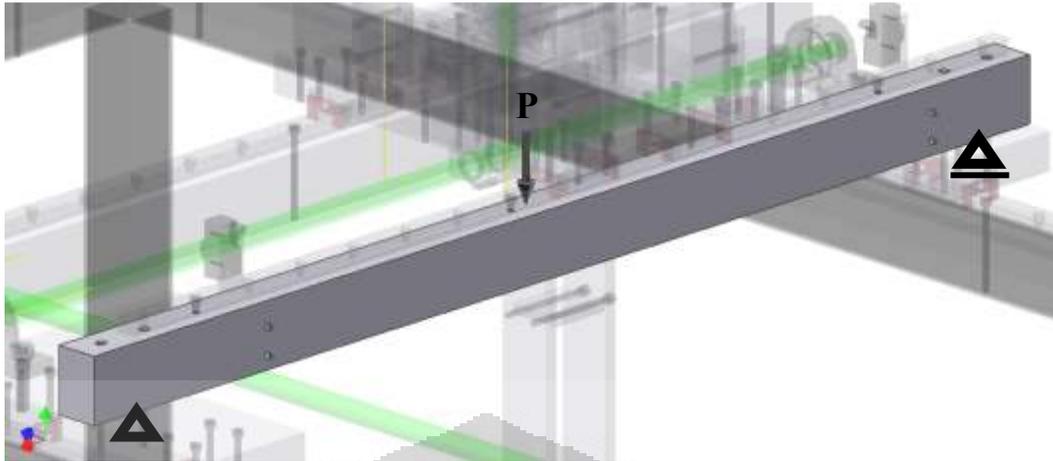
Maka besarnya gaya P_1 dan P_2 adalah

$$P_1 = 26.759 \text{ Kg}$$

$$P_2 = 53.519 \text{ Kg}$$

- Jembatan Sumbu-Y

Sama seperti pada rangka konstruksi, simulasi pembebanan pada jembatan sumbu-y untuk mencari seberapa besar deformasi yang terjadi. Besarnya beban yang harus diterima pada jembatan sumbu-y sebanding dengan total massa dari derajat kebebasan ketiga sampai derajat kebebasan kelima, yaitu rotasi sumbu-x. Total massa yang diberikan kepada sumbu-y sebesar 38.762 Kg. Jika diasumsikan eror dari perhitungan beban menggunakan software adalah 10% maka total massa menjadi 42.638 Kg.

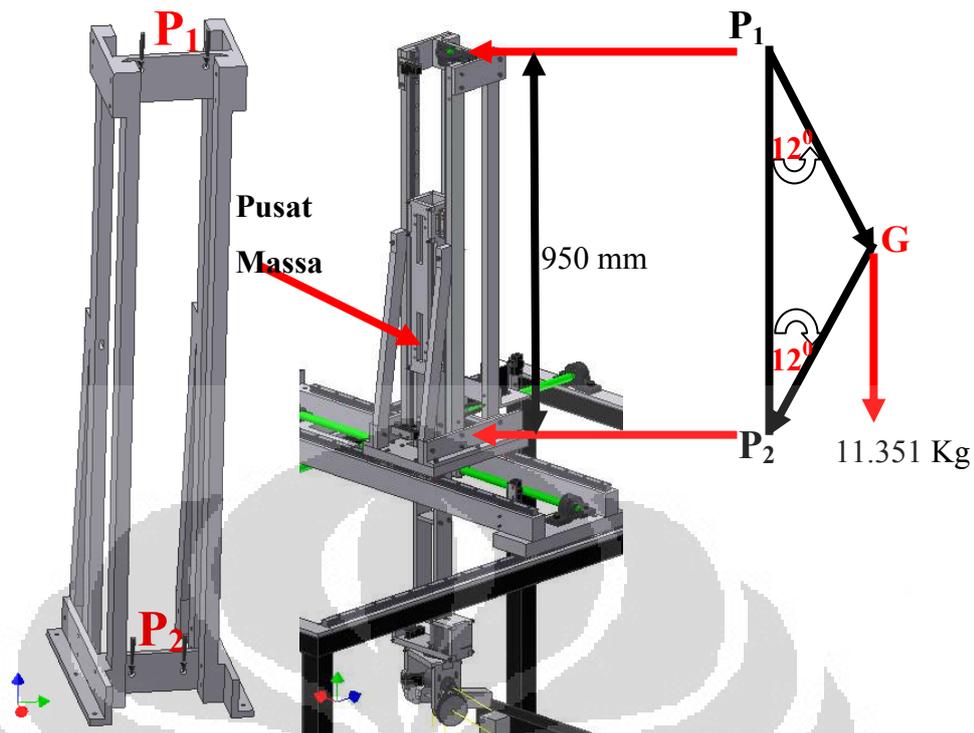


Gambar 2.17 : Simulasi Pembebanan Pada Jembatan Sumbu-Y

Untuk simulasi pembebanan pada jembatan sumbu-y diambil pada saat lengan sumbu-y atau kedudukan sumbu-z berada di tengah-tengah sumbu-y (Gambar 2.17). Karena pada keadaan tersebut, akan menghasilkan deformasi maksimum. Besarnya beban P sebanding dengan total massa derajat kebebasan ketiga sampai kelima yaitu sebesar 42.638 Kg.

- **Tiang Sumbu-Z**

Hampir sama dengan simulasi pembebanan yang sebelumnya telah dijelaskan. Simulasi pembebanan pada tiang sumbu-z untuk mencari seberapa besar deformasi yang terjadi. Besarnya beban yang harus diterima pada tiang sumbu-z sebanding dengan total massa dari derajat kebebasan keempat dan kelima. Total massa yang harus diterima tiang sumbu-z sebesar 10.319 Kg. Jika diasumsikan eror dari perhitungan beban menggunakan software adalah 10% maka total massa menjadi 11.351 Kg.

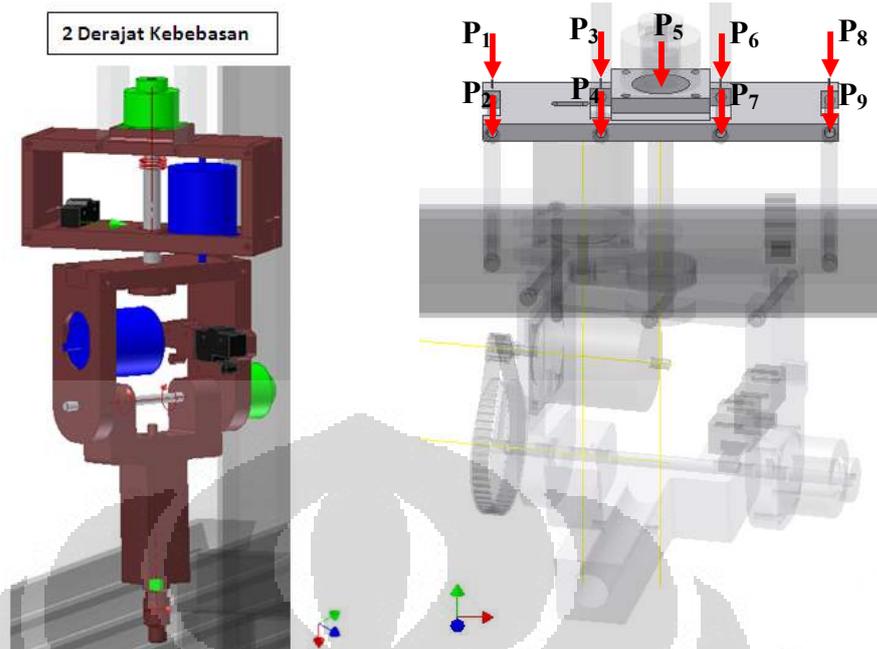


Gambar 2.18 : Simulasi Pembebanan Pada Tiang Sumbu-Z

Untuk simulasi pembebanan pada tiang sumbu-z diambil pada keadaan lengan sumbu-z dan dua lengan rotasi berada di posisi ketinggian maksimal (Gambar 2.18). Pada keadaan tersebut P_1 mendapatkan gaya tarik dari pusat massa lengan, sedangkan P_2 mendapatkan gaya tekan. Besarnya P_1 dan P_2 adalah massa lengan dibagi dua dikalikan dengan $\cos \theta$. Sehingga diperoleh P_1 sebesar 5.552 Kg dan P_2 sebesar 5.552 Kg.

- Dudukan Pada Aksis-4

Sama seperti yang telah dibahas sebelumnya tentang simulasi pembebanan. Simulasi pembebanan pada dudukan aksis-4 untuk mencari seberapa besar deformasi yang terjadi. Besarnya beban yang harus diterima pada dudukan aksis-4 sebanding dengan total massa dari derajat kebebasan yang kelima. Total massa yang harus diterima sebesar 3.391 Kg. Jika diasumsikan eror dari perhitungan beban menggunakan software adalah 10% maka total massa menjadi 3.73 Kg.

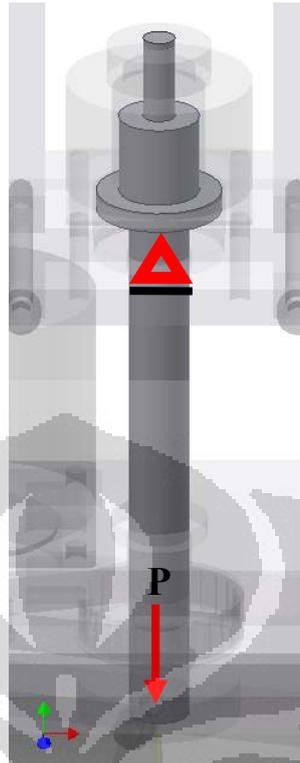


Gambar 2.19 : Simulasi Pembebanan Pada Dudukan Aksis-4

Untuk simulasi pembebanan pada dudukan aksis-4, total massa 3.73 Kg dibagi menjadi 28 ctuator bagian. Pembagian tersebut diasumsikan beban terdistribusi merata. Sehingga masing-masing P memperoleh gaya sebesar 0.414 Kg.

- Poros Penghubung Aksis-4 dan Aksis -5

Pada poros penghubung aksis-4 dan aksis-5, proses simulasi pembebanan dilakukan untuk mengetahui apakah terjadi deformasi akibat gaya tarik oleh lengan aksis-5 (Gambar 2.20). Besarnya P sebanding total massa lengan aksis-5 yaitu sebesar 2.473 Kg. Jika diasumsikan eror dari perhitungan beban menggunakan software adalah 10% maka total massa menjadi 2.72 Kg.



Gambar 2.20 : Simulasi Pembebanan Pada Poros Penghubung Aksis-4 dan Aksis-5

2.2 MANUFAKTUR

Setelah proses pengujian simulasi pembebanan dan pembuatan gambar teknik alat telah dilakukan, maka proses manufaktur siap untuk diproses. Pada proses manufaktur ini, kategori proses produksi umum yang dilakukan adalah proses bubut, *milling*, *drilling*, *tapping*, dan *grinding*. Semua komponen diproses manufaktur oleh PT. Buana Merdeka, hanya rangka konstruksi yang dibuat di Departemen Teknik Mesin.

Sementara, untuk proses manufaktur dari 29ctuat 29ctuato akan dibahas pada Bab 3. Tahap manufaktur juga termasuk kegiatan pembangunan *software* untuk penghubung antara PC dan mikrokontroler. Pembangunan software ini akan dibahas pada Bab 4.

2.2.1 Uji Coba

Pada subbab ini, akan dijelaskan mengenai uji coba pergerakan Robot 5 Derajat Kebebasan yang dilakukan secara manual tanpa bantuan gerakan dari 29ctuator. Uji coba dilakukan setelah semua komponen selesai dibuat dan dirakit

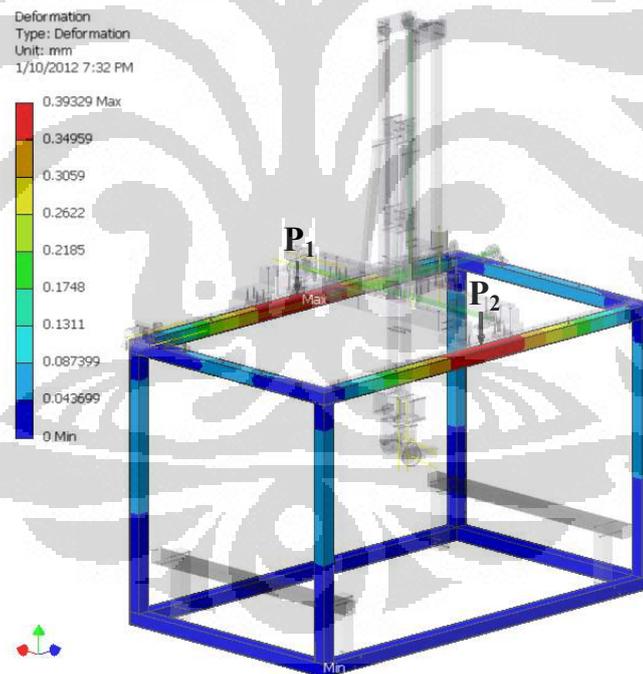
tiap-tiap komponennya. Tujuan dari uji coba ini adalah untuk mencari ketidaklurusan dari pemasangan *linear guideway* dan *ballscrew*. Ketidaklurusan ini akan menyebabkan fungsi 30 actuator tidak bekerja secara maksimal, bahkan dapat menyebabkan kerusakan. Untuk lebih jelasnya mengenai uji coba akan dibahas pada Bab 5 mengenai Pengujian Robot 5 Derajat Kebebasan.

2.2.2 Simulasi Stress Analysis

Setelah membahas mengenai simulasi pembebanan, pada subbab ini akan difokuskan mengenai analisa stress pada komponen yang telah disebutkan sebelumnya.

1. Rangka Konstruksi

Setelah mengetahui berapa beban yang harus diterima oleh rangka konstruksi, maka selanjutnya adalah melakukan simulasi dengan bantuan software. Hasil dari simulasi ini berupa besarnya deformasi dan beserta gambar daerah deformasi.



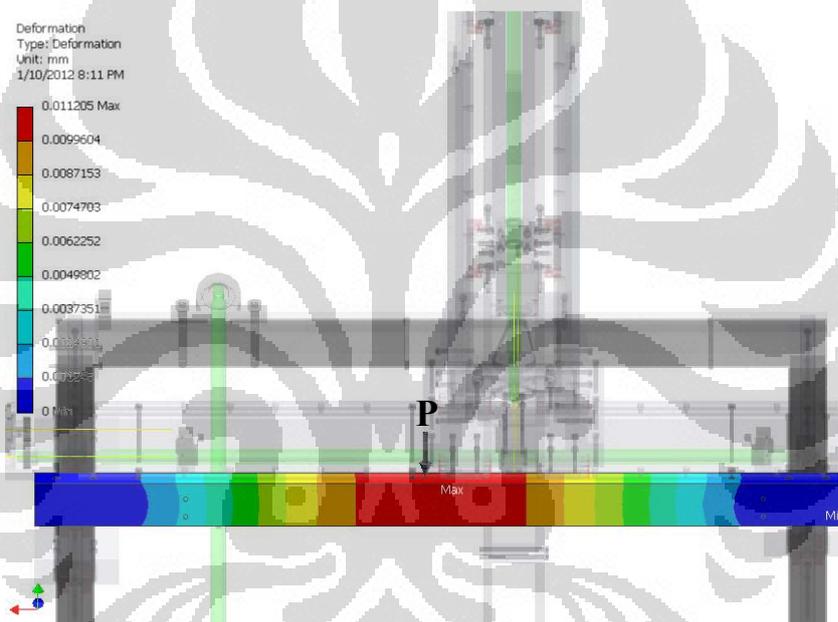
Gambar 2.21 : Simulasi Analisa Stress Pada Rangka Konstruksi

Dari hasil analisa stress dapat disimpulkan bahwa besarnya deformasi adalah 0.393 mm dan terjadi tepat dimana gaya maksimum diberikan diposisi tersebut (Gambar 2.21). Pada proses simulasi ini, besarnya nilai P_1 dan P_2 seharusnya

berada di bawah nilai tersebut. Karena nilai yang seharusnya telah dikurangi oleh komponen-komponen yang berada di atas rangka konstruksi, seperti: linear guideway dan dudukan aluminum. Sehingga nilai deformasi tidak lebih dari 0.393 mm. Pada proses simulasi ini juga, antara desain dan kenyataan tidaklah sesuai. Dimana pada kenyataannya dilakukan proses pengelasan pada setiap sudutnya. Sedangkan pada desain dianggap sebagai satu-kesatuan.

2. Jembatan Sumbu-Y

Pada jembatan sumbu-y, besarnya gaya yang diterima telah diketahui. Langkah selanjutnya adalah mensimulasikan analisa stress untuk mengetahui seberapa deformasi yang terjadi.

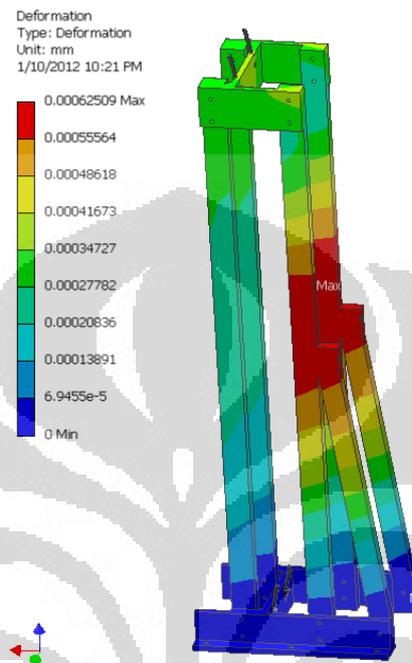


Gambar 2.22 : Simulasi Analisa Stress Pada Jembatan Sumbu-Y

Dari hasil analisa stress dapat disimpulkan bahwa besarnya deformasi adalah 0.011 mm dan berada dimana gaya diberikan yaitu terletak di tengah-tengah sumbu-y (Gambar 2.22). Pada proses simulasi ini, besarnya nilai P seharusnya berada di bawah nilai yang diketahui. Karena nilai yang seharusnya telah dikurangi oleh komponen yang berada di atas jembatan sumbu-y, yaitu linear guideway. Sehingga nilai deformasi, akan lebih kecil dari nilai yang telah dihasilkan.

3. Tiang Sumbu-Z

Pada tiang sumbu-z, besarnya gaya yang diterima telah diketahui, yaitu sebesar 11.351 Kg. Gaya ini dibagi menjadi empat bagian dan diasumsikan gaya terdistribusi merata.

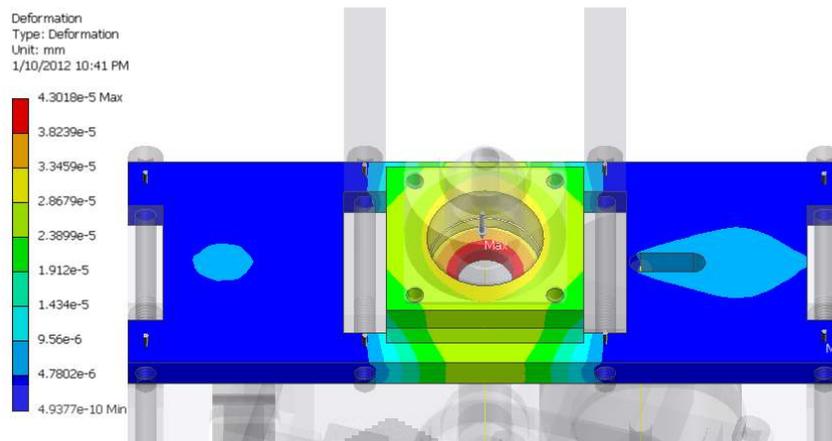


Gambar 2.23 : Simulasi Analisa Stress Pada Tiang Sumbu-Z

Dari hasil simulasi analisa stress dapat diketahui bahwa besarnya deformasi adalah 0.0006 mm dan terletak pada tiang yang memiliki tambahan penahan (Gamabr 2.23).

4. Dudukan Aksis-4

Pada dudukan aksis-4, beban yang harus diterima telah diketahui dan dijelaskan darimana beban tersebut berasal. Analisa stress dilakukan pada komponen ini, dikarenakan komponen ini sebagai dudukan dari aksis-4 yang bergerak dan ketebalan dinding lubang baut hanya berkisar 2 mm.

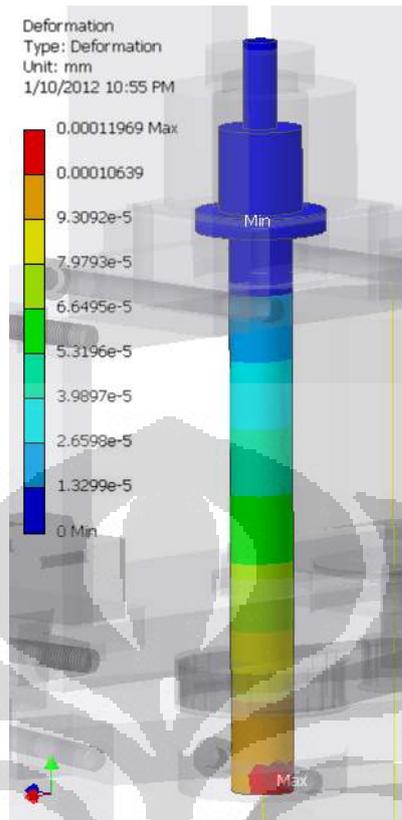


Gambar 2.24 : Simulasi Analisa Stress Pada Dudukan Aksis-4

Dari hasil simulasi analisa stress dapat diketahui bahwa besarnya deformasi adalah 0.00004 mm dan terletak di poros penghubung antara aksis-4 dan aksis-5 (Gambar 2.24).

5. Poros Penghubung

Pada poros penghubung antara aksis-4 dan aksis-5, beban yang diterima telah dijelaskan pada subbab sebelumnya. Proses analisa stress dilakukan pada komponen ini dengan maksud untuk mengetahui apakah komponen ini tidak akan rusak menerima beban yang akan diberikan.



Gambar 2.25 : Simulasi Analisa Stress Pada Poros Penghubung

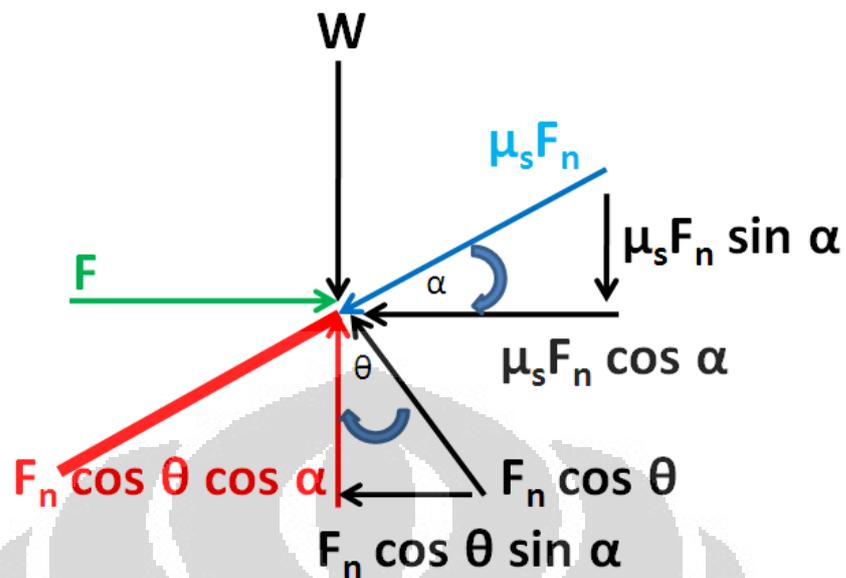
Dari hasil simulasi analisa stress dapat diketahui bahwa besarnya deformasi pada ujung poros sebesar 0.0001 mm (Gambar 2.25).

2.3 PEMILIHAN AKTUATOR

Pemilihan 34tuator dilakukan untuk membantu gerakan dari Robot 5 Derajat Kebebasan. Aktuator yang digunakan adalah stepper motor dan telah dijelaskan pada subbab sebelumnya. Penggunaan stepper motor diyakini dapat memudahkan dalam hal pengontrolan. Dimana tidak dibutuhkannya lagi sensor untuk mengetahui posisi dari hasil gerakan. Gerakan yang diinginkan juga tidak terlalu cepat, dikarenakan kecepatan maksimum yang diinginkan adalah 1 cm/s. Di bawah ini akan dijelaskan perhitungan kebutuhan stepper motor.

→ 42HB60-2, Nema 23 Unipolar

Pemilihan stepper motor ini berdasarkan beban yang akan dibawa yaitu beban pada sumbu-z. Besarnya beban yang harus dibawa oleh stepper motor sebesar 11.351 Kg.



Gambar 2.26 : Gaya-gaya Yang Bekerja Pada Ballscrew

Dimana:

W = Beban sumbu-z

F_n = Gaya normal

R = jari-jari ballscrew

L = lebar pitch

$$F_n \cos \theta \sin \theta = W + F_f \sin \alpha$$

$$F_n \cos \theta \sin \theta - F_n \mu_s \sin \alpha = W$$

$$F_n = \frac{W}{\cos \theta \cos \alpha - \mu_s \sin \alpha}$$

$$\tan \alpha = \frac{l}{2\pi r}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{l}{2\pi r}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{2}{2\pi 5}$$

$$\alpha = 3.642^\circ$$

$$\theta = 45^\circ$$

$$F_n = \frac{111.353}{\cos 45 \cos 3.642 - 0.25 \sin 3.642}$$

$$F_n = 161.687 \text{ N}$$

$$T = F r_m$$

$$T = r_m (\mu_s F_n \cos \alpha + F_n \cos \theta \sin \alpha)$$

$$T = 0.1 (0.25 \times 161.687 \times \cos 3.642 + 161.687 \cos 45 \sin 3.642)$$

$$T = 0.1 (47.602)$$

$$T = 4.7602 \text{ Nm}$$

Jika ratio pulley adalah 14:34, maka

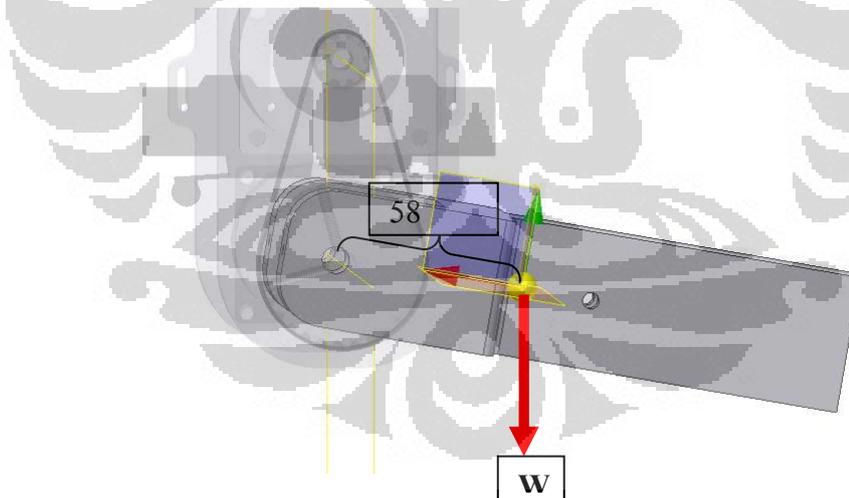
$$T_1 \omega_1 = T_2 \omega_2$$

$$T_1 34 = 4.7602 \text{ Nm} \times 14$$

$$T_1 = 1.96 \text{ Nm}$$

Dari hasil perhitungan bahwa, stepper motor mampu membawa beban tersebut.

→ SM-072-0060-KN, Nema 23 Unipolar



Gambar 2.27 : Gaya-gaya Yang Bekerja Pada End Effector

$$T = F r + m g \sin \theta \times l$$

$$T = 8.471 \text{ N} \times 0.058 \text{ m} + 8.471 \text{ N} \sin 90 \times 0.058 \text{ m}$$

$$T = 0.9826 \text{ Nm}$$

Jika rasio pulley 1:3

$$T_1 \omega_1 = T_2 \omega_2$$

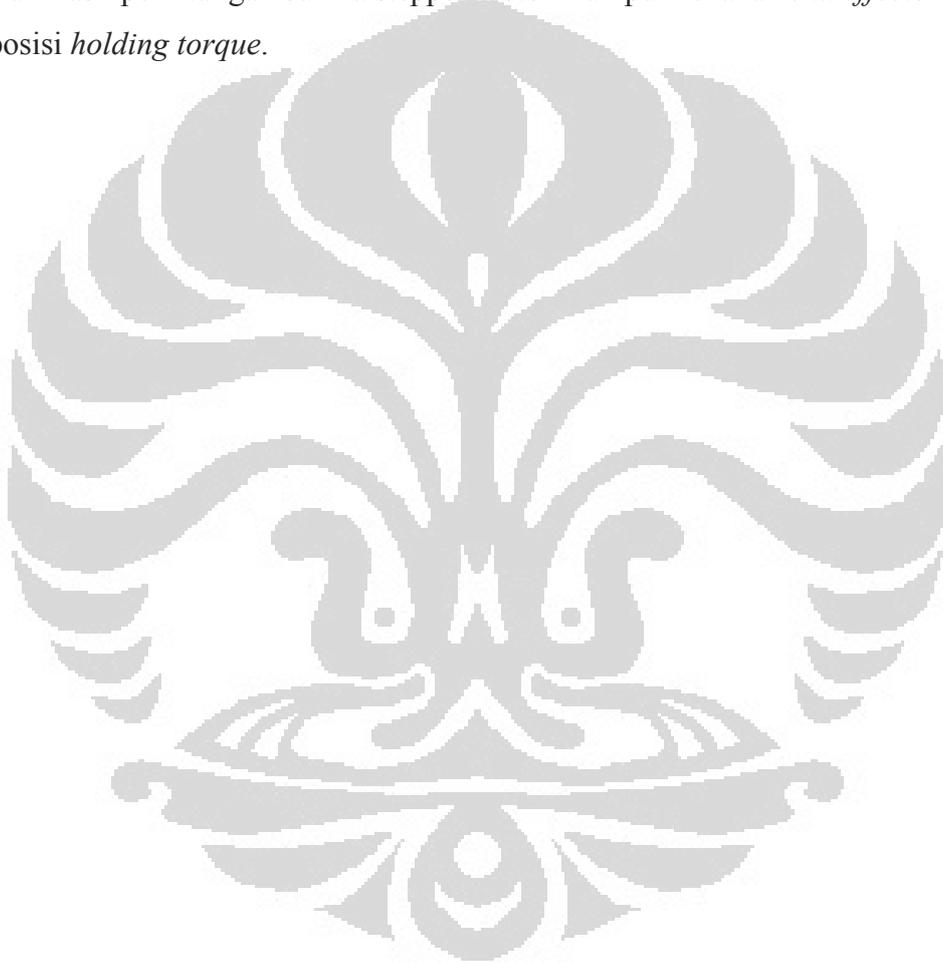
$$T_1 3 = 0.9826 \text{ Nm} \times 1$$

$$T_1 = 0.3275 \text{ Nm}$$

Data stepper motor SLO-SYN

Holding torque = 60 oz.in = 0.424 Nm

Dari hasil perhitungan bahwa stepper motor mampu menahan *end effector* pada posisi *holding torque*.



BAB 3

PERANCANGAN SISTEM KONTROL

3.1 SENSOR

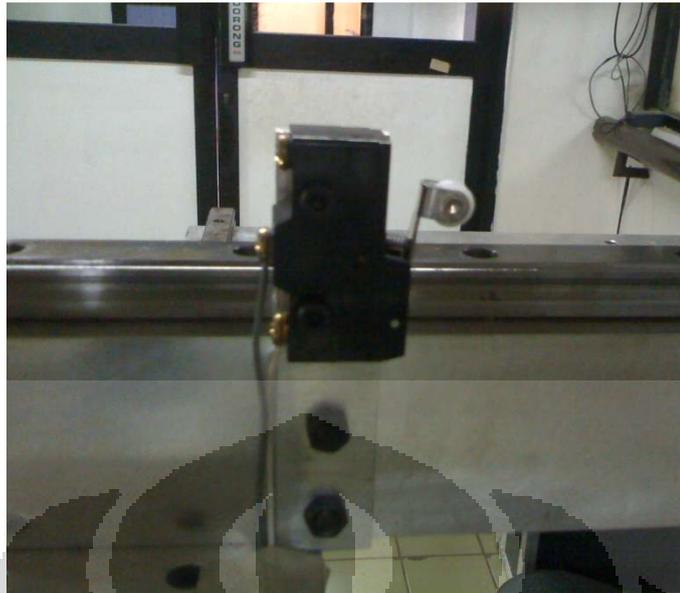
Rancang Bangun Robot dan Pengembangan Sistem Kontrol Robot 5 Derajat Kebebasan hanya memiliki satu jenis sensor elektromekanikal. Sensor-sensor ini berfungsi untuk mendeteksi pergerakan robot dan mengirimkan sinyal ke mikrokontroller.

3.1.1 Limit Switch

Rancang Bangun Robot dan Pengembangan Sistem Kontrol Robot 5 Derajat Kebebasan menggunakan sembilan limit switch sebagai *feedback* posisi robot. Limit switch ini digunakan sebagai *feedback* untuk menentukan posisi *default* dan juga sebagai pembatas area kerja robot. Setiap aksis memiliki dua buah limit switch, hanya pada aksis-4 memiliki satu limit switch. Limit switch yang digunakan adalah tipe tactile dengan kondisi NO (Normally Open). Berikut ini contoh dari limit switch yang digunakan (Gambar 4.1).

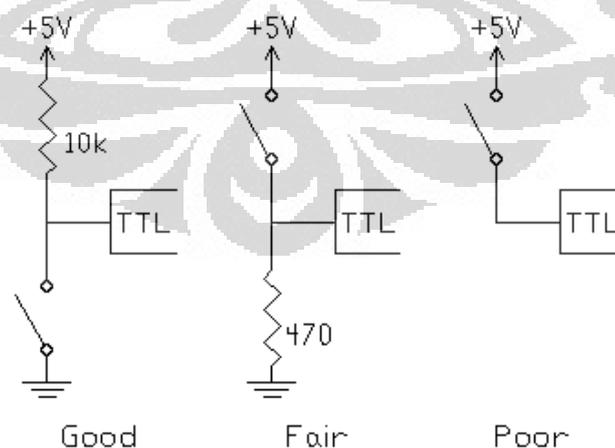


Gambar 3.1 : Limit Switch



Gambar 3.2 : Limit Switch Pada Robot 5 Derajat Kebebasan

Limit switch merupakan salah satu perangkat elektromekanikal yang bekerja dengan prinsip mekanik yaitu berupa sentuhan terhadap/dari objek lain. Sentuhan dalam penelitian ini adalah berupa lengan-lengan tiap aksis. Sentuhan ini merubah kondisi limit switch dari posisi NO ke open state. Pada posisi ini, arus listrik yang disuplai ke mikrokontroller terputus dan dianggap sebagai suatu sinyal oleh mikrokontroller. Untuk interface limit switch ke mikrokontroller diberikan pullup resistor (Gambar 3.3).



Gambar 3.3 : Cara Penggunaan Limit Switch

3.2 KENDALI DIGITAL

Sistem kendali yang digunakan dalam Rancang Bangun Robot 5 Derajat Kebebasan adalah kendali digital. Sistem kendali digital digunakan karena kemudahan untuk menerapkan logika kendali dan mempermudah pengembangan sistem lebih lanjut.

3.2.1 Mikrokontroller

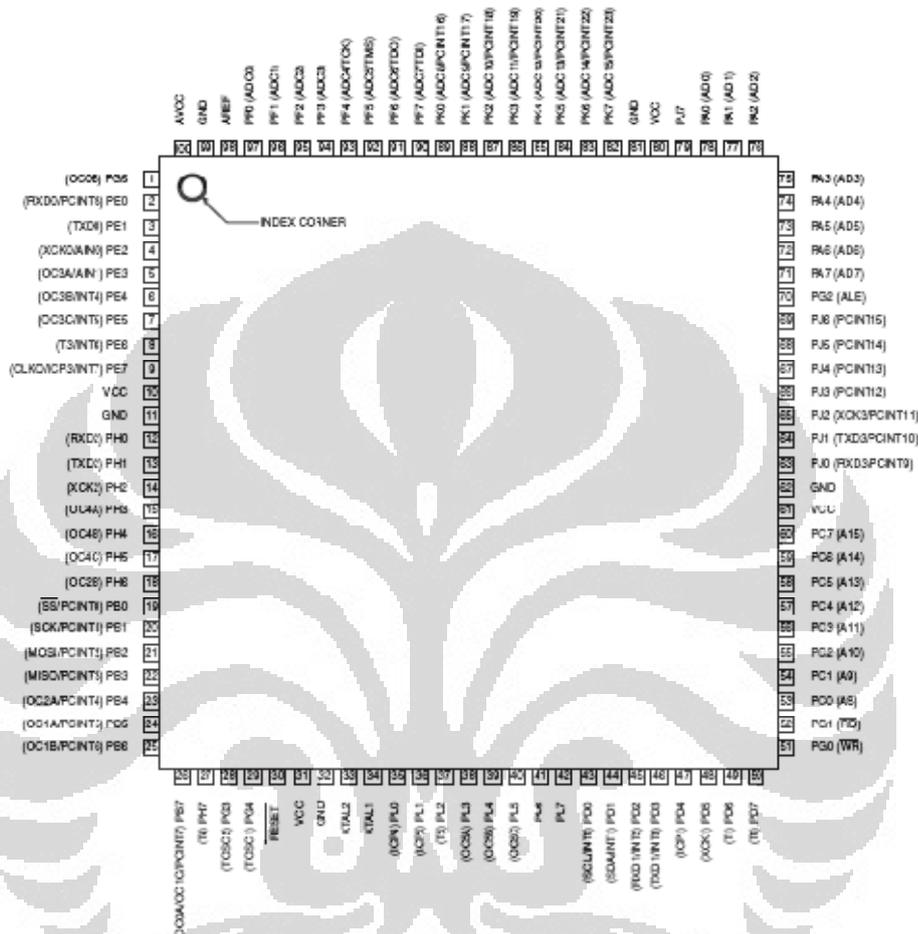
Mikrokontroller merupakan perangkat elektronik yang memiliki kemampuan menyerupai sebuah komputer. Hal yang membedakan hanyalah kapasitas memori dan kecepatan pengolahan data. Layaknya sebuah komputer mikrokontroller memiliki perangkat lengkap yang hampir serupa dengan komputer, seperti: *crystal oscillator, timer, serial communication, digital I/O dan analog I/O*. Mikrokontroller menggunakan memori penyimpanan yang dapat dihapus dan diprogram ulang dengan komputer melalui bahasa pemrograman yang bervariasi. Mikrokontroller dapat digunakan untuk mengendalikan berbagai perangkat elektronik dengan logika pemrograman yang cukup sederhana. Oleh karena itu, dalam penelitian Rancang Bangun Robot 5 Derajat Kebebasan digunakan mikrokontroller sebagai otak dalam sistem kontrol. Jenis mikrokontroller yang digunakan adalah Atmega 2560v dari Atmel. Pemilihan mikrokontroller jenis ini dikarenakan kebutuhan yang cukup besar, yaitu dalam hal:

1. Kebutuhan akan I/O yang cukup banyak
2. Mampu melakukan komunikasi serial
3. Kapasitas memori yang besar

Tabel 3.1 : Spesifikasi Atmega 2560v

Device	Flash	EEPROM	RAM	General Purpose I/O pins	16 bits resolution PWM channels	Serial USARTs	ADC Channels
ATmega640	64KB	4KB	8KB	86	12	4	16
ATmega1280	128KB	4KB	8KB	86	12	4	16
ATmega1281	128KB	4KB	8KB	54	6	2	8
ATmega2560	256KB	4KB	8KB	86	12	4	16
ATmega2561	256KB	4KB	8KB	54	6	2	8

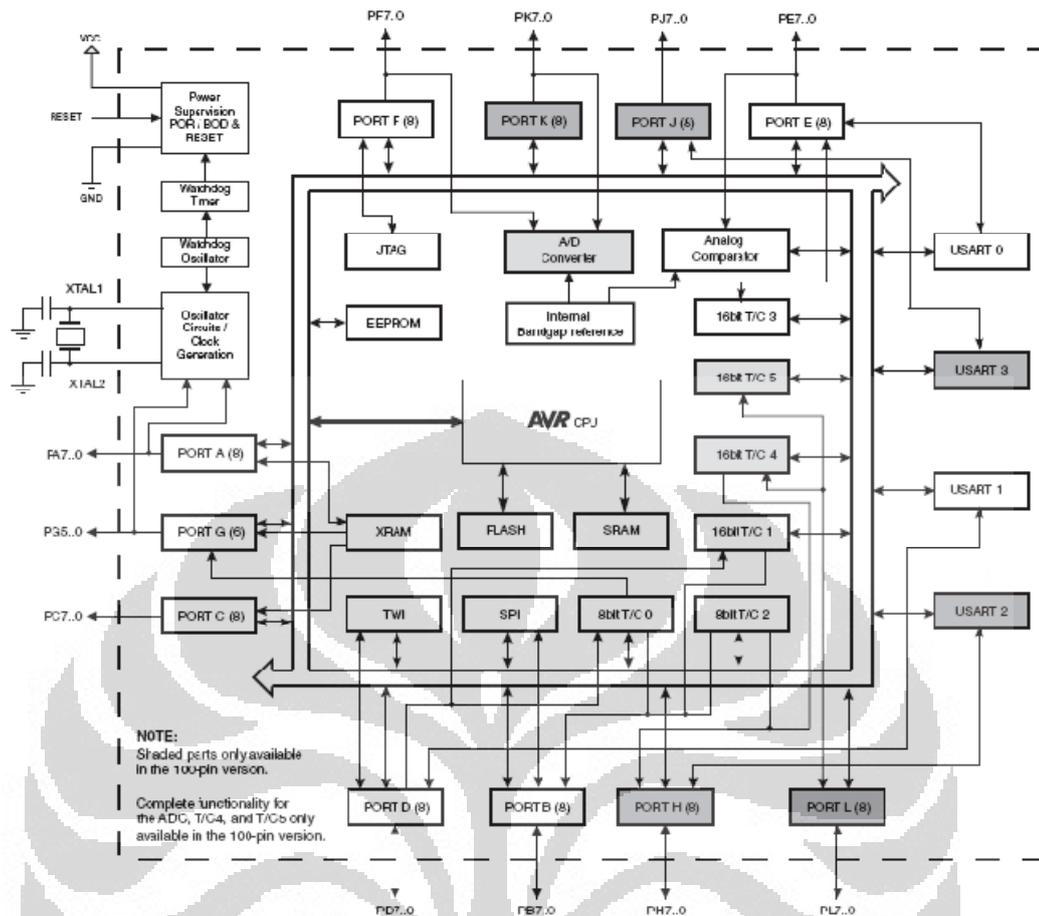
Kecepatan proses data bergantung pada penggunaan oscillator, Atmega 2560v dapat memakai oscillator maksimal 16Mhz sehingga cukup cepat dalam melakukan *data processing*. Berikut ini konfigurasi dari pin pada Atmega 2560v :



Gambar 3.4 : Blok Diagram ATmega 2560v

Seperti terlihat dalam gambar 3.4 di atas fitur yang dimiliki Atmega 2560v sudah cukup memadai untuk mengontrol Robot 5 Derajat Kebebasan. Fitur yang ada tidak semua dipakai karena disengaja untuk pengembangan robot lebih lanjut. Setiap mikrokontroler mempunyai sistem arsitektur yang unik, Atmega 2560v merupakan mikrokontroler 8-Bit RISC (Reduced Instruction Set Computing), sehingga aplikasinya cukup sederhana karena ada fungsi – fungsi pemrograman yang sudah disederhanakan.

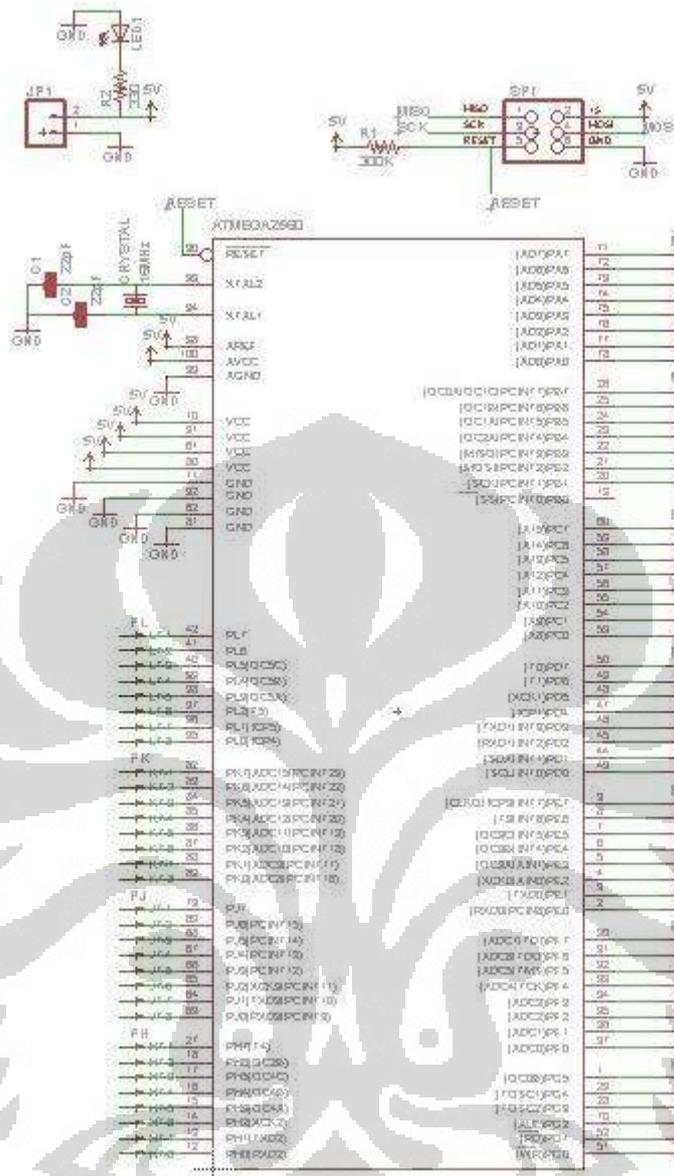
Berikut adalah block diagram dari microcontroller Atmega 2560v :



Gambar 3.5 : Arsitektur Atmega 2560v

ATmega2560 diproduksi dalam bentuk IC, sehingga untuk *interfacing* dengan perangkat elektronika lain diperlukan *expansion board*. Sebenarnya *expansion board* untuk Atmega 2560v sudah dirancang oleh Atmel namun memiliki harga yang sangat mahal sehingga dibutuhkan perancangan *expansion board* dari Atmega 2560v. Untuk itu dirancang *expansion board* yang sederhana menggunakan *oscillator* 8Mhz. Perancangan *expansion board* ini harus berdasarkan pada *datasheet* Atmega 2560v yang terlampir dan menggunakan *software* desain elektronika Eagle 5.6.0 dari CADsoft karena mudah digunakan dan *open source*.

Berikut adalah schematic dari *expansion board* Atmega 2560v :

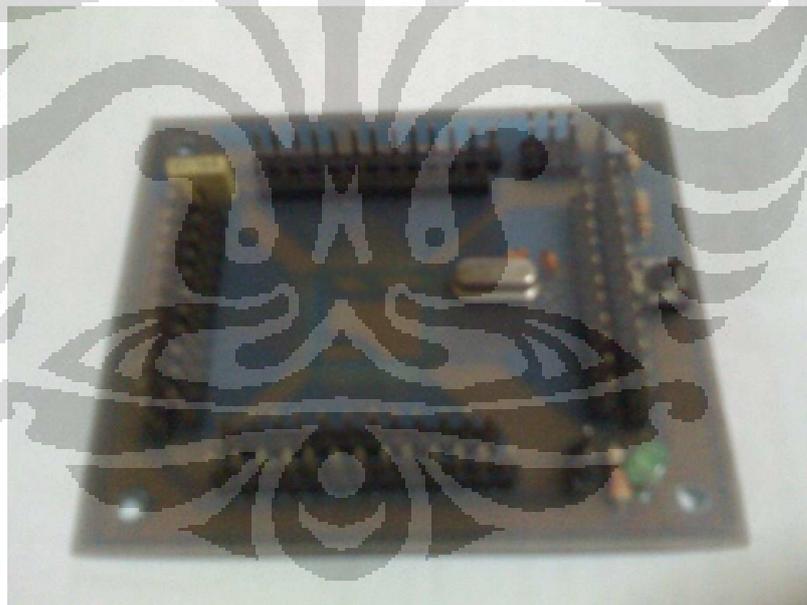


Gambar 3.6 : Skematik ATmega 2560v

Seperti terlihat pada gambar, setiap pin di ekspansi, hanya pin – pin support saja yang ditambahkan hardware seperti oscillator dan port *programming* 6 pin standar Atmel karena untuk memprogram Atmega 2560v digunakan *programmer* AVR ISP MKII.



Gambar 3.7 : Expansion Board Atmega 2560v Tampak Belakang



Gambar 3.8 : Expansion Board Atmega 2560v Tampak Depan

3.2.2 Driver Stepper Motor

Untuk pengendalian stepper motor melalui mikrokontroler diperlukan perangkat elektronik sebagai penghubung yaitu driver stepper motor. Driver stepper motor diperlukan karena perbedaan suplai daya yang dikeluarkan

Universitas Indonesia

mikrokontroler dengan yang dibutuhkan oleh stepper motor. Mikrokontroler menggunakan tegangan kerja 0 – 5 V, sedangkan stepper motor menggunakan 10 – 44 VDC. Selain itu, stepper motor yang akan dikontrol harus mempunyai kemampuan berganti arah dan pengaturan kecepatan. Algoritma kontrol arah dan kecepatan ini diberikan oleh mikrokontroler dan dijalankan oleh driver stepper motor. Driver stepper motor juga berguna sebagai pengaman dari arus balik akibat adanya medan elektromagnetik dari stepper motor. Arus balik ini sangat berbahaya bagi mikrokontroler.

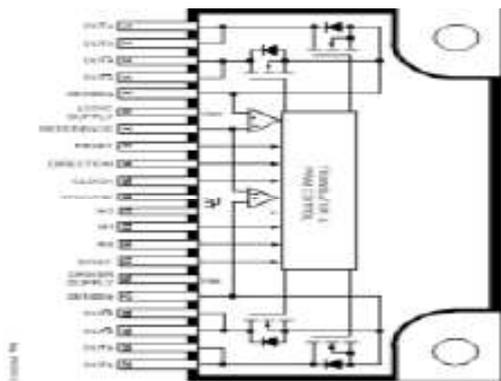
Driver stepper motor yang digunakan untuk menggerakkan stepper motor pada Robot 5 Derajat Kebebasan adalah IC SLA7062M. Berikut ini adalah spesifikasi IC driver stepper motor tersebut berdasarkan datasheetnya :

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS	
Driver Supply Voltage, V_{BB}	46 V
Load Supply Voltage, V_M	46 V
Output Current, I_O	
SLA7060M	1.0 A*
SLA7061M	2.0 A*
SLA7062M	3.0 A*
Logic Supply Voltage, V_{DD}	7.0 V
Logic Input Voltage Range, V_I	-0.3 V to $V_{DD} + 0.3 V$
Sense Voltage, V_S	$\pm 2.0 V$†
Reference Input Voltage Range, V_{REF}	-0.3 V to $V_{DD} + 0.3 V$
Package Power Dissipation, P_D	See Graph
Junction Temperature, T_J	+150°C
Operating Temperature Range, T_A	-20°C to +85°C
Storage Temperature Range, T_S	-30°C to +150°C

* Output current rating may be limited by duty cycle, ambient temperature, and heat sinking. Under any set of conditions, do not exceed the specified current rating or junction temperature.

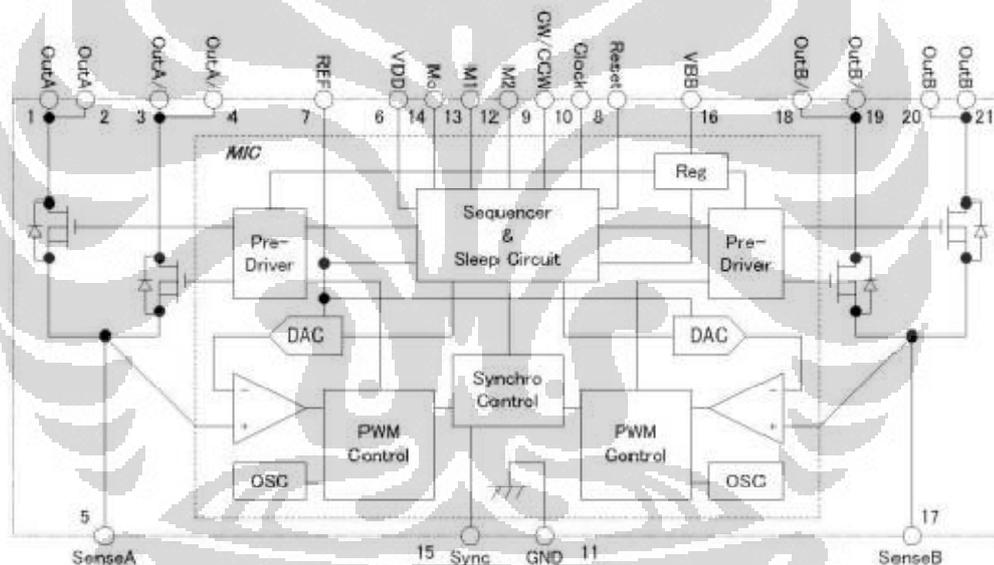
† Internal filtering provides protection against transients during the first 1 μs of the current-sense pulse.

Gambar 3.9 : Spesifikasi SLA7062M



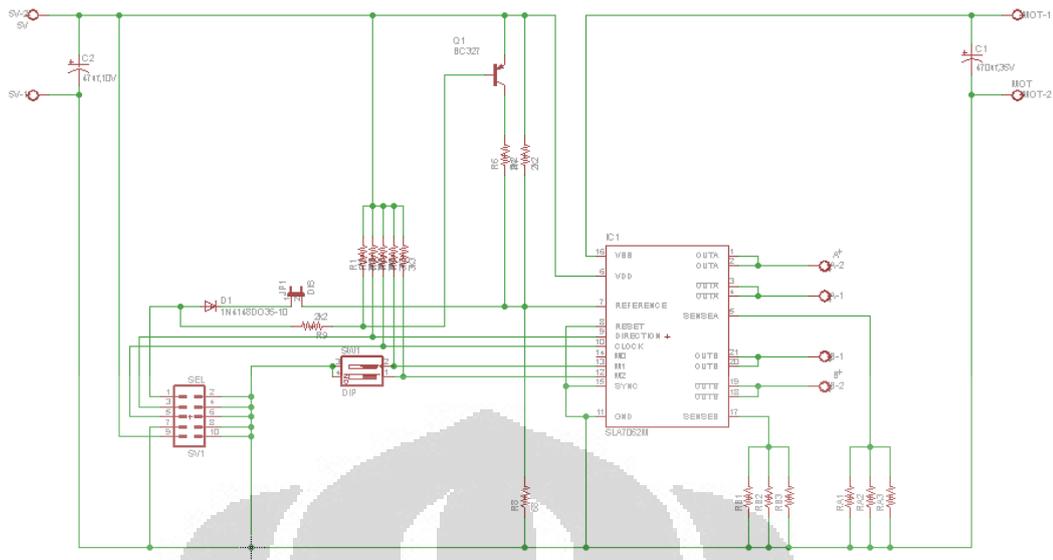
Gambar 3.10 : IC SLA7062M

IC driver stepper motor SLA7062M mempunyai blok diagram sebagai berikut :



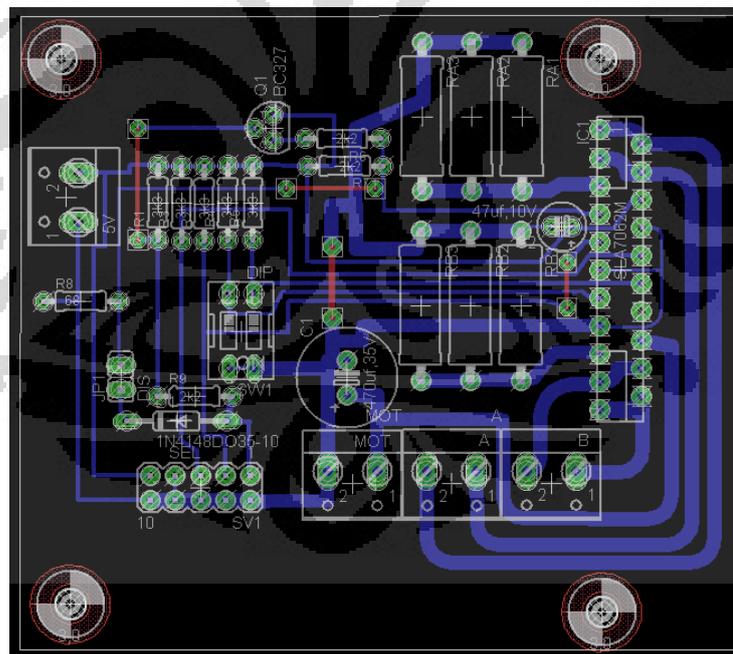
Gambar 3.11 : Blok Diagram SLA7062M

Dari spesifikasi di atas kemudian dirancang board control untuk *interfacing* ke microcontroller. SLA7062M memiliki kemampuan untuk menggerakkan stepper motor dengan berbagai mode gerakan atau step. Tetapi, pada penelitian Rancang Bangun Robot 5 Derajat Kebebasan, pengaturan mode step dilakukan secara manual . Berikut adalah skematik dari rangkaian tersebut :



Gambar 3.12 : Skematik SLA7062M

Berikut adalah PCB *layout single layer* dari hardware stepper motor driver tersebut :

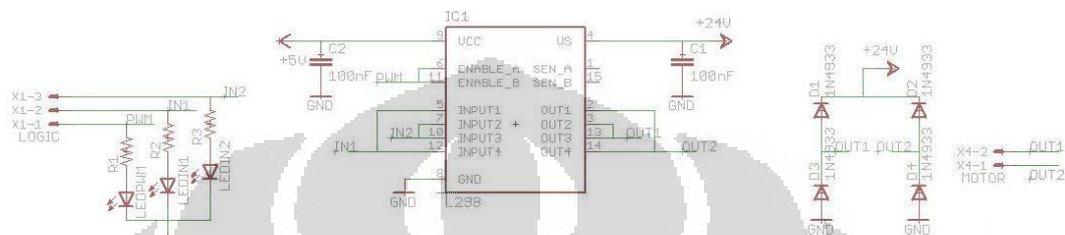


Gambar 3.13 : PCB Layout Stepper Motor Driver

3.2.3 Driver Elektrik Brake

Pada Rancang Bangun Robot 5 Derajat Kebebasan menggunakan dua buah elektrik brake yaitu pada aksis-4 dan aksis-5. Elektrik brake ini bersifat NC

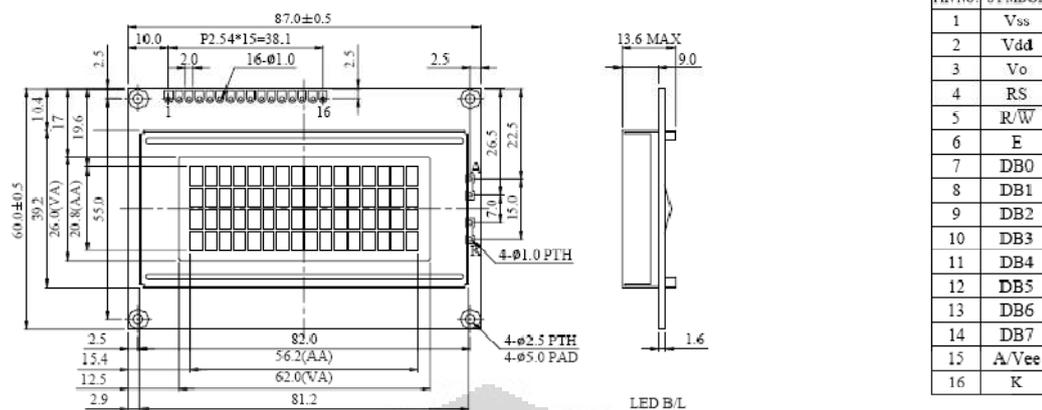
(Normally Closed) sehingga perlu adanya driver untuk mengaktifkan brake tersebut, sehingga menjadi *open condition*. Elektrik brake tersebut membutuhkan tegangan kerja 24 VDC. Oleh karena itu, untuk memudahkan pengembangan sistem kontrol, driver elektrik brake menggunakan IC L298. Penggunaan L298 ini berdasarkan ketersediaan komponen yang ada di laboratorium dan ditambah fitur PWM yang tersedia di L298.



Gambar 3.14 : Skematik L298D

3.2.4 Modul LCD (Liquid Crystal Display)

LCD digunakan dalam rangkaian sistem kontrol perangkat display sekaligus memberikan informasi kepada user mengenai berbagai macam proses yang terjadi dalam microcontroller. Modul LCD ini sangat berguna untuk membantu programmer dalam debugging program pada microcontroller. Modul LCD yang digunakan adalah LCD karakter 20 x 4.



Gambar 3.15 : LCD 20 x 4

3.2.5 Power Supply

Power supply digunakan untuk memberikan daya pada semua rangkaian elektronik. *Power supply* yang digunakan adalah 24VDC – 10 A dan 12VDC – 4A. Untuk power logika digital digunakan *power supply* 5V – 3A. Berikut ini adalah *power supply* yang digunakan :



Gambar 3.16 : Power Supply 5VDC dan 24VDC

3.2.6 Sistem Kontrol Keseluruhan

Seluruh perangkat elektronik diatas kemudian dirangkai sehingga menjadi sebuah *control unit* dari Robot 5 Derajat Kebebasan. Berikut adalah gambar *control unit* tersebut :



Gambar 3.17 : Sistem Kontrol Keseluruhan

BAB 4

PEMBANGUNAN *SOFTWARE INTERFACE*

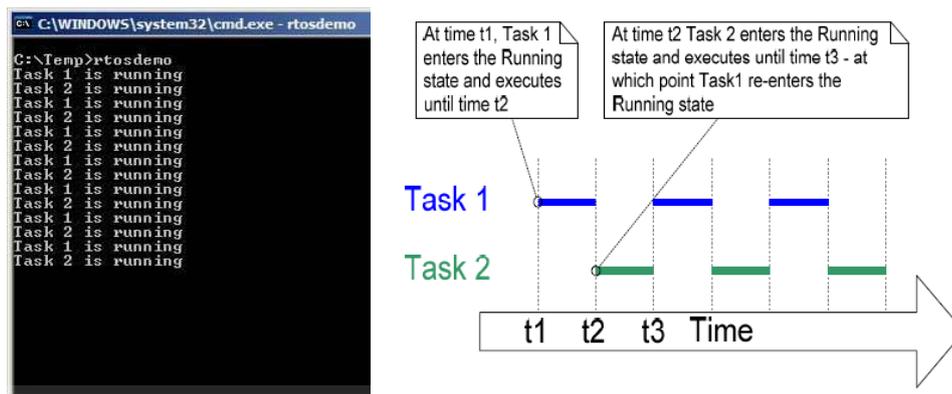
Pada penelitian Rancang Bangun Robot 5 Derajat Kebebasan ini, pembangunan *software interface* dibagi menjadi dua bagian, yaitu : pembangunan program pada mikrokontroller dan pembangunan program pada PC. Pembangunan program pada mikrokontroller perlu ditambahkan *embedded* sistem agar dapat melakukan gerakan multitasking. Gerakan multitasking ini tidak dapat dilakukan tanpa bantuan sistem tersebut. Sedangkan pembangunan program pada PC perlu ditambahkan perhitungan invers kinematik dan perhitungan interpolasi. Interpolasi yang digunakan adalah interpolasi bezier.

4.1 PROGRAM PADA MIKROKONTRTOLLER

Mikrokontroller diprogram dengan algoritma yang disesuaikan dengan *software interface* ke PC. Program pada mikrokontroller harus mampu menerima dan mengirim data ke komputer dan harus mampu mengontrol perangkat keras lainnya yang terhubung ke robot.

4.1.1 Embedded System

Embedded sistem yang digunakan adalah FreeRTOS dan merupakan aplikasi yang *open source*. Penggunaan FreeRtos ini dengan maksud untuk membuat suatu operasi pengerjaan yang *real time*. Dimana dua pengerjaan dapat dilakukan secara bersamaan dengan waktu yang bersamaan juga. Biasanya dalam arsitektur mikrokontroller, pengerjaan secara bersamaan dibutuhkan waktu tunggu. Gambar di bawah ini menjelaskan cara kerja FreeRtos :



Gambar 4.1 : Output Hasil Eksekusi Dilihat Secara Aktual

4.1.2 Program Pada Code Vision AVR

Code Vision AVR digunakan sebagai *compiler* untuk memberikan perintah ke mikrokontroler. Perintah tersebut berupa suatu memori yang disimpan di dalam mikrokontroler untuk mengeksekusi kerja.

4.1.2.1 Fungsi Utama

Fungsi utama berfungsi untuk mengeksekusi tugas-tugas yang akan dikerjakan. Tugas-tugas tersebut sebagai berikut :

1. Tugas menjalankan sumbu-x
2. Tugas menjalankan sumbu-y
3. Tugas menjalankan sumbu-z
4. Tugas menjalankan rotasi-z
5. Tugas menjalankan rotasi-x

Algoritma :

START

- 1) Setting mikrokontroler
- 2) Setting source file FreeRtos
- 3) Setting header file mikrokontroler dan FreeRtos
- 4) Mulai loop menunggu perintah
- 5) IF nilai untuk menggerakkan sumbu-x diterima
 - a. Tampung nilai sumbu-x
 - b. Kirim karakter verifikasi
- 6) IF nilai untuk menggerakkan sumbu-y diterima
 - a. Tampung nilai sumbu-y
 - b. Kirim karakter verifikasi
- 7) IF nilai untuk menggerakkan sumbu-z diterima
 - a. Tampung nilai sumbu-z
 - b. Kirim karakter verifikasi
- 8) IF nilai untuk menggerakkan rotasi-z diterima
 - a. Tampung nilai rotasi-z
 - b. Kirim karakter verifikasi
- 9) IF nilai untuk menggerakkan rotasi-x diterima
 - a. Tampung nilai rotasi-x
 - b. Kirim karakter verifikasi
- 10) IF nilai sumbu-x && sumbu-y && sumbu-z && rotasi-z && rotasi-x != NULL
 - a. Gerakan semua tugas

b. Keluar dari loop

END

4.1.2.2 Pengaturan I/O Port Pada Mikrokontroler

Fungsi untuk mengatur fungsi setiap I/O PORT.

Algoritma :

```

START
  1) Setting PORT A
  2) Setting PORT B
  3) Setting PORT D
  4) Setting PIN E
  5) Setting PIN F
END
  
```

4.1.2.3 Pengaturan LCD

Setting LCD pada port C.

Algorithm :

```

START
  1) Mulai penulisan in-line assembly language.
  2) Setting LCD pada PORT C.
  3) Tutup penulisan in-line assembly language.
END
  
```

4.1.2.4 Pengaturan Clock Speed

Setting oscillator microcontroller

Oscillator yang dipakai adalah 8Mhz

Faktor pembagi 1

Kecepatan dapat dikurangi dengan menaikkan faktor pembagi

Algorithm :

```

START
  1) Setting oscillator.
  2) Setting factor pembagi.
END
  
```

4.1.2.5 Pengaturan Komunikasi Serial

Fungsi pengaturan parameter komunikasi serial, PORT komunikasi serial yang dipakai adalah serial 2.

Algorithm :

```

START
  1) Setting tipe data serial communication, 8 Data, 1 Stop, No Parity
  2) Aktifasi transmitter receiver
  3) Setting mode serial asynchronous
  4) Setting baud rate 115200 BPS.
END
  
```

4.1.2.6 Fungsi Pengontrolan Stepper Motor

Fungsi ini untuk mengatur frekuensi sinyal stepper motor.

Input : Parameter pergerakan axis.

Output: Pergerakan Stepper Motor

Algorithm :

```

START
  1) Menunggu data yang masuk.
  
```

2) Konversi gerakan menjadi perubahan step
END

4.1.2.7 Fungsi Pengiriman Text Secara Serial

Fungsi mengirim data text melalui serial port 2

Input : Text dari user
Output: Data bit menuju PC

Algorithm :
START
1) Periksa registry serial apakah kosong.
2) Apabila kosong, data = registry.
3) Kirim semua text.
END

4.1.2.8 Fungsi Pengiriman Nilai Secara Serial

Fungsi mengirim nilai melalui serial port 2

Input : Nilai dari user
Output: Data bit menuju PC

Algorithm :
START
1) Periksa registry serial apakah kosong.
2) Apabila kosong, data = registry.
3) Kirim semua data.
END

4.1.2.9 Mengehentikan Pergerakan Motor

Fungsi-fungsi untuk memberhentikan pergerakan motor

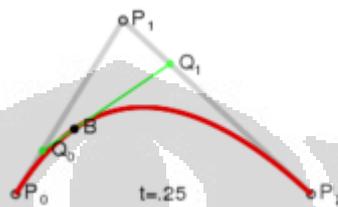
Algorithm :
START
1) Mengatur signal ke stepper motor driver menjadi stop
END

4.2 PROGRAM PADA PC

Pada PC terdapat program untuk mengolah data dari pembacaan CL-File dan mengirimnya kepada mikrokontroller. Proses pengiriman dilakukan dengan cara komunikasi serial dari PC ke mikrokontroller. Tentu saja, proses komunikasi ini harus melalui pembukaan port serial pada PC. Sedangkan pada mikrokontroller, cukup menggunakan UART. Pembuatan program pada PC tidak sekedar pembukaan port untuk komunikasi dan pengiriman data posisi. Pembuatan program pada PC disertakan juga perhitungan interpolasi bezier dan perhitungan invers kinematik. Untuk lebih jelasnya mengenai kedua perhitungan tersebut akan dijelaskan pada subbab di bawah ini.

4.2.1 Interpolasi Bezier

Interpolasi bezier merupakan fungsi dari persamaan kurva bezier. Interpolasi bezier digunakan dengan bantuan kontrol *point*. Kontrol point ini yang nantinya akan digunakan sebagai gerakan dari stepper motor. Pemilihan interpolasi Bezier dikarenakan tugas yang pernah diberikan pada mata kuliah CAD/CAM, sehingga untuk pembuatan cukup mudah.



Gambar 4.2 : *Quadratik Kurva Bezier*

4.2.2 Invers Kinematik

Inverse kinematics merupakan suatu perhitungan pergerakan dan orientasi robot berdasarkan posisi yang ingin dicapai oleh robot. Posisi tersebut yang akan menentukan parameter pergerakan dari masing – masing axisnya. Untuk menerapkan inverse kinematics diperlukan adanya algoritma khusus untuk menentukan parameter pergerakan yang diinginkan. Aplikasi inverse kinematics sering digunakan pada robot yang memerlukan kecerdasan dalam melaksanakan tugasnya.



Gambar 4.3 : *Arah Pergerakan Robot*

Untuk suatu robot dengan n-derajat kebebasan, hubungan antara frame ke-n dan frame base dapat dinyatakan dengan:

$${}^0_nT = {}^0_1T {}^1_2T \dots {}^{1-n}_nT$$

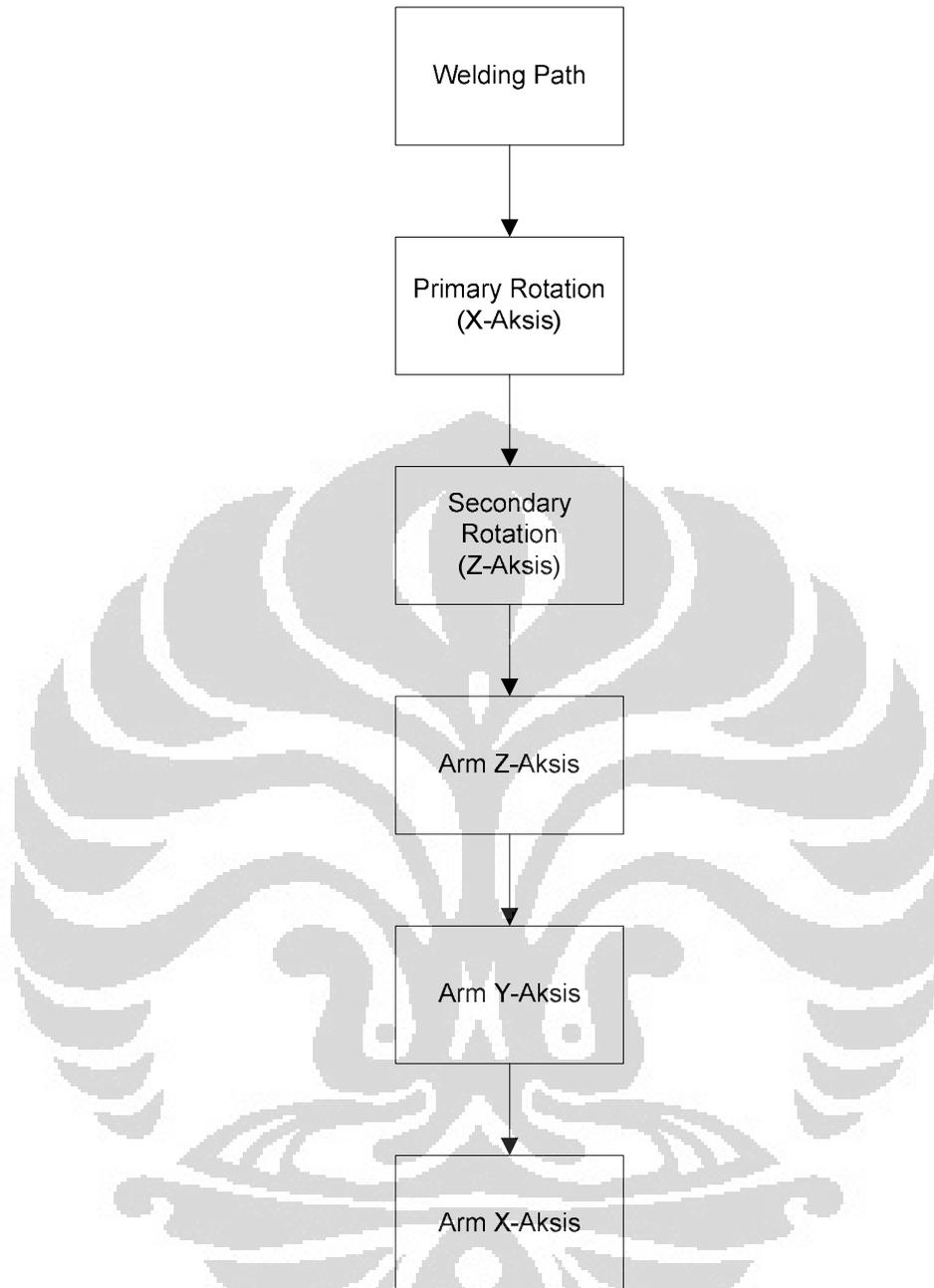
Dimana nilai ${}^{1-n}_nT$ yaitu,

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dimana i , α , d , a , dan θ adalah parameter joint dan link denavite hartenberg. Untuk mendapatkan nilai dari posisi dan orientasi, maka persamaan di atas disamakan dengan persamaan dibawah ini

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_x \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Untuk lebih jelas mengenai pergerakan frame robot bisa dilihat struktur dibawah ini:



Gambar 4.4 : Flowchart Pergerakan Robot

Model matematika untuk menggambarkan pergerakan robot itu adalah

$$[i \ j \ k \ 1]^T = Trans(P_x, P_y, P_z) Rot(Z, \theta c) Rot(X, \theta b) [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$$

$$[x \ y \ z \ 1]^T = Trans(P_x, P_y, P_z) Rot(Z, \theta c) Rot(X, \theta b) [0 \ 0 \ -L_t \ 1]^T$$

$$[x' \ y' \ z' \ 1]^T = [a \ b \ c - L_t \ 1]^T$$

Melaui perhitungan diperoleh

Universitas Indonesia

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ k \\ 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta c & -\sin \theta c & 0 & 0 \\ \sin \theta c & \cos \theta c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta b & -\sin \theta b & 0 \\ 0 & \sin \theta b & \cos \theta b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ k \\ 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \cos \theta c & -\sin \theta c \cos \theta b & \sin \theta c \sin \theta b & a \\ \sin \theta c & \cos \theta c \cos \theta b & -\cos \theta c \sin \theta b & b \\ 0 & \sin \theta b & \cos \theta b & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ k \\ 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \cos \theta c \sin \theta b \\ \sin \theta c \sin \theta b \\ \cos \theta b \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\theta b = \arccos(k)$$

$$\theta c = \arctan\left(\frac{j}{i}\right)$$

$$-\pi/2 \leq \theta b \leq \pi/2$$

$$-\pi \leq \theta c \leq \pi$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta c & -\sin \theta c & 0 & 0 \\ \sin \theta c & \cos \theta c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta b & 0 & -\sin \theta b & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta b & 0 & \cos \theta b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -L_t \\ 1 \end{bmatrix}^T$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \cos \theta c \cos \theta b & -\sin \theta c & -\cos \theta c \sin \theta b & a \\ \sin \theta c \cos \theta b & \cos \theta c & -\sin \theta c \sin \theta b & b \\ \sin \theta b & 0 & \cos \theta b & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -L_t \\ 1 \end{bmatrix}^T$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} L_t \cos \theta c \sin \theta b + a \\ L_t \sin \theta c \sin \theta b + b \\ -L_t \cos \theta b + c \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$x' = x - L_t \cos \theta c \sin \theta b$$

$$y' = y - L_t \sin \theta c \sin \theta b$$

$$z' = z + L_t \cos \theta b$$

4.2.3 Program Pada Turbo C

Untuk pembuatan program pada PC sebenarnya dapat dilakukan menggunakan perangkat lunak apa saja. Akan tetapi, penggunaan Turbo C dilakukan karena perangkat lunak ini yang tidak terlalu menggunakan banyak memory dan kemudahan bahasa yang selama ini sudah dipakai yaitu bahasa C. Pada subbab di bawah ini akan dijelaskan mengenai pembuatan algoritma :

```

Polygon point i,j,k
0.394011 0.000000 0.919106
0.393820 0.000000 0.919187
0.393574 0.000000 0.919293

Curve point i,j,k
0.394011 0.000000 0.919106
0.393990 0.000000 0.919114
0.393970 0.000000 0.919123
0.393949 0.000000 0.919132
0.393928 0.000000 0.919141
0.393907 0.000000 0.919150
0.393885 0.000000 0.919160
0.393863 0.000000 0.919169
0.393840 0.000000 0.919179
0.393818 0.000000 0.919189
0.393795 0.000000 0.919198
0.393771 0.000000 0.919208
0.393748 0.000000 0.919219
0.393724 0.000000 0.919229
0.393700 0.000000 0.919239
0.393675 0.000000 0.919250
0.393650 0.000000 0.919260
0.393625 0.000000 0.919271
0.393600 0.000000 0.919282
1.181214 0.000000 2.757668
Angle b:23.204292
Arah axis b  $\theta=(-)/1=(+):1$ 
Sudut axis b:23.000000

Angle c:90.000000
Arah axis c  $\theta=(-)/1=(+):1$ 
Sudut axis c:90.000000

Koordinat axis x: 250.000000
Koordinat axis y: 430.000000
Koordinat axis z: 130.000000
Koordinat axis x invers: 308.707603
Koordinat axis y invers: 430.000000
Koordinat axis z invers: 266.946768

Koordinat axis z: 130.000000
Koordinat axis x invers: 308.707603
Koordinat axis y invers: 430.000000
Koordinat axis z invers: 266.946768

Angle b:23.203035
Arah axis b  $\theta=(-)/1=(+):1$ 
Sudut axis b:23.000000

Angle c:90.000000
Arah axis c  $\theta=(-)/1=(+):1$ 
Sudut axis c:90.000000

Koordinat axis x: 251.052643
Koordinat axis y: 428.947388
Koordinat axis z: 131.052628
Koordinat axis x invers: 309.757242
Koordinat axis y invers: 428.947388
Koordinat axis z invers: 268.000684

Angle b:23.201752
Arah axis b  $\theta=(-)/1=(+):1$ 
Sudut axis b:23.000000

Angle c:90.000000
Arah axis c  $\theta=(-)/1=(+):1$ 
Sudut axis c:90.000000

Koordinat axis x: 252.105255
Koordinat axis y: 427.894775
Koordinat axis z: 132.105255
Koordinat axis x invers: 310.806788
Koordinat axis y invers: 427.894775
Koordinat axis z invers: 269.054626

```

Gambar 4.5 : Hasil Dari Perhitungan Invers Kinematik dan Interpolasi Bezier

4.2.3.1 Fungsi Utama

Fungsi ini yang terdapat pada main program dan berisikan tentang eksekusi pembacaan CL-File dan Perhitungan Invers Kinematik.

Algorithm :

START

- 1) Membaca CL-File.
- 2) Mengambil 3 titik dari CL-File yang berisikan posisi dan orientasi.
- 3) Dari 3 titik dilakukan pembuatan interpolasi dengan menggunakan fungsi bezier.
- 4) Hasil dari interpolasi adalah 20 titik dalam persamaan kurva bezier dengan jarak antara tiap titik 2 mm.
- 5) Titik-titik yang baru tersebut (x,y,z,i,j,dan k) dilakukan perhitungan invers kinematik.
- 6) Kirim data dari hasil perhitungan invers kinematik
 - a. Membuka PORT komunikasi

Universitas Indonesia

- b. Mengirim data posisi sumbu-x
 - c. Menerima karakter verifikasi dari mikrokontroler untuk sumbu-x telah diterima
 - d. Mengirim data posisi sumbu-y
 - e. Menerima karakter verifikasi dari mikrokontroler untuk sumbu-y telah diterima
 - f. Mengirim data posisi sumbu-z
 - g. Menerima karakter verifikasi dari mikrokontroler untuk sumbu-z telah diterima
 - h. Mengirim data posisi untuk gerakan rotasi-z
 - i. Menerima karakter verifikasi dari mikrokontroler untuk rotasi-z telah diterima
 - j. Mengirim data posisi untuk gerakan rotasi-x
 - k. Menerima karakter verifikasi dari mikrokontroler untuk rotasi-x telah diterima
- 7) Terus melakukan pengulangan sampai pembacaan CL-File selesai.
- END

4.2.3.2 Fungsi Membuka PORT Komunikasi

Fungsi membuka PORT komunikasi.
PORT yang dipakai adalah COM1.

Algorithm :

- START
- 1) Matikan interrupt COM1.
 - 2) Pengaturan baud rate, 115200BPS.
 - 3) Pengaturan tipe serial, 8 Bits, No Parity, 1 Stop Bit.
 - 4) Menyalakan DTR, RTS, and OUT2.
- END

4.2.3.3 Fungsi Mengirim Data Komunikasi Serial

Fungsi mengirim data melalui serial port.

Algorithm :

- START
- 1) Reset counter dan mendefinikan array buffer.
 - 2) Melakukan loop pengecekan input.
 - 3) IF ada input tampilkan data.
- END

4.2.3.4 Fungsi Menerima Data Komunikasi Serial

Fungsi menerima data dari serial port.
Setelah data diterima, data tersebut ditampilkan.

Algorithm :

- START
- 1) Reset counter dan mendefinikan array buffer.
 - 2) Melakukan loop pengecekan input.
 - 3) IF ada input tampilkan data.
- END

4.2.3.5 Fungsi Interpolasi Bezier

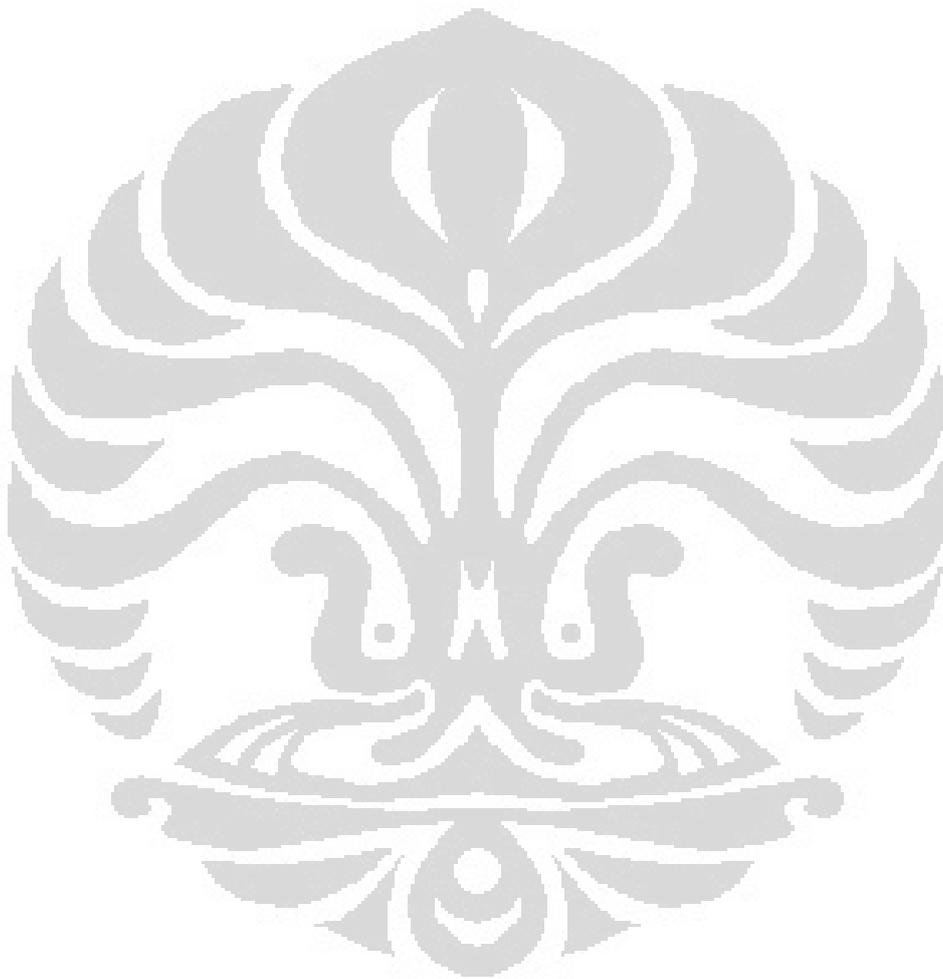
Fungsi untuk membuat interpolasi kurva bezier.
Setelah data diterima yaitu berupa 3 titik.

Algorithm :

- START
- 1) Buat fungsi untuk menghitung faktorial.

- 2) Buat fungsi untuk menghitung fungsi faktorial yang nantinya menjadi Bernstein Basis.
- 3) Fungsi untuk menghitung Bernstein Basis.
- 4) Pembuatan Fungsi interpolasi bezier untuk membuat kontrol point

END



BAB 5

PENGUJIAN ROBOT 5 DERAJAT KEBEBASAN

Pada penelitian ini dilakukan pengujian gerakan Robot 5 Derajat Kebebasan. Tujuan dilakukan pengujian ini untuk mengetahui seberapa besar kegagalan yang terjadi akibat gerakan dari tiap – tiap lengan Robot 5 Derajat Kebebasan. Pengujian gerakan dilakukan pada masing – masing lengan robot dan belum sampai pada pengujian gerakan secara bersamaan. Pengujian gerakan dimulai dari lengan sumbu-x sampai lengan sumbu-z.

5.1 PERGERAKAN SUMBU-X

Pada lengan sumbu-x, pengujian dilakukan untuk mengetahui dan sekaligus mendapatkan nilai karakteristik dari gerakan yang dilakukan oleh aktuator yaitu, stepper motor. Lengan sumbu-x merupakan lengan yang memiliki massa paling besar dibandingkan dengan lengan robot yang lainnya. Oleh karena itu, dengan pengujian ini dapat diperoleh suatu nilai yang nantinya akan disimpan pada memori mikrokontroler.

5.1.1 Penghitungan Jumlah Step Dari Jarak Antar Limit Switch Pada Sumbu-x

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berapa jumlah step atau pulsa yang telah diberikan oleh mikrokontroler untuk bergerak dari limit switch yang satu ke limit switch yang satunya lagi. Hasil dari pengujian ini nantinya akan disimpan pada mikrokontroler untuk referensi *working space* pada sumbu-x. Untuk pengujian ini, diperlukan beberapa peralatan diantaranya adalah :

1. Mikrokontroler
2. Limit Switch
3. LCD Display
4. Stopwatch

Metode yang dilakukan selama pelaksanaan pengujian ini adalah dengan pembuatan algoritma counting pada mikrokontroller dan menghitung berapa waktu yang dibutuhkan dari limit switch yang satu ke limit switch yang satunya lagi. Di bawah ini algoritma counting yang disisipkan ke mikrokontroller.

```

// Fungsi untuk membuat gerakan stepper motor
// Fungsi untuk looping stepper axis 1 counting
void stepper_axis_1_counter_kiri()
{
    char lcd[20];
    unsigned long int counter_axis_1=0;
    for (;;)
    {
        clk_driver_stepper_axis_1_ccw();
        if (PINF.2 == 0)
        {
            for (;;)
            {
                clk_driver_stepper_axis_1_cw();
                if (PINF.1 == 0)
                {
                    for (;;)
                    {
                        clk_driver_stepper_axis_1_stop();
                        lcd_clear();
                        ltoa(counter_axis_1,lcd);
                        lcd_puts(lcd);
                        delay_ms(2000);
                    }
                }
                counter_axis_1++;
            }
        }
    }
}

void stepper_axis_1_counter_kanan()
{
    char lcd[20];
    unsigned long int counter_axis_1=0;

```

```

for (;;)
{
  clk_driver_stepper_axis_1_cw();
  if (PINF.1 == 0)
  {
    for (;;)
    {
      clk_driver_stepper_axis_1_ccw();
      if (PINF.2 == 0)
      {
        for (;;)
        {
          clk_driver_stepper_axis_1_stop();
          lcd_clear();
          ltoa(counter_axis_1,lcd);
          lcd_puts(lcd);
          delay_ms(2000);
        }
      }
      counter_axis_1++;
    }
  }
}

```

Pengujian berlangsung selama 30 percobaan dengan dua pergerakan, yakni: pergerakan ke sumbu-x positif dan pergerakan sumbu-x negatif. Dari pengujian diperoleh besaran nilai yang bervariasi, untuk lebih jelasnya lihat Tabel 5.1

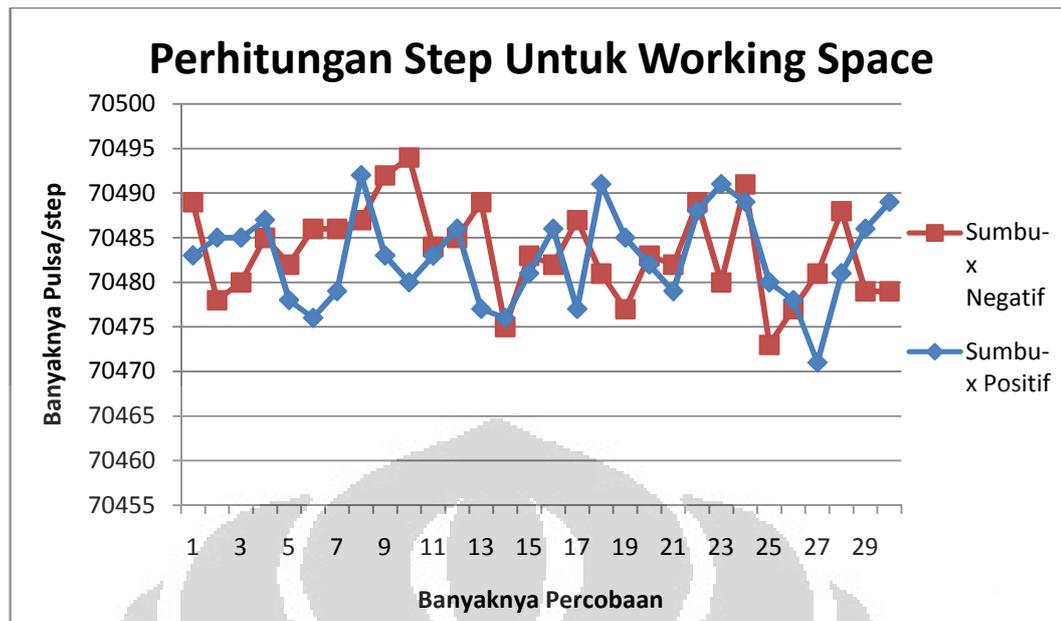
Tabel 5.1 : Perhitungan Jumlah Step Dari Jarak Limit Switch

Sumbu-x Positif			Sumbu-x Negatif		
No	Pulsa	waktu (detik)	No	Pulsa	waktu (detik)
1	70483	100.5	1	70489	100.4
2	70485	99.8	2	70478	100.3
3	70485	99.8	3	70480	99.3
4	70487	100.1	4	70485	100
5	70478	100.1	5	70482	99.8
6	70476	99.8	6	70486	100.4
7	70479	99.8	7	70486	100.1

8	70492	99.9
9	70483	100.3
10	70480	99.9
11	70483	99.7
12	70486	99.4
13	70477	99.7
14	70476	99.6
15	70481	100.1
16	70486	100.2
17	70477	99.8
18	70491	99.9
19	70485	99.9
20	70482	100
21	70479	100.3
22	70488	100.4
23	70491	99.9
24	70489	99.8
25	70480	100.4
26	70478	100.1
27	70471	100.2
28	70481	99.9
29	70486	99.8
30	70489	100

8	70487	99.5
9	70492	99.8
10	70494	100.1
11	70484	99.9
12	70485	99.9
13	70489	99.9
14	70475	99.9
15	70483	100
16	70482	99.8
17	70487	100
18	70481	100.1
19	70477	99.8
20	70483	100.3
21	70482	100.3
22	70489	100.1
23	70480	99.9
24	70491	100
25	70473	99.8
26	70477	100.2
27	70481	100.3
28	70488	99.9
29	70479	99.7
30	70479	100.1

Dari tabel tersebut dapat diketahui nilai rata – rata dan seberapa besar nilai deviasi. Untuk nilai rata – rata pergerakan sumbu-x positif diperoleh nilai sebesar 70482.4 step atau dapat dibulatkan menjadi 70482 step dan untuk nilai deviasi pada pergerakan yang sama diperoleh nilai sebesar 5.195 step. Sedangkan untuk pergerakan ke arah sumbu-x negatif, nilai rata – rata diperoleh sebesar 70483.4 step dan untuk nilai deviasi pada pergerakan yang sama diperoleh nilai sebesar 5.164 step. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



Gambar 5.1 : Grafik Counting Step Selama 30 Percobaan Pada Sumbu-x

5.1.2 Uji Linearity

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berapa nilai error akibat dari digerakannya lengan sumbu-x ke arah sumbu-x positif lalu setelah sampai pada posisi yang telah ditentukan digerakannya kembali ke arah sumbu-x negatif dengan gerakan tiba-tiba. Nilai error tersebut yang nantinya menjadi acuan berapa nilai interpolasi yang seharusnya dapat diberikan. Untuk pengujian ini, diperlukan beberapa peralatan diantaranya adalah :

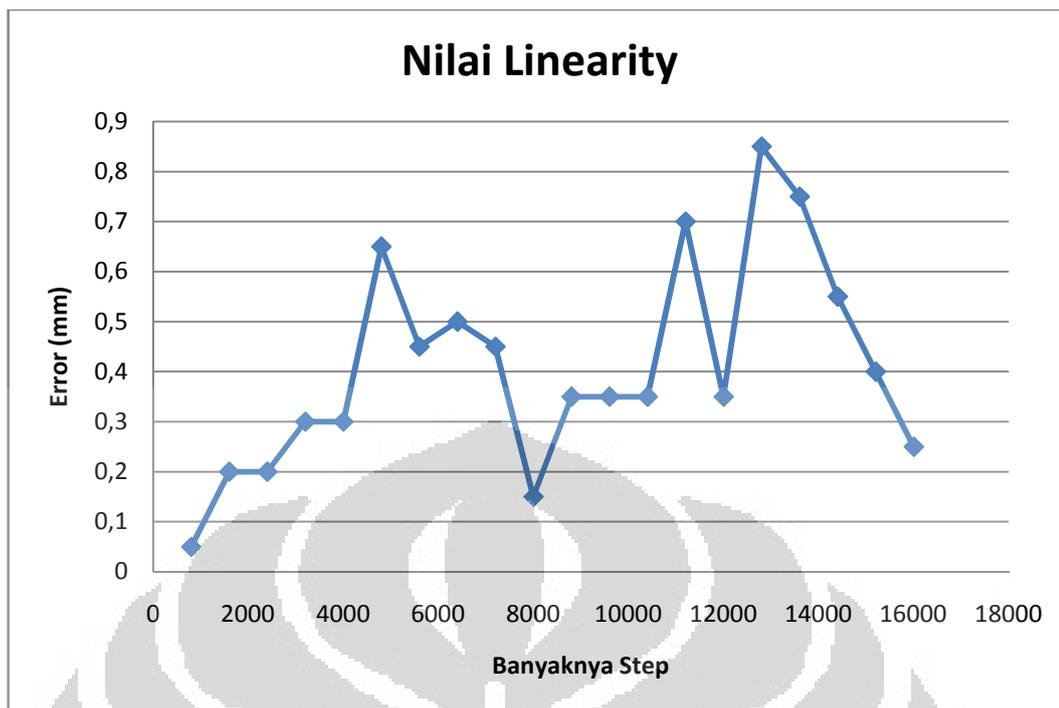
1. Mikrokontroller.
2. Jangka Sorong

Metode yang dilakukan selama pelaksanaan pengujian ini adalah dengan pembuatan algoritma pergerakan mulai dari 10 mm lalu kembali lagi ke -10 mm dan berakhir sampai pergerakan 200 mm. Dari pengujian diperoleh besaran nilai yang bervariasi, untuk lebih jelasnya lihat Tabel 5.2.

Tabel 5.2 : Pengujian Linearity dari 10 mm – 200 mm

Sumbu-X		
No	Pulsa	Error Displacement
1	800	0.05
2	1600	0.2
3	2400	0.2
4	3200	0.3
5	4000	0.3
6	4800	0.65
7	5600	0.45
8	6400	0.5
9	7200	0.45
10	8000	0.15
11	8800	0.35
12	9600	0.35
13	10400	0.35
14	11200	0.7
15	12000	0.35
16	12800	0.85
17	13600	0.75
18	14400	0.55
19	15200	0.4
20	16000	0.25

Dari tabel tersebut dapat diketahui, bahwa pergerakan tersebut bukan merupakan persamaan linear. Dimana semakin bertambahnya jarak, nilai error tidak ikut bertambah secara linear. Dari tabel tersebut dapat diketahui rata – rata nilai backlash adalah 0.4075 mm. Sedangkan untuk besar penyimpangannya adalah 0.209 mm. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



Gambar 5.2 : Grafik Error Linearity Terhadap Jarak Pada Sumbu-x

5.1.3 Uji Posisi Aktual Pada Sumbu-x

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berapa perbedaan nilai dari posisi yang telah ditentukan terhadap posisi aktual. Untuk pengujian ini diperlukan beberapa peralatan diantaranya adalah:

1. Mikrokontroller
2. Alat Ukur Laser Keyence

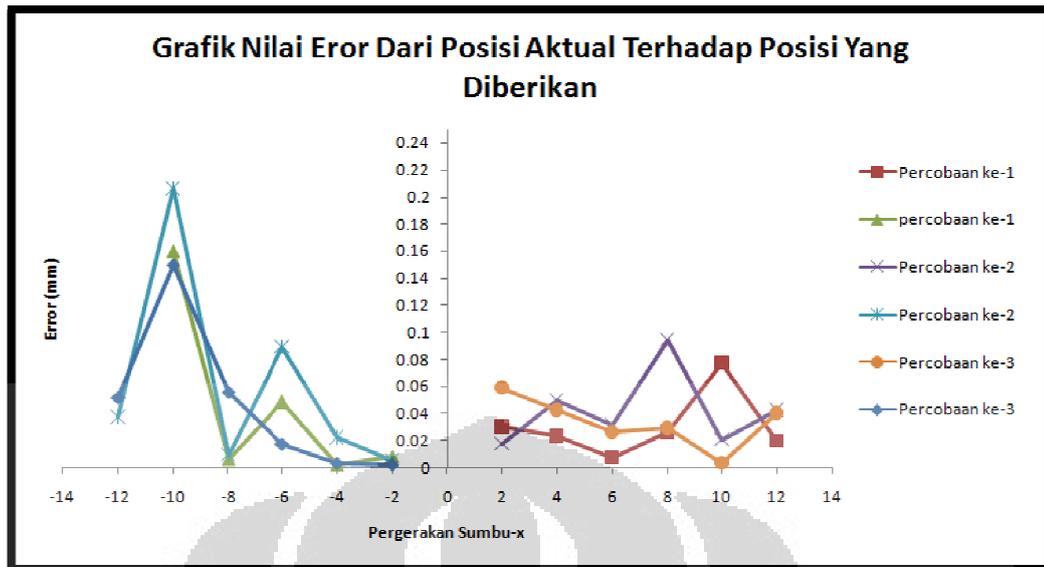
Metode yang dilakukan selama pengujian ini adalah pembuatan algoritma pergerakan ke arah sumbu-x positif mulai dari 2 mm sampai 12 mm, begitupun ke arah sumbu-x negatif. Dengan pergerakan setiap kelipatan 2 diukur menggunakan laser keyence. Untuk lebih jelasnya hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.3

Tabel 5.3 : Pengujian Posisi Aktual Terhadap Posisi Teoritis

No	Gerak (mm)	Aktual Pada Keyence			Aktual Setelah Pengurangan		
		1	2	3	1	2	3
1	+2	-1.97	-1.983	-2.059	0.03	0.017	0.059

2	-2	0.022	0.022	-0.061	0.008	0.005	0.002
3	+4	-4.023	-4.05	-3.958	0.023	0.05	0.042
4	-4	-0.025	-0.072	0.045	0.002	0.022	0.003
5	+6	-6.007	-6.031	-5.974	0.007	0.031	0.026
6	-6	-0.055	-0.12	0.009	0.048	0.089	0.017
7	+8	-8.026	-8.094	-7.971	0.026	0.094	0.029
8	-8	-0.02	-0.103	-0.027	0.006	0.009	0.056
9	+10	-9.923	-9.98	-9.997	0.077	0.02	0.003
10	-10	-0.083	-0.186	-0.147	0.16	0.206	0.15
11	+12	-11.981	-11.958	-11.96	0.019	0.042	0.04
12	-12	-0.026	0.005	-0.012	0.045	0.037	0.052

Pengujian dilakukan sebanyak 3 kali percobaan pada posisi pengukuran yang sama dan diperoleh nilai yang bervariasi mulai dari pengujian yang pertama sampai yang ketiga. Pada percobaan pertama untuk gerakan ke arah sumbu-x positif diperoleh nilai rata – rata error sebesar 0.03 mm dan 0.02 mm untuk besarnya nilai deviasi. Sedangkan untuk gerakan ke arah sumbu-x negatif diperoleh nilai rata – rata error sebesar 0.04 mm dan 0.05 mm untuk besarnya deviasi. Pada percobaan kedua untuk gerakan ke arah sumbu-x positif diperoleh nilai rata – rata error sebesar 0.04 mm dan 0.02 mm untuk besarnya nilai deviasi. Sedangkan untuk gerakan ke arah sumbu-x negative diperoleh nilai rata – rata error sebesar 0.06 mm dan 0.07 mm untuk besarnya nilai deviasi. Pada percobaan terakhir yaitu percobaan ketiga untuk gerakan ke arah sumbu-x positif diperoleh nilai rata – rata error sebesar 0.03 mm dan 0.01 mm untuk besarnya nilai deviasi. Sedangkan untuk pergerakan ke arah sumbu-x negatif diperoleh nilai rata – rata error sebesar 0.04 mm dan 0.05 mm untuk besarnya deviasi. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada grafik di bawah ini.



Gambar 5.3 : Grafik Error Posisi Aktual Terhadap Posisi Yang Diberikan Pada Sumbu-x

5.1.4 Analisa Pergerakan Sumbu-x

Dari ketiga pengujian yang telah dilakukan pada lengan robot sumbu-x, hasil yang diperoleh merupakan representasi dari stepper motor dan driver stepper motor pada lengan robot sumbu-x. Bervariasi nilai selama melakukan pengujian dapat dikarenakan beberapa hal diantaranya adalah:

- Waktu respon dari limit switch yang memberikan sinyal kepada mikrokontroler pada saat pengujian jumlah step dari jarak limit switch.
- Daya tahan driver stepper motor selama melakukan pengujian jumlah step.
- Kehilangan atau kelebihan step pada saat melakukan pergerakan yang diakibatkan oleh stepper motor.

5.2 PERGERAKAN SUMBU-Y DAN PERGERAKAN SUMBU-Z

Pada lengan robot sumbu-y dan sumbu-z dilakukan pengujian yang sama seperti yang dilakukan pada lengan robot sumbu-x. Baik itu metode pengujian nya maupun alat ukur yang digunakan.

5.2.1 Penghitungan Jumlah Step Dari Jarak Antar Limit Switch Pada Sumbu-y dan Sumbu-z

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berapa jumlah step atau pulsa yang telah diberikan oleh mikrokontroler untuk bergerak dari limit switch yang satu ke limit switch yang satunya lagi atau dengan kata lain ini mengetahui *working space* dari masing-masing lengan. Hasil dari pengujian ini nantinya akan disimpan pada mikrokontroler untuk referensi *working space* pada sumbu-y dan sumbu-z. Untuk pengujian ini, diperlukan beberapa peralatan diantaranya adalah :

1. Mikrokontroler
2. Limit Switch
3. LCD Display
4. Stopwatch

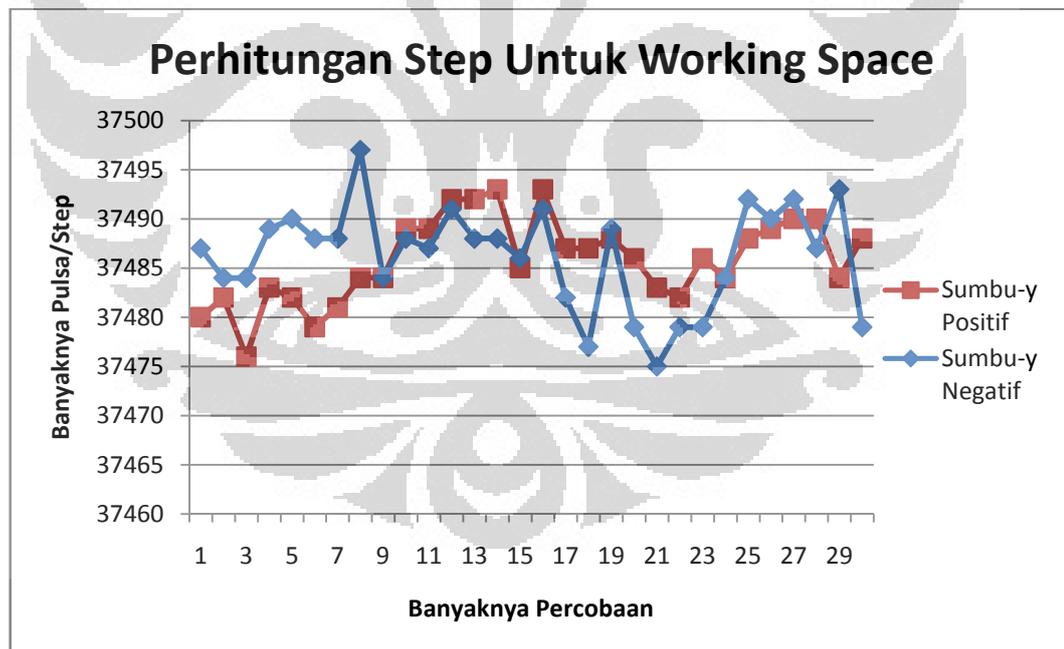
Metode yang dilakukan selama pelaksanaan pengujian ini adalah dengan pembuatan algoritma counting pada mikrokontroler dan menghitung berapa waktu yang dibutuhkan dari limit switch yang satu ke limit switch yang satunya lagi

Tabel 5.4 : Perhitungan Jumlah Step Dari Jarak Limit Switch Pada Sumbu-y

Sumbu-y Positif			Sumbu-y Negatif		
No	Pulsa	waktu (detik)	No	Pulsa	waktu (detik)
1	37480	52.6	1	37487	52.7
2	37482	53.1	2	37484	53.1
3	37476	53	3	37484	52.7
4	37483	51.3	4	37489	53.1
5	37482	52.9	5	37490	53.8
6	37479	53.2	6	37488	52.9
7	37481	53.4	7	37488	52.8
8	37484	53	8	37497	53.1
9	37484	53	9	37484	53.2
10	37489	53.8	10	37488	52.7
11	37489	52.9	11	37487	53.1
12	37492	53.1	12	37491	52.8
13	37492	52.5	13	37488	53.1

14	37493	52.9
15	37485	52.7
16	37493	52.8
17	37487	52.4
18	37487	53
19	37488	53.1
20	37486	52.9
21	37483	53.4
22	37482	53.1
23	37486	53.3
24	37484	53.3
25	37488	52.8
26	37489	53.1
27	37490	53.1
28	37490	52.8
29	37484	53.2
30	37488	53.1

14	37488	53.2
15	37486	52.9
16	37491	52.8
17	37482	53
18	37477	53.1
19	37489	53.1
20	37479	53.2
21	37475	53
22	37479	53.1
23	37479	53.1
24	37484	52.9
25	37492	53.1
26	37490	53.2
27	37492	53.2
28	37487	52.8
29	37493	53.3
30	37479	52.7



Gambar 5.4 : Grafik Counting Step Selama 30 Percobaan Pada Sumbu-y

Dari tabel di atas dapat diketahui nilai rata – rata dan seberapa besar nilai deviasi. Untuk nilai rata – rata pergerakan sumbu-y positif diperoleh nilai sebesar 37485.8 step atau dapat dibulatkan menjadi 37486 step dan untuk nilai deviasi

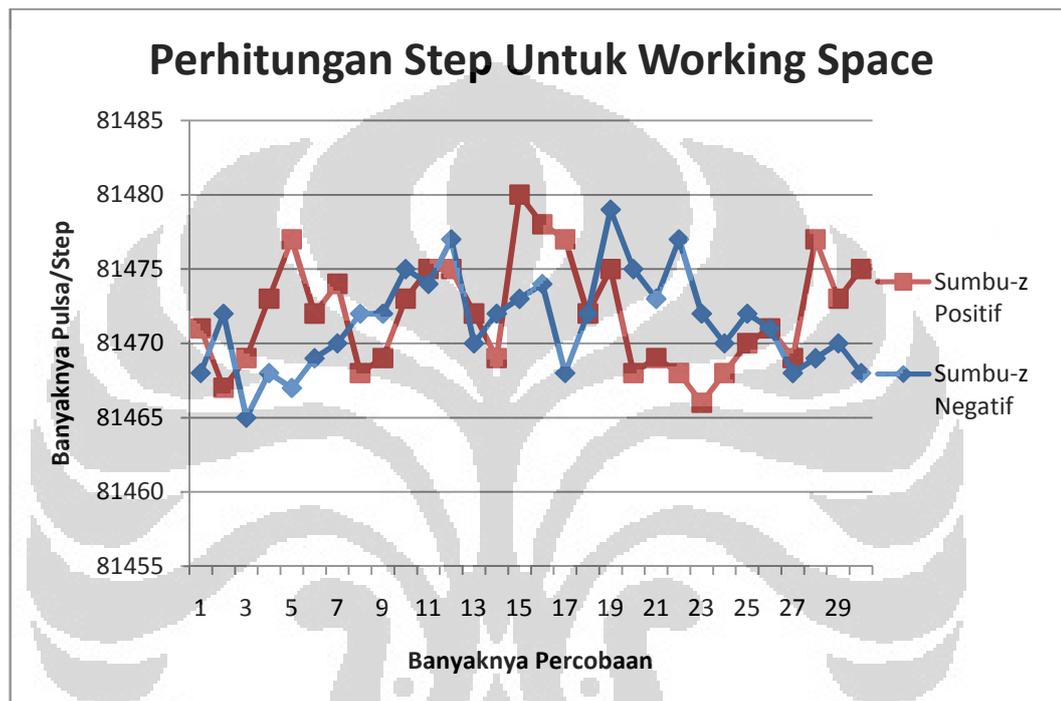
pada pergerakan yang sama diperoleh nilai sebesar 4.29 step. Sedangkan untuk pergerakan ke arah sumbu-y negatif, nilai rata – rata diperoleh sebesar 37486.2 step dan untuk nilai deviasi pada pergerakan yang sama diperoleh nilai sebesar 5.23 step.

Tabel 5.5 : Perhitungan Jumlah Step Dari Jarak Limit Switch Pada Sumbu-z

Sumbu-z Positif			Sumbu-z Negatif		
No	Pulsa	waktu (detik)	No	Pulsa	waktu (detik)
1	81471	115.5	1	81468	115.2
2	81467	115.4	2	81472	114.9
3	81469	115.6	3	81465	115.2
4	81473	115.4	4	81468	115.1
5	81477	115.2	5	81467	115.3
6	81472	115.3	6	81469	115.2
7	81474	115.4	7	81470	115.4
8	81468	115.3	8	81472	115.5
9	81469	115.6	9	81472	115.1
10	81473	115.5	10	81475	115
11	81475	115.4	11	81474	115.6
12	81475	115.3	12	81477	115.5
13	81472	115.3	13	81470	115.4
14	81469	115.5	14	81472	115.3
15	81480	115.6	15	81473	115.4
16	81478	115.3	16	81474	115.1
17	81477	115.5	17	81468	115.6
18	81472	115.1	18	81472	115.2
19	81475	115.2	19	81479	115.2
20	81468	115.2	20	81475	115.3
21	81469	115.4	21	81473	115.4
22	81468	115.3	22	81477	115.5
23	81466	115	23	81472	115.4
24	81468	115.2	24	81470	115.3
25	81470	115.2	25	81472	115.2
26	81471	115.6	26	81471	115.4
27	81469	115.4	27	81468	115.2
28	81477	115.7	28	81469	115.1
29	81473	115.3	29	81470	115.3
30	81475	115.2	30	81468	115.2

Universitas Indonesia

Dari tabel di atas dapat diketahui nilai rata – rata dan seberapa besar nilai deviasi. Untuk nilai rata – rata pergerakan sumbu-z positif diperoleh nilai sebesar 81472 step dan untuk nilai deviasi pada pergerakan yang sama diperoleh nilai sebesar 3.68step. Sedangkan untuk pergerakan ke arah sumbu-z negatif, nilai rata – rata diperoleh sebesar 781471.4 step dan untuk nilai deviasi pada pergerakan yang sama diperoleh nilai sebesar 53.24 step.



Gambar 5.5 : Grafik Counting Step Selama 30 Percobaan Pada Sumbu-z

5.2.2 Uji *Linearity* Pada Sumbu-y dan Sumbu-z

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berapa nilai error akibat dari digerakannya lengan sumbu-y atau sumbu-z ke arah sumbu-y positif atau sumbu-z positif lalu setelah sampai pada posisi yang telah ditentukan digerakannya kembali ke arah sumbu-y negatif atau sumbu-z negatif dengan gerakan tiba-tiba. Nilai error tersebut yang nantinya menjadi acuan berapa nilai interpolasi yang seharusnya dapat diberikan. Untuk pengujian ini, diperlukan beberapa peralatan diantaranya adalah :

1. Mikrokontroller.

2. Jangka Sorong

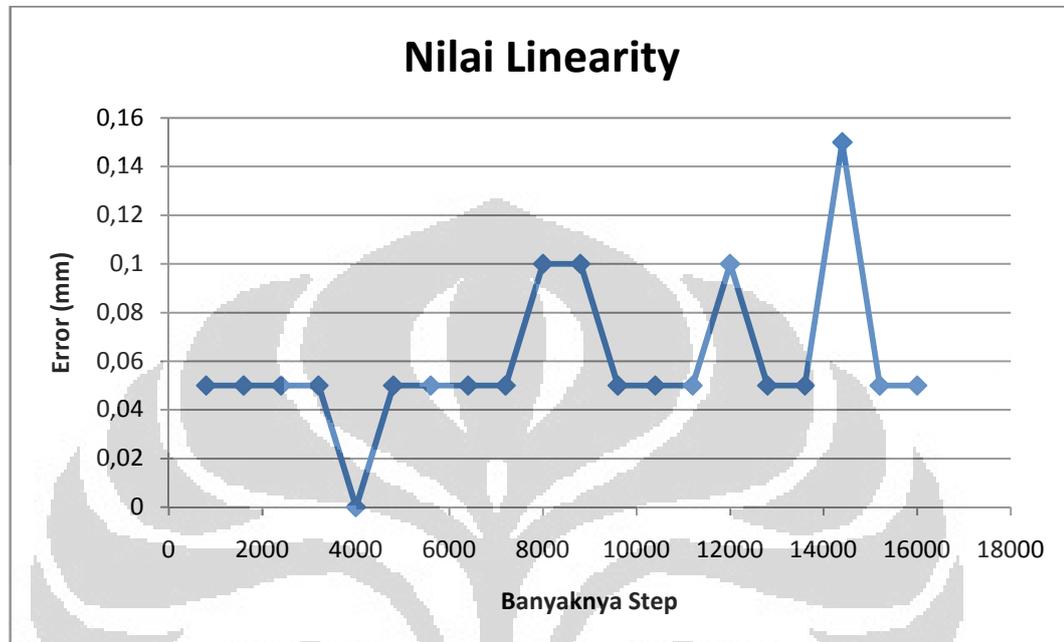
Metode yang dilakukan selama pelaksanaan pengujian ini adalah dengan pembuatan algoritma pergerakan mulai dari 10 mm lalu kembali lagi ke -10 mm dan berakhir sampai pergerakan 200 mm. Sedangkan untuk lengan sumbu-z, pergerakan dimulai dari 800 step lalu kembali lagi ke -800 step dan berakhir sampai pergerakan 16000 step. Dari pengujian diperoleh besaran nilai yang bervariasi. Untuk lebih jelasnya lihat tabel di bawah ini.

Tabel 5.6 : Pengujian Linearity dari 10 mm – 200 mm

Sumbu-Y		
No	Pulsa	Error Displacement
1	800	0.05
2	1600	0.05
3	2400	0.05
4	3200	0.05
5	4000	0
6	4800	0.05
7	5600	0.05
8	6400	0.05
9	7200	0.05
10	8000	0.1
11	8800	0.1
12	9600	0.05
13	10400	0.05
14	11200	0.05
15	12000	0.1
16	12800	0.05
17	13600	0.05
18	14400	0.15
19	15200	0.05
20	16000	0.05

Dari tabel di atas dapat diketahui, bahwan pergerakan tersebut bukanlah merupakan persamaan linear. Dimana semakin bertambahnya jarak, nilai error tidak ikut bertambah secara linear. Dari tabel tersebut dapat diketahui rata – rata

nilai backlash adalah 0.06 mm. Sedangkan untuk besar penyimpangannya adalah 0.03 mm. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



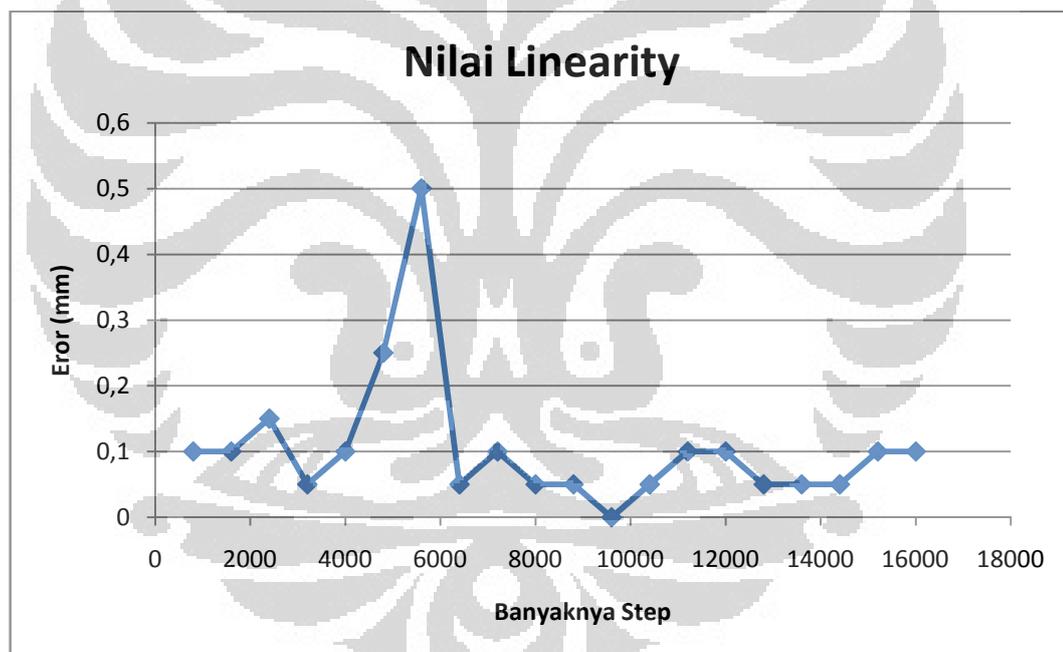
Gambar 5.6 : Grafik Error Linearity Terhadap Jarak Pada Sumbu-y

Tabel 5.7 : Pengujian Linearity dari 800 step – 16000 step

Sumbu-Z		
No	Pulsa	Error Displacement
1	800	0.1
2	1600	0.1
3	2400	0.15
4	3200	0.05
5	4000	0.1
6	4800	0.25
7	5600	0.5
8	6400	0.05
9	7200	0.1
10	8000	0.05
11	8800	0.05
12	9600	0
13	10400	0.05

14	11200	0.1
15	12000	0.1
16	12800	0.05
17	13600	0.05
18	14400	0.05
19	15200	0.1
20	16000	0.1

Dari tabel di atas dapat diketahui, bahwa pergerakan tersebut bukan merupakan persamaan linear. Dimana semakin bertambahnya jarak, nilai error tidak ikut bertambah secara linear. Dari tabel tersebut dapat diketahui rata – rata nilai backlash adalah 0.105 mm. Sedangkan untuk besar penyimpangannya adalah 0.106 mm. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



Gambar 5.7 : Grafik Error Linearity Terhadap Jarak Pada Sumbu-y

5.2.3 Uji Posisi Aktual Pada Sumbu-y dan Sumbu-z

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berapa perbedaan nilai dari posisi yang telah ditentukan terhadap posisi aktual. Untuk pengujian ini diperlukan beberapa peralatan diantaranya adalah:

1. Mikrokontroller

2. Alat Ukur Laser Keyence

Metode yang dilakukan selama pengujian ini adalah pembuatan algoritma pergerakan ke arah sumbu-y positif atau sumbu-z positif mulai dari 2 mm sampai 12 mm, begitupun ke arah sumbu-y negatif atau sumbu-z negatif. Dengan pergerakan setiap kelipatan 2 diukur menggunakan laser keyence.

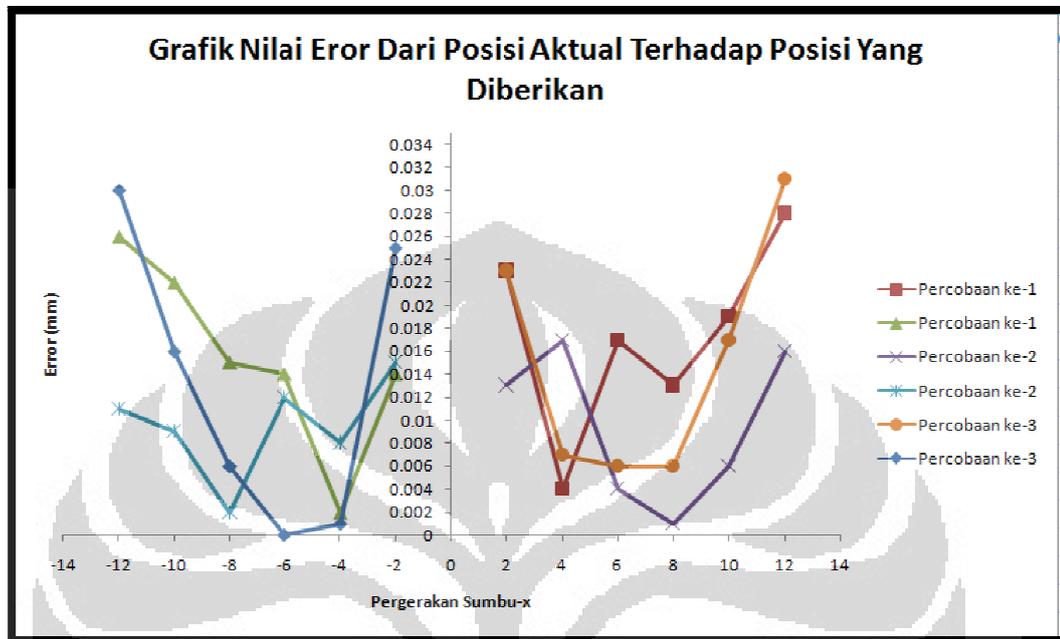
Tabel 5.8 : Pengujian Posisi Aktual Terhadap Posisi Teoritis Pada Sumbu-y

No	Gerak (mm)	Aktual Keyen			Aktual Setelah Pengurangan		
		1	2	3	1	2	3
1	+2	-2.023	-2.013	-2.023	0.023	0.013	0.023
2	-2	-0.009	0.002	0.002	0.014	0.015	0.025
3	+4	-3.996	-3.983	-3.993	0.004	0.017	0.007
4	-4	0.002	0.009	0.006	0.002	0.008	0.001
5	+6	-6.017	-5.996	-6.006	0.017	0.004	0.006
6	-6	-0.003	-0.008	-0.006	0.014	0.012	0
7	+8	-8.013	-7.999	-8.006	0.013	0.001	0.006
8	-8	0.002	0.003	0	0.015	0.002	0.006
9	+10	-10.019	-10.006	-10.017	0.019	0.006	0.017
10	-10	0.003	0.003	-0.001	0.022	0.009	0.016
11	+12	-12.028	-12.016	-12.031	0.028	0.016	0.031
12	-12	-0.002	-0.005	-0.001	0.026	0.011	0.03

Pengujian dilakukan sebanyak 3 kali percobaan pada posisi pengukuran yang sama dan diperoleh nilai yang bervariasi mulai dari pengujian yang pertama sampai yang ketiga. Pada percobaan pertama untuk gerakan ke arah sumbu-y positif diperoleh nilai rata – rata error sebesar 0.017 mm dan 0.008 mm untuk besarnya nilai deviasi. Sedangkan untuk gerakan ke arah sumbu-y negatif diperoleh nilai rata – rata error sebesar 0.015 mm dan 0.008 mm untuk besarnya deviasi. Pada percobaan kedua untuk gerakan ke arah sumbu-y positif diperoleh nilai rata – rata error sebesar 0.009 mm dan 0.006 mm untuk besarnya nilai deviasi. Sedangkan untuk gerakan ke arah sumbu-y negatif diperoleh nilai rata – rata error sebesar 0.009 mm dan 0.004 mm untuk besarnya nilai deviasi. Pada percobaan terakhir yaitu percobaan ketiga untuk gerakan ke arah sumbu-y positif diperoleh nilai rata – rata error sebesar 0.015 mm dan 0.01 mm untuk besarnya

Universitas Indonesia

nilai deviasi. Sedangkan untuk pergerakan ke arah sumbu-y negatif diperoleh nilai rata – rata eror sebesar 0.013 mm dan 0.012 mm untuk besarnya deviasi. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada grafik di bawah ini.

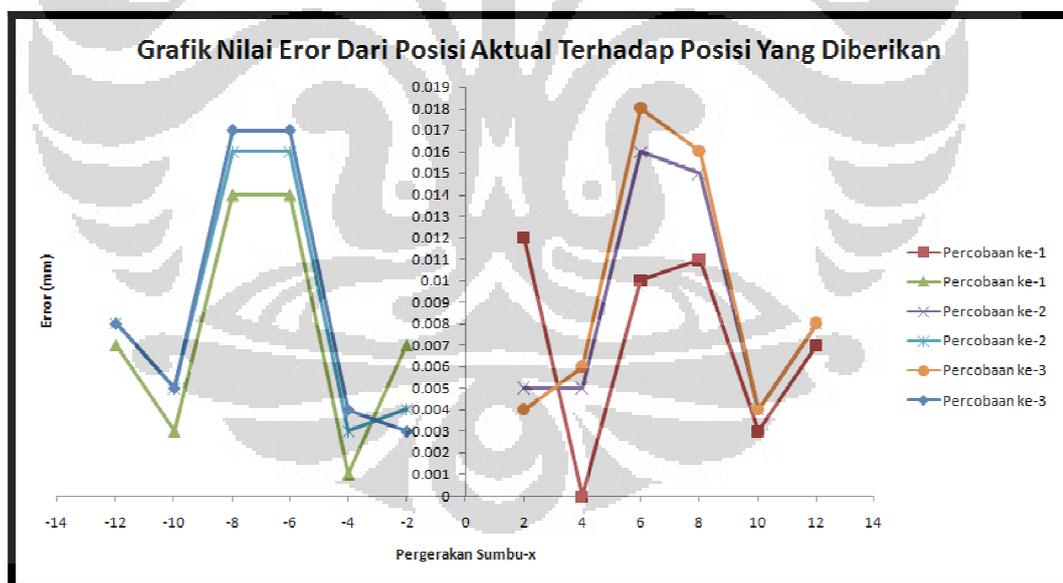


Gambar 5.8 : Grafik Error Posisi Aktual Terhadap Posisi Yang Diberikan Pada Sumbu-y

Tabel 5.9 : Pengujian Posisi Aktual Terhadap Posisi Teoritis Pada Sumbu-z

Gerak (mm)	Aktual Keyen			Aktual Setelah Perhitungan		
	1	2	3	1	2	3
+2	-1.988	-1.995	-1.996	0.012	0.005	0.004
-2	0.005	0.001	0.001	0.007	0.004	0.003
+4	-4	-4.005	-4.006	0	0.005	0.006
-4	0.001	-0.002	-0.002	0.001	0.003	0.004
+6	-6.01	-6.016	-6.018	0.01	0.016	0.018
-6	0.004	0	-0.001	0.014	0.016	0.017
+8	-8.011	-8.015	-8.016	0.011	0.015	0.016
-8	0.003	0.001	0.001	0.014	0.016	0.017
+10	-10.003	-10.004	-10.004	0.003	0.004	0.004
-10	0	0.001	0.001	0.003	0.005	0.005
+12	-12.007	-12.008	-12.008	0.007	0.008	0.008
-12	0	0	0	0.007	0.008	0.008

Pengujian dilakukan sebanyak 3 kali percobaan pada posisi pengukuran yang sama dan diperoleh nilai yang bervariasi mulai dari pengujian yang pertama sampai yang ketiga. Pada percobaan pertama untuk gerakan ke arah sumbu-z positif diperoleh nilai rata – rata error sebesar 0.007 mm dan 0.004 mm untuk besarnya nilai deviasi. Sedangkan untuk gerakan ke arah sumbu-z negatif diperoleh nilai rata – rata error sebesar 0.007 mm dan 0.005 mm untuk besarnya deviasi. Pada percobaan kedua untuk gerakan ke arah sumbu-z positif diperoleh nilai rata – rata error sebesar 0.008 mm dan 0.005 mm untuk besarnya nilai deviasi. Sedangkan untuk gerakan ke arah sumbu-z negatif diperoleh nilai rata – rata error sebesar 0.008 mm dan 0.005 mm untuk besarnya nilai deviasi. Pada percobaan terakhir yaitu percobaan ketiga untuk gerakan ke arah sumbu-z positif diperoleh nilai rata – rata error sebesar 0.009 mm dan 0.006 mm untuk besarnya nilai deviasi. Sedangkan untuk pergerakan ke arah sumbu-z negatif diperoleh nilai rata – rata error sebesar 0.009 mm dan 0.006 mm untuk besarnya deviasi. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada grafik di bawah ini.



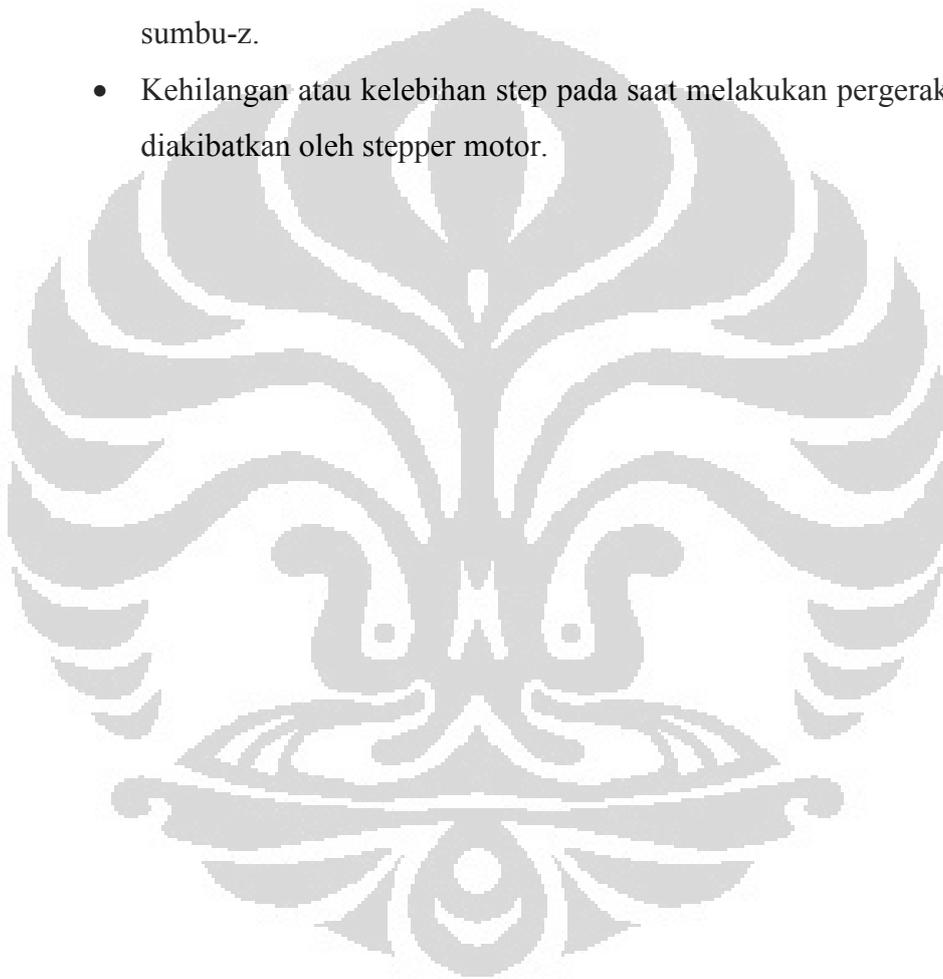
Gambar 5.9 : Grafik Error Posisi Aktual Terhadap Posisi Yang Diberikan Pada Sumbu-y

5.2.4 Analisa Pergerakan Sumbu-y dan Sumbu-z

Dari ketiga pengujian yang telah dilakukan pada lengan robot sumbu-y dan lengan sumbu-z, hasil yang diperoleh merupakan representasi dari stepper motor

dan driver stepper motor pada lengan robot sumbu-y dan sumbu-z. Bervariasi nilai selama melakukan pengujian dapat dikarenakan beberapa hal diantaranya adalah:

- Waktu respon dari limit switch yang memberikan sinyal kepada mikrokontroler pada saat pengujian jumlah step dari jarak limit switch baik itu pada lengan sumbu-y maupun pada lengan sumbu-z.
- Daya tahan driver stepper motor selama melakukan pengujian jumlah step untuk mengetahui *working space* pada lengan sumbu-y atau sumbu-z.
- Kehilangan atau kelebihan step pada saat melakukan pergerakan yang diakibatkan oleh stepper motor.



BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN PENELITIAN LEBIH LANJUT

6.1 KESIMPULAN

6.1.1 Sistem Kerja Pada Lengan Robot Sumbu-x

Setelah melakukan serangkaian pengujian untuk mengetahui karakteristik dari Stepper Motor pada sumbu-x. Maka dapat disimpulkan bahwa gerakan pada lengan sumbu-x memiliki karakteristik tersendiri yang dapat menimbulkan gangguan. Sehingga, pergerakan pada lengan sumbu-x memiliki error yang besar daripada lengan yang lain. Gangguan tersebut adalah;

1. Besarnya massa pada lengan sumbu-x yang menyebabkan pergerakan akan semakin berat. Sehingga stepper motor akan bekerja secara maksimum dan driver stepper motor menjadi cepat panas.
2. Besarnya massa pada lengan sumbu-x yang akan mempengaruhi momentum pergerakan lengan sumbu-x. Sehingga, ketika terjadi pergerakan bolak-balik pada lengan sumbu-x, momentum akan terjadi akibat dari pergerakan bolak-balik tersebut. Besarnya momentum akan terjadi pada lengan ini, jika kecepatan semua lengan sama.
3. Ketidak linearan pada pemasangan *slideway* yang menyebabkan pergerakan tersendat pada keadaan tertentu.

Untuk memperoleh nilai error yang kecil, dapat dilakukan dengan cara menghilangkan gangguan tersebut atau mungkin meminimalisasi gangguan tersebut. Berikut ini adalah langkah-langkah penting yang perlu diperhatikan dalam meminimalisasi gangguan yang mungkin terjadi, yaitu:

1. Kepresisian dalam proses manufaktur;
2. Penggunaan material untuk kualitas yang lebih baik, dalam hal ini kemurnian material terbukti terjaga baik sesuai dengan standar;
3. Melakukan pengujian metalurgi serta analisa terhadap material yang akan digunakan sebelum proses manufaktur;

4. Kualitas permukaan material, dalam hal ini *roughness* sesuai spesifikasi kesesuaian;
5. Melakukan pengukuran kelurusan pada saat proses perakitan;
6. Melakukan sesuai prosedur pada saat pemasangan *slideway* dan *ballscrew*;

6.1.1.1 Kelebihan Rancangan Pada Lengan Sumbu-x

1. Cukup mudah dalam proses manufaktur, sehingga untuk proses selanjutnya akan menjadi lebih mudah;
2. Mudah dalam *assembly* dan *dissassembly*;
3. Nilai error dari pergerakan lengan sumbu-x yang dapat mencapai 0.9 mm. Jika dibandingkan dengan IRB2000 ABB robot akurasi pergerakan linearnya adalah 0.125 mm [4];

6.1.1.2 Kekurangan Rancangan Pada Lengan Sumbu-x

1. Proses pengelasan pada rangka konstruksi yang menyebabkan terjadinya ketidaklurusan;
2. Kekurangannya alat ukur kelurusan untuk mengukur ketidaklurusan pada saat pemasangan lengan robot sumbu-x;

6.1.2 Sistem Kerja Pada Lengan Sumbu-y

Setelah melakukan serangkaian pengujian untuk mengetahui karakteristik dari Stepper Motor maupun driver stepper pada lengan sumbu-y. Maka dapat disimpulkan bahwa gerakan pada lengan sumbu-y memiliki karakteristik tersendiri yang dapat menimbulkan gangguan. Sehingga, pergerakan pada lengan sumbu-y memiliki error akibat dari pergerakan, meskipun nilai error pada lengan ini sangatlah kecil. Gangguan tersebut adalah;

1. Besarnya massa pada lengan sumbu-y yang menyebabkan pergerakan akan semakin berat. Sehingga stepper motor akan bekerja secara maksimum dan driver stepper motor menjadi cepat panas.
2. Besarnya massa pada lengan sumbu-y yang akan mempengaruhi momentum pergerakan lengan sumbu-y. Sehingga, ketika terjadi pergerakan bolak-balik pada lengan sumbu-y, momentum akan terjadi

akibat dari pergerakan bolak-balik tersebut. Besarnya momentum akan terjadi pada lengan ini, jika kecepatan semua lengan sama.

3. Ketidak linearan pada pemasangan *slideway* yang menyebabkan pergerakan tersendat pada keadaan tertentu.
4. Ketidak lurusan pada pemasangan *synchronous* belt ada lengan sumbu-y yang menyebabkan peristiwa backlash pada lengan ini.

Untuk memperoleh nilai error yang lebih kecil, dapat dilakukan dengan cara menghilangkan gangguan tersebut atau mungkin meminimalisasi gangguan tersebut. Berikut ini adalah langkah-langkah penting yang perlu diperhatikan dalam meminimalisasi gangguan yang mungkin terjadi, yaitu:

1. Kepresisian dalam proses manufaktur;
2. Penggunaan material untuk kualitas yang lebih baik, dalam hal ini kemurnian material terbukti terjaga baik sesuai dengan standar;
3. Melakukan pengujian metalurgi serta analisa terhadap material yang akan digunakan sebelum proses manufaktur;
4. Kualitas permukaan material, dalam hal ini *roughness* sesuai spesifikasi kesesuai;
5. Melakukan pengukuran kelurusan pada saat proses perakitan;
6. Melakukan sesuai prosedur pada saat pemasangan *slideway* dan *ballscrew*;
7. Melakukan pemasangan *synchronous* belt sesuai dengan prosedur yang berlaku;

6.1.2.1 Kelebihan Rancangan Pada Lengan Sumbu-y

1. Cukup mudah dalam proses manufaktur, sehingga untuk proses selanjutnya akan menjadi lebih mudah;
2. Mudah dalam *assembly* dan *dissassembly*;
3. Nilai error dari pergerakan lengan sumbu-y yang dapat mencapai 0.15 mm dan mendekati dari akurasi robot ABB IRB2000 yang mencapai 0.125 mm [4];

4. Lengan sumbu-y merupakan lengan yang ideal untuk sistem pergerakan robot 5 derajat kebebasan. Baik dari aktuator maupun dari massa lengan robot itu sendiri sudah yang paling ideal;

6.1.2.2 Kekurangan Rancangan Pada Lengan Sumbu-y

1. Proses manufaktur pada lengan sumbu-y yang menyebabkan ketidaklurusan;
2. Kekurangan alat ukur kelurusan untuk mengukur ketidaklurusan pada saat perakitan;

6.1.3 Sistem Kerja Pada Lengan Sumbu-z

Setelah melakukan serangkaian pengujian untuk mengetahui karakteristik dari Stepper Motor maupun driver stepper pada lengan sumbu-z. Maka dapat disimpulkan bahwa gerakan pada lengan sumbu-z memiliki karakteristik tersendiri yang dapat menimbulkan gangguan. Sehingga, pergerakan pada lengan sumbu-z memiliki error akibat dari pergerakan, meskipun nilai error pada lengan ini sangatlah kecil jika dibandingkan dengan lengan sumbu-x. Gangguan tersebut adalah;

1. Besarnya massa pada lengan sumbu-z yang diakibatkan gerakan melawan gravitasi sehingga menyebabkan pergerakan akan semakin berat. Sehingga stepper motor akan bekerja secara maksimum dan driver stepper motor menjadi cepat panas.
2. Besarnya massa pada lengan sumbu-z yang diakibatkan gerakan melawan gravitasi sehingga akan mempengaruhi momentum pergerakan lengan sumbu-z. Sehingga, ketika terjadi pergerakan bolak-balik pada lengan sumbu-z, momentum akan terjadi akibat dari pergerakan bolak-balik tersebut. Besarnya momentum akan terjadi pada lengan ini, jika kecepatan semua lengan sama.
3. Ketidak linearan pada pemasangan *slideway* yang menyebabkan pergerakan tersendat pada keadaan tertentu.
4. Ketidak lurusan pada pemasangan *synchronous* belt ada lengan sumbu-y yang menyebabkan peristiwa backlash pada lengan ini.

Untuk memperoleh nilai error yang lebih kecil, dapat dilakukan dengan cara menghilangkan gangguan tersebut atau mungkin meminimalisasi gangguan tersebut. Berikut ini adalah langkah-langkah penting yang perlu diperhatikan dalam meminimalisasi gangguan yang mungkin terjadi, yaitu:

1. Kepresisian dalam proses manufaktur;
2. Penggunaan material untuk kualitas yang lebih baik, dalam hal ini kemurnian material terbukti terjaga baik sesuai dengan standar;
3. Melakukan pengujian metalurgi serta analisa terhadap material yang akan digunakan sebelum proses manufaktur;
4. Kualitas permukaan material, dalam hal ini *roughness* sesuai spesifikasi kesesuaian;
5. Melakukan pengukuran kelurusan pada saat proses perakitan;
6. Melakukan sesuai prosedur pada saat pemasangan *slideway* dan *ballscrew*;
7. Melakukan pemasangan *synchronous* belt sesuai dengan prosedur yang berlaku;
8. Penambahan *counterweight* agar gerakan baik pada saat melawan maupun searah tetap sama percepatannya;

6.1.3.1 Kelebihan Rancangan Pada Lengan Sumbu-z

1. Cukup mudah dalam proses manufaktur, sehingga untuk proses selanjutnya akan menjadi lebih mudah;
2. Mudah dalam *assembly* dan *dissassembly*;
3. Nilai error dari pergerakan lengan sumbu-z yang dapat mencapai 0.5 mm dan mendekati dari akurasi robot ABB IRB2000 yang mencapai 0.125 mm, meskipun tidak menggunakan *counterweight* [4];

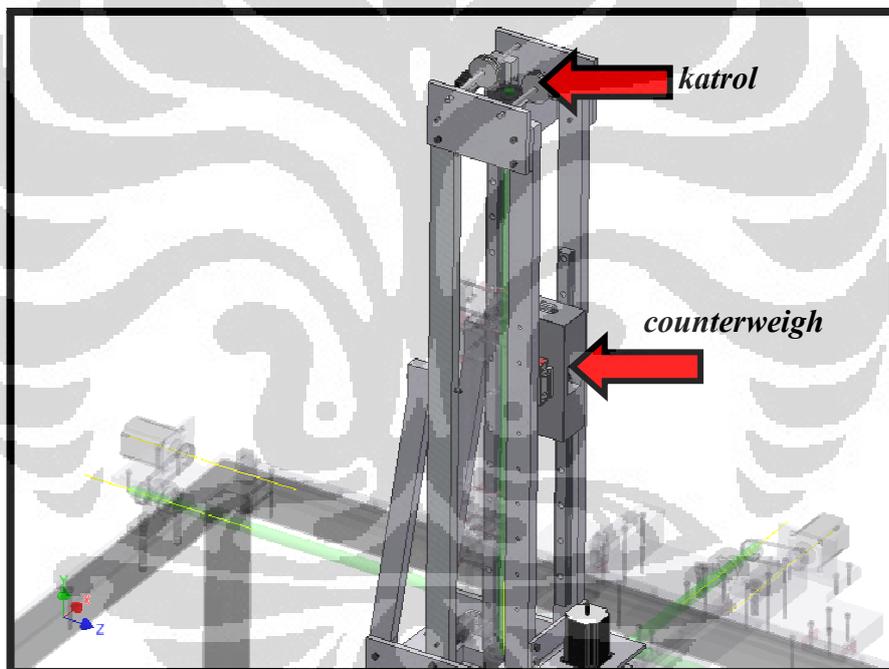
6.1.3.2 Kekurangan Rancangan Pada Lengan Sumbu-z

1. Proses manufaktur pada lengan sumbu-z yang menyebabkan ketidaklurusan;
2. Kekurangan alat ukur kelurusan untuk mengukur ketidaklurusan pada saat perakitan;

6.2 SARAN

Untuk pengembangan robot lebih lanjut disarankan untuk melakukan beberapa penambahan untuk meningkatkan kinerja sistem, yaitu:

1. Penambahan *counterweight* pada lengan sumbu-z agar gerakan sumbu-z lebih terkontrol.
2. Penggantian stepper motor pada lengan rotasi-x karena stepper motor yang tidak mampu menahan beban dari *end effector*.
3. Penambahan sensor rotary encoder untuk gerakan rotasi dan translasi.
4. Perlu dilakukan pengukuran untuk mengetahui posisi dari gerakan rotasi



Gambar 6.1 : Desain Lengan Sumbu-z Dengan Penambahan Counterweight

DAFTAR PUSTAKA

Khurmi, R. S., & Gupta, J. K. (2005). *First Multicolour Edition: A Text Book of Machine Design*. New Delhi: Eurasia Publishing House.

Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (2002). *Fundamentals of Fluid Mechanics 'Fourth Edition'*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Sharma, P. C., & Aggarwal, D. K. (1997). *A Text Book of Machine Design*. India: SSMB.

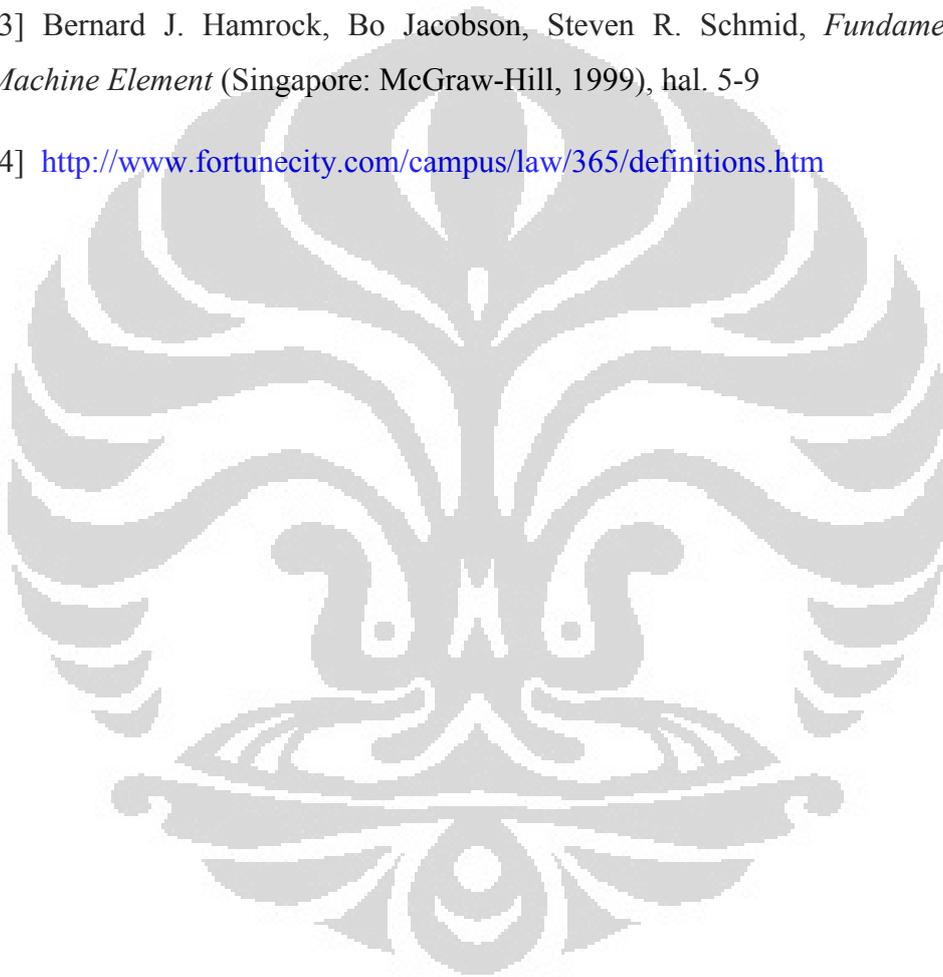
Beer F.P, Russel J, *Mekanika untuk Insinyur Statika* (Jakarta: Erlangga, 1987)

Hamrock B.J, Bo Jacobson, Steven R.S, *Fundamentals of Machine Element* (Singapore: McGraw-Hill, 1999)

Kiswanto, Gandjar, Otomasi dan Robotika, *Presentasi Mata Kuliah Otomasi dan Robotika MCF42373*, (Depok: DTM FTUI, 2006)

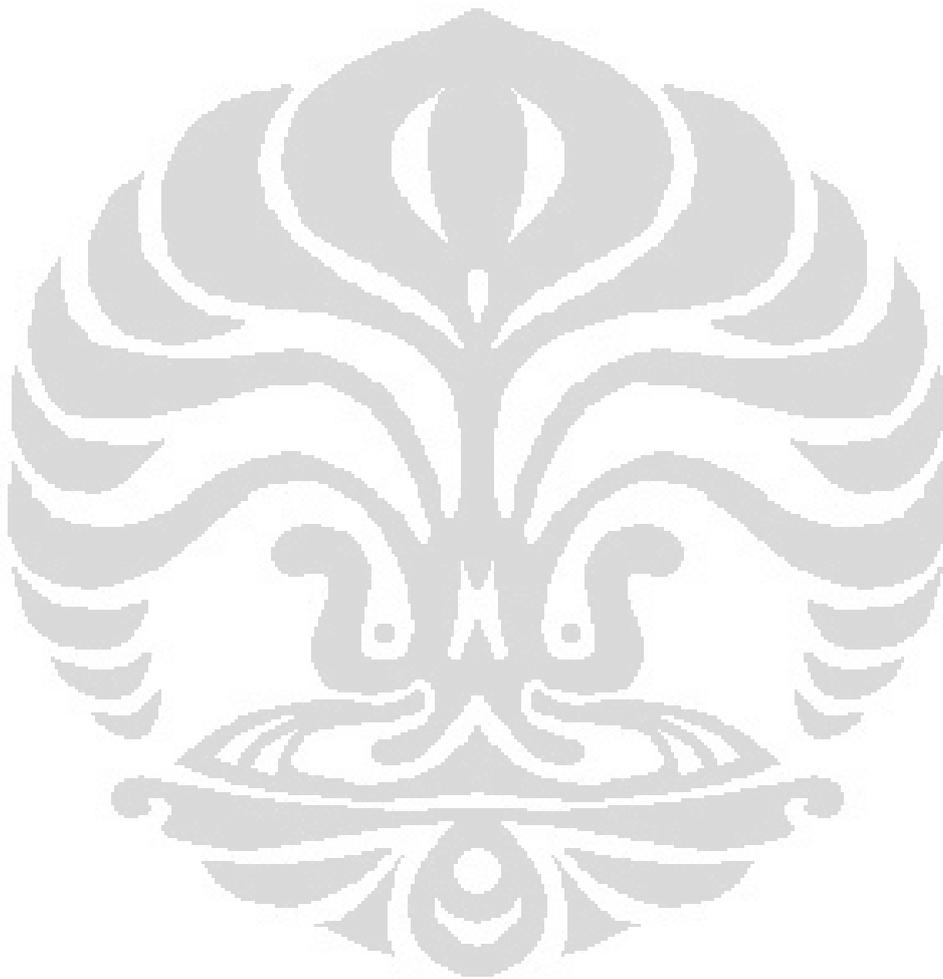
DAFTAR ACUAN

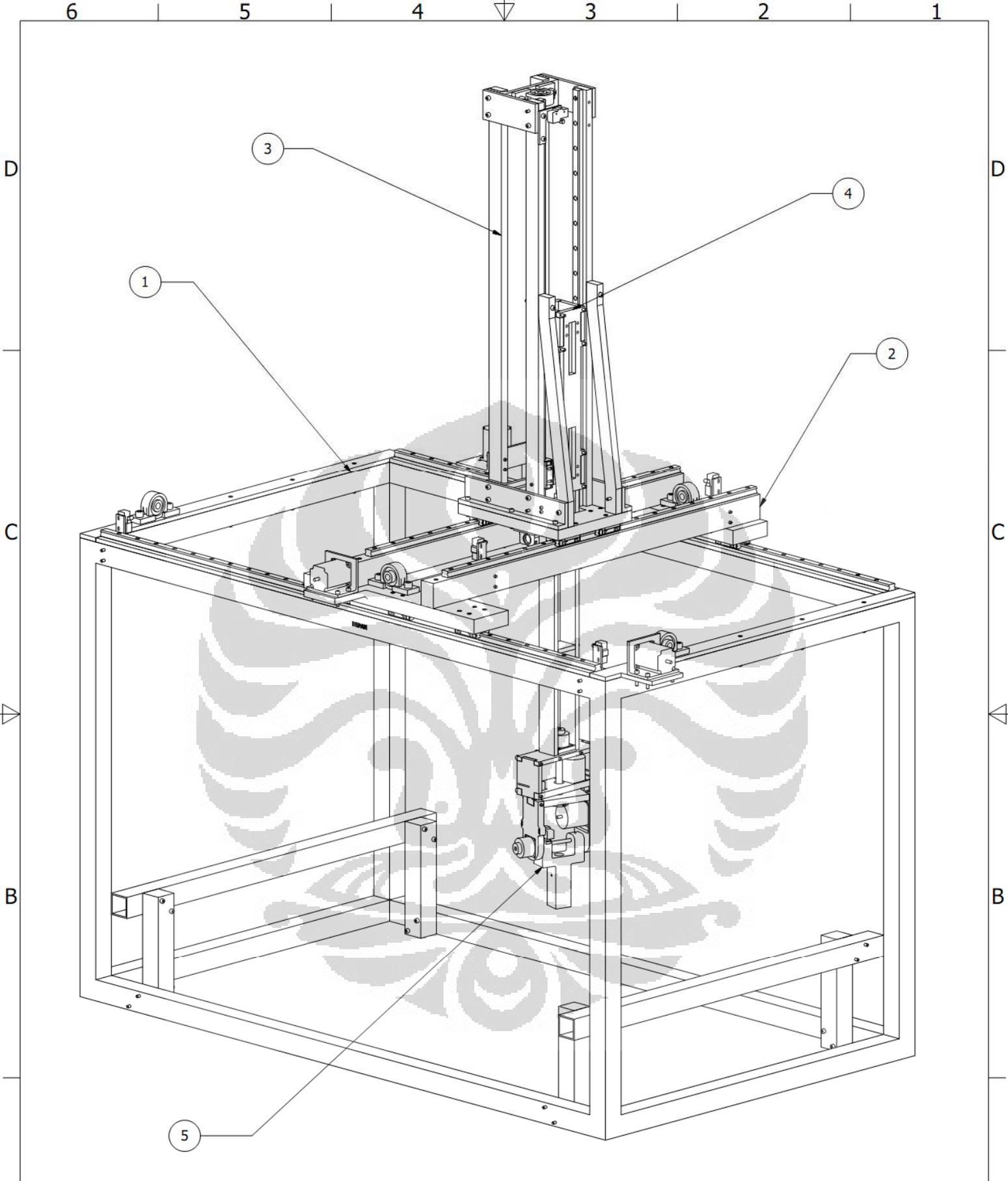
- [1] Pires, J. Norberto., et.all.(2006). *Welding Robots: Technology, System Issues and Applications*. London: Springer-Verlag
- [2] Tarn, Tzyh-Jong., et.all. (2011). *Robotic Welding, Intelligence and Automation: RWIA'2010*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag
- [3] Bernard J. Hamrock, Bo Jacobson, Steven R. Schmid, *Fundamentals of Machine Element* (Singapore: McGraw-Hill, 1999), hal. 5-9
- [4] <http://www.fortunecity.com/campus/law/365/definitions.htm>



LAMPIRAN

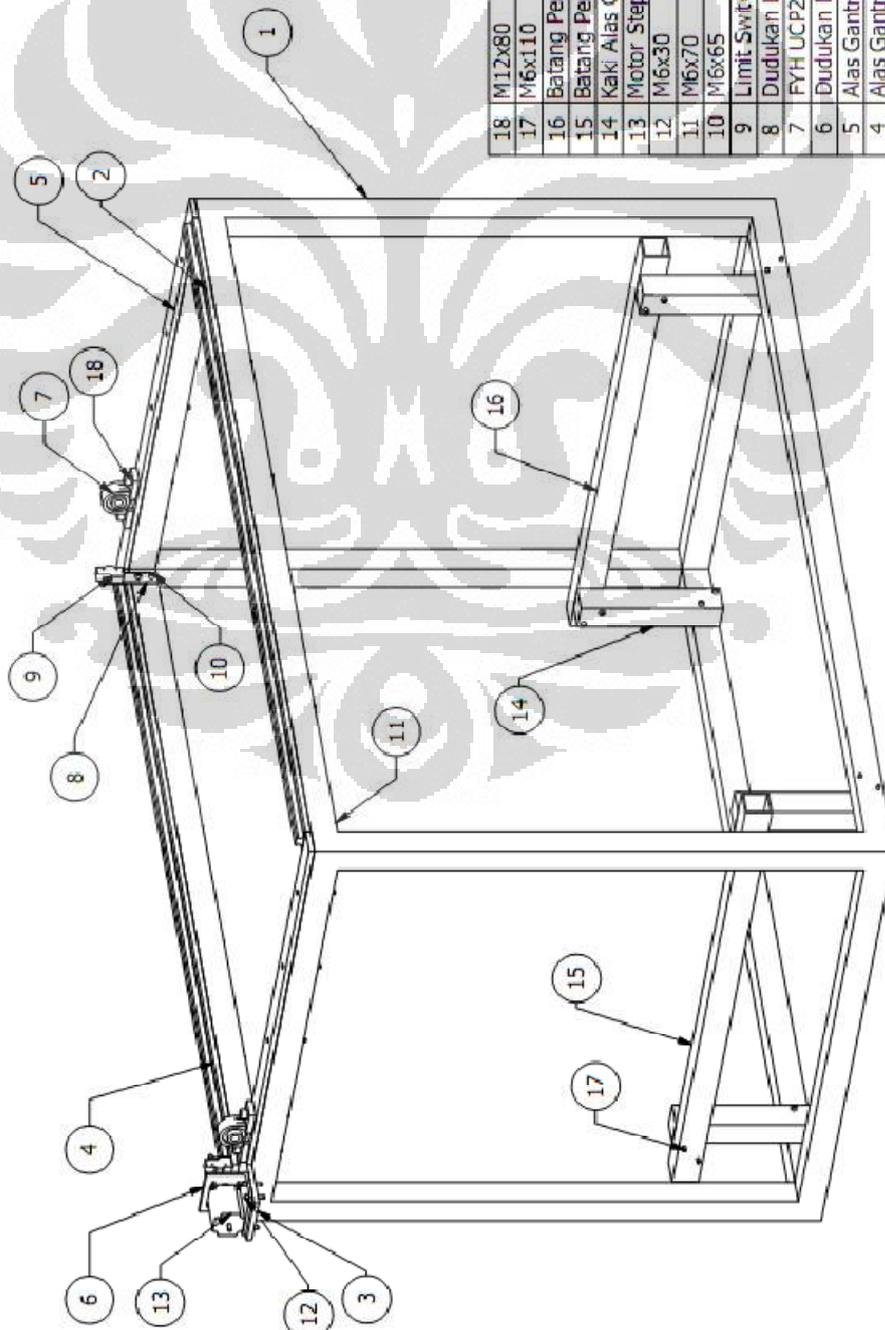
GAMBAR TEKNIK ROBOT 5 DERAJAT KEBEBASAN





5	Five Axis		1
4	Four Axis		1
3	Third Axis		1
2	Second Axis		1
1	First Axis		1

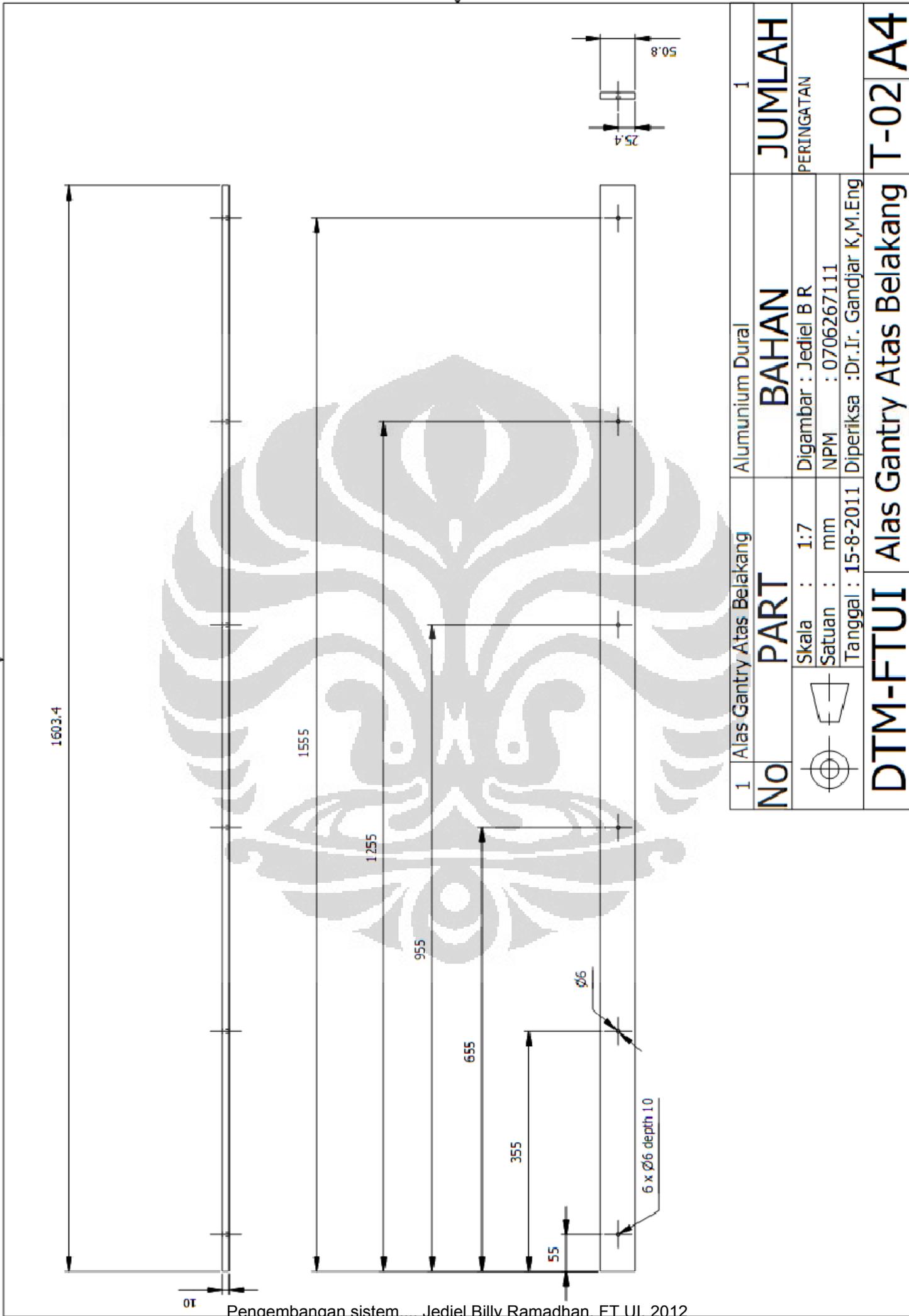
No	PART	BAHAN	JUMLAH
	Skala : 1:8	Digambar : Jediel B R	PERINGATAN
	Satuan : mm	NPM : 0706267111	
	Tanggal : 14-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M,Eng	



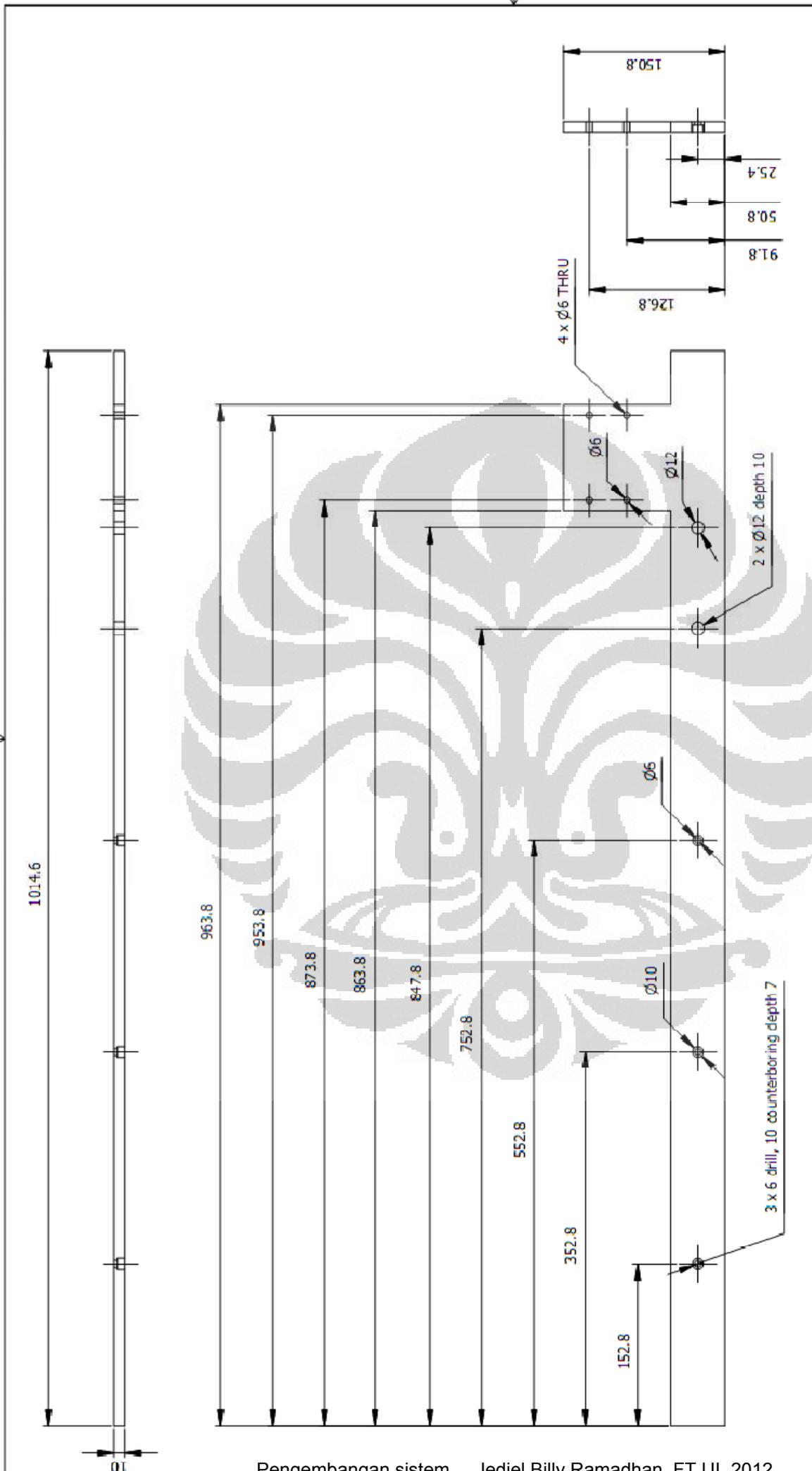
18	M12x80			4
17	M6x110			16
16	Batang Pengunci Alas Kanan	Besi Tuang		1
15	Batang Pengunci Alas Kiri	Besi Tuang		1
14	Kaki Alas Gantry	Aluminium Dural		4
13	Motor Stepper			1
12	M6x30			4
11	M6x70			12
10	M6x65			10
9	Limit Switch			2
8	Dudukan Limit Switch di x	Aluminium Dural		2
7	FYH UC-P202 P203			2
6	Dudukan Motor Sumbu-x dan y	Aluminium Dural		1
5	Alas Gantry Atas Kiri	Aluminium Dural		1
4	Alas Gantry Atas Depan	Aluminium Dural		1
3	Alas Gantry Atas Kanan	Aluminium Dural		1
2	Alas Gantry Atas Belakang	Aluminium Dural		1
1	Rangka Gantry	Besi Tuang		1

No	PART	BAHAN	JUMLAH
	Skala : 1:15	Digambar : Jediel B R	PERINGATAN
	Satuan : mm	NPM : 0706267111	
	Tanggal : 14-8-2011	Diperiksa : Dr. Ir. Gandjar K, M. Eng	

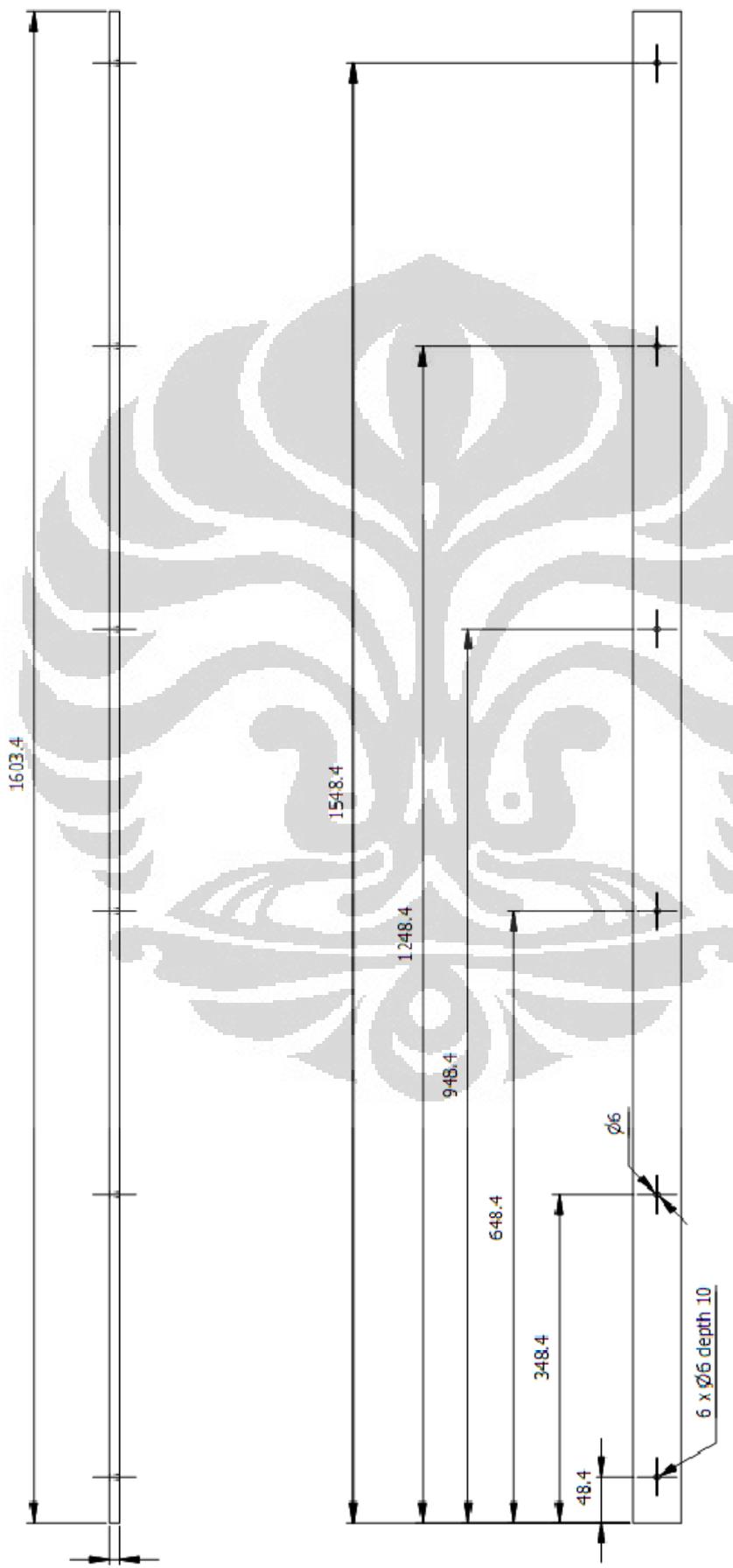
DTM-FTUI FIRST AXIS T-1A3 I



1	Alas Gantry Atas Belakang	Aluminium Dural	1
NO	PART	BAHAN	JUMLAH
	Skala : 1:7	Digambar : Jediel B R	PERINGATAN
	Satuan : mm	NPM : 0706267111	
	Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	
DTM-FTUI		Alas Gantry Atas Belakang	T-02 A4

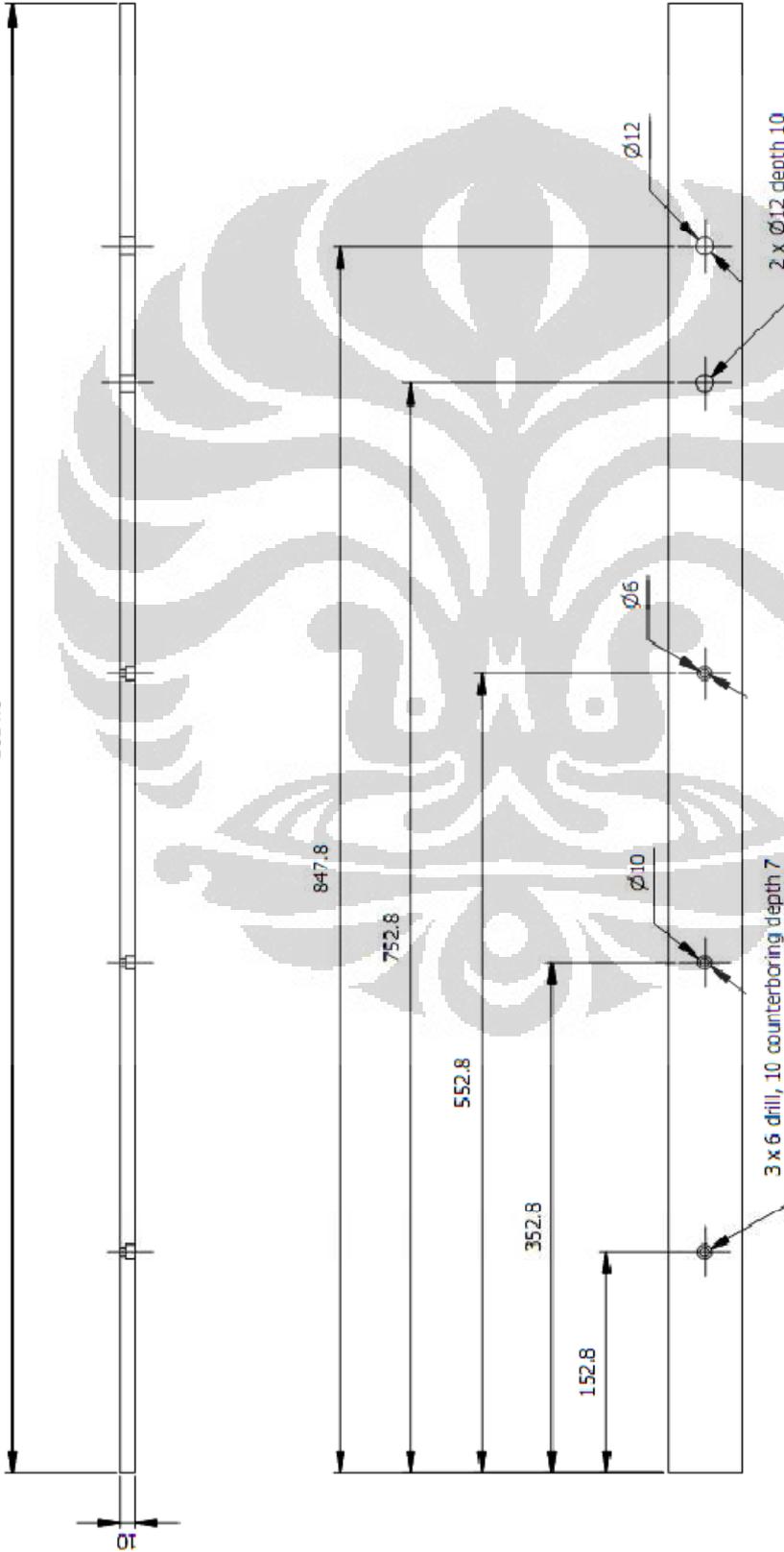


1	Alas Gantry Atas Kanan	Aluminium Dural	1
NO	PART	BAHAN	JUMLAH
	Skala : 1:5	Digambar : Jediel B R	PERINGATAN
	Satuan : mm	NPM : 0706267111	
	Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	
DTM-FTUI	Alas Gantry Atas Kanan	T-03	A4

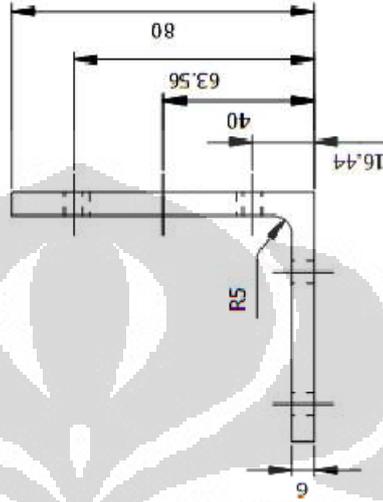
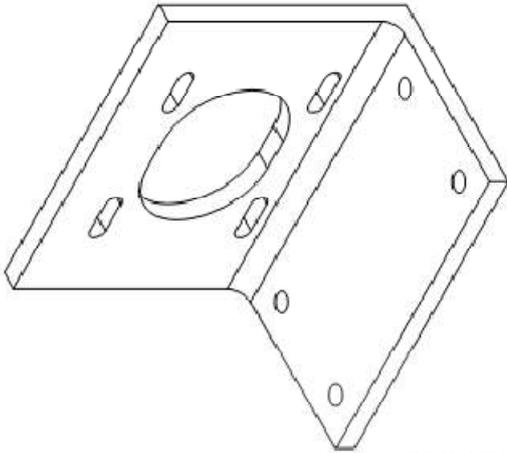
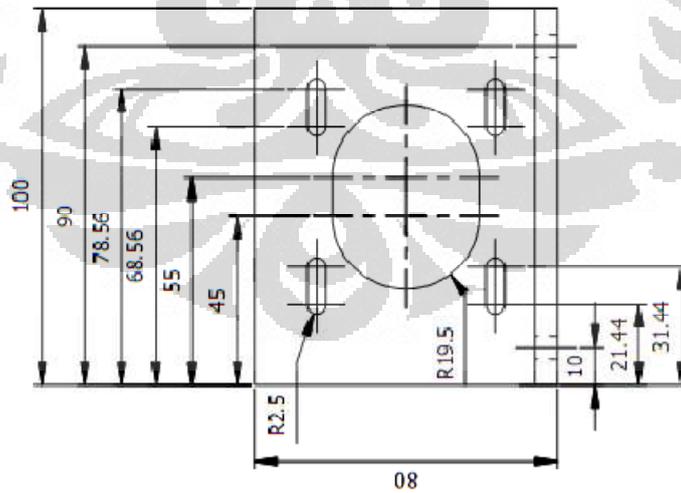
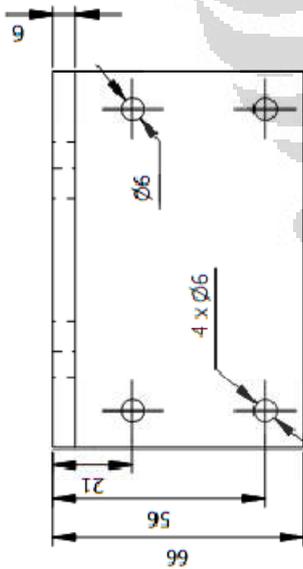


1	Alas Gantry Atas Depan	Aluminium Dural	1
NO	PART	BAHAN	JUMLAH
	Skala : 1:7	Digambar : Jediel B R	PERINGATAN
	Satuan : mm	NPM : 0706267111	
	Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	
DTM-FTUI	Alas Gantry Atas Depan	T-04	A4

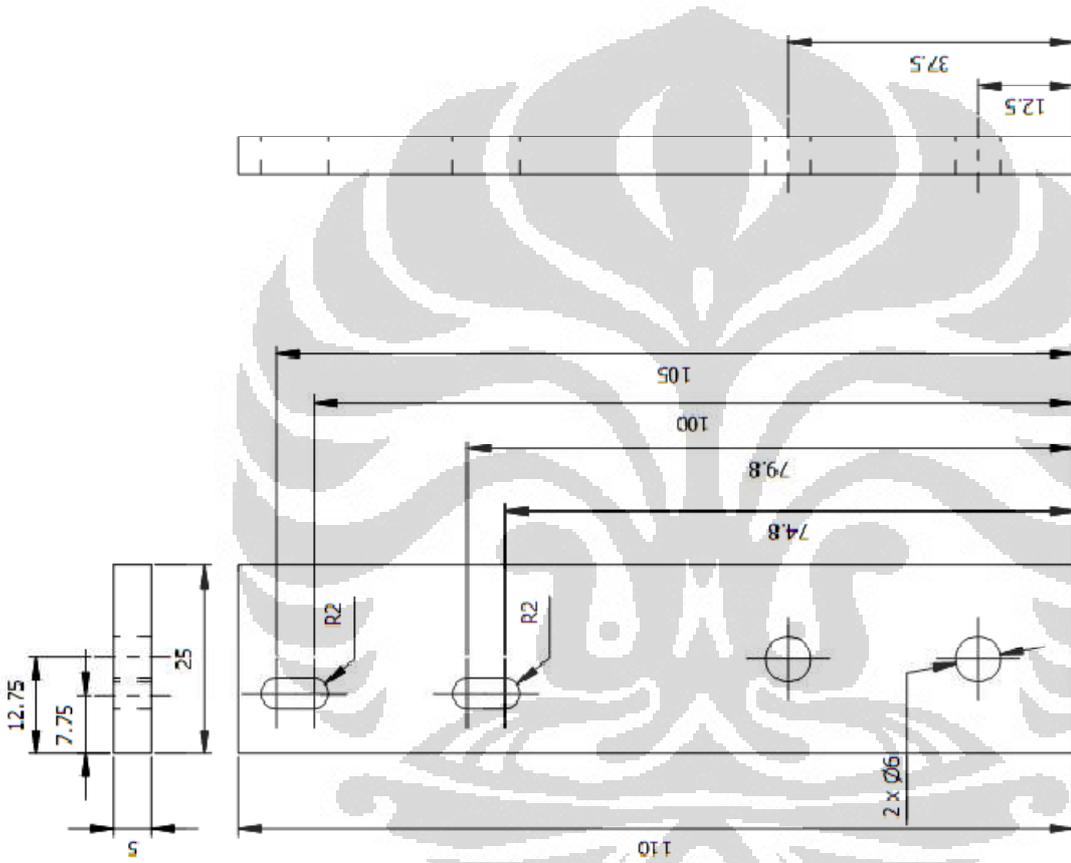
1014.6



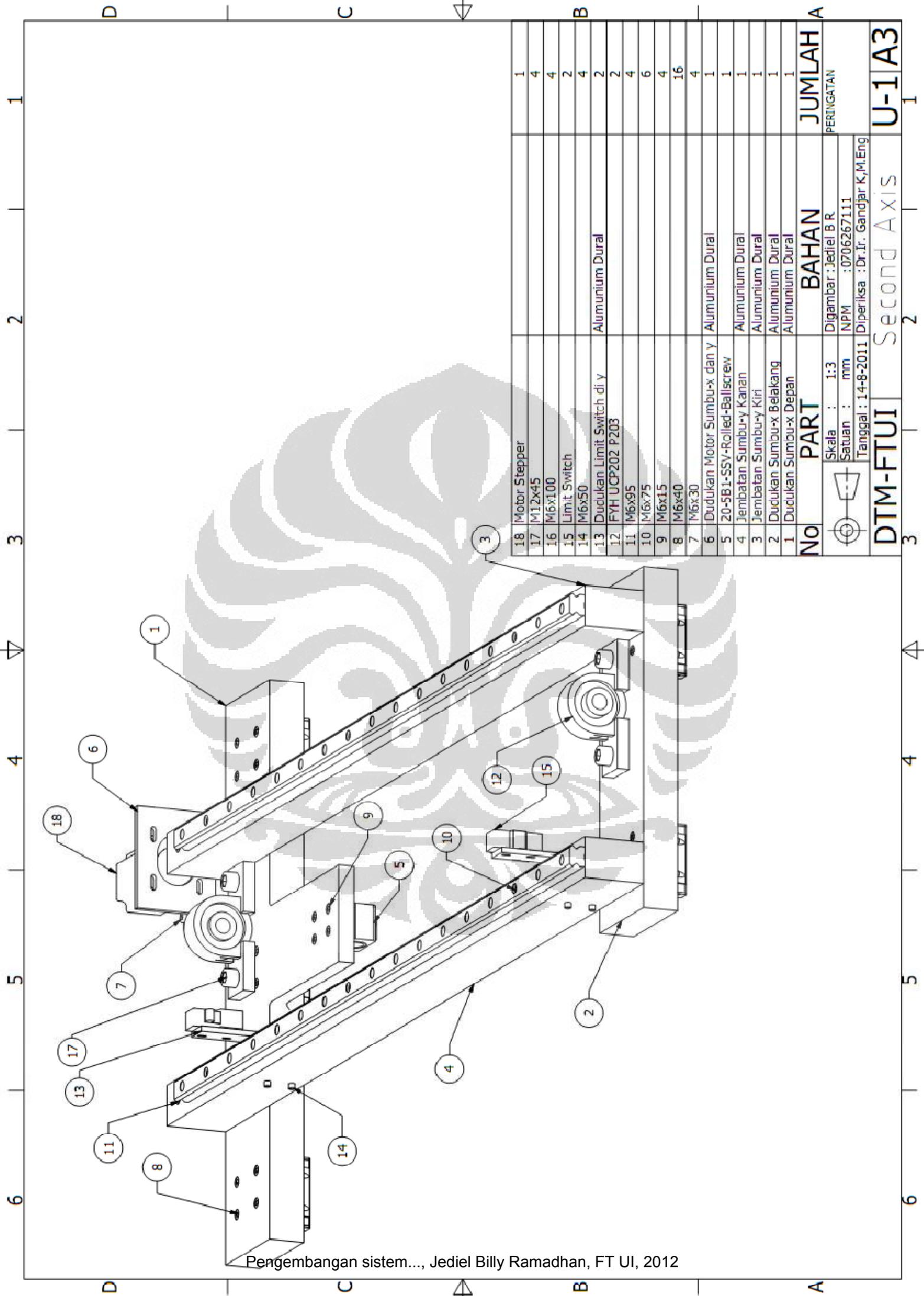
1	Alas Gantry Atas Kiri	Aluminium Dural	1
NO	PART	BAHAN	JUMLAH
	Skala : 1:5	Digambar : Jediel B R	PERINGATAN
	Satuan : mm	NPM : 0706267111	
	Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	
DTM-FTUI	Alas Gantry Atas Kiri	T-05	A4



1	Dudukan Motor Sumbu-x dan y	Aluminium Dural	1
No	PART	BAHAN	JUMLAH
	Skala : 1:2	Digambar : Jediel B R	PERINGATAN
	Satuan : mm	NPM : 0706267111	
	Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	
DTM-FTUI	Dudukan Motor Sumbu-x dan y		T-06 A4

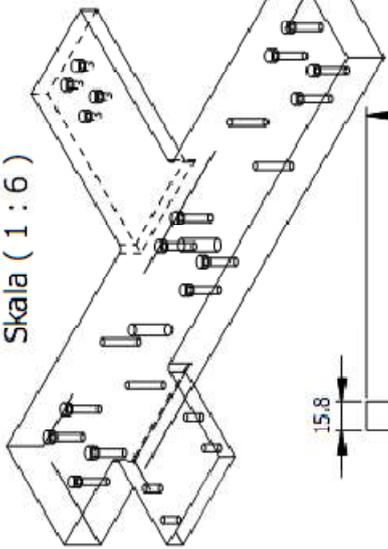
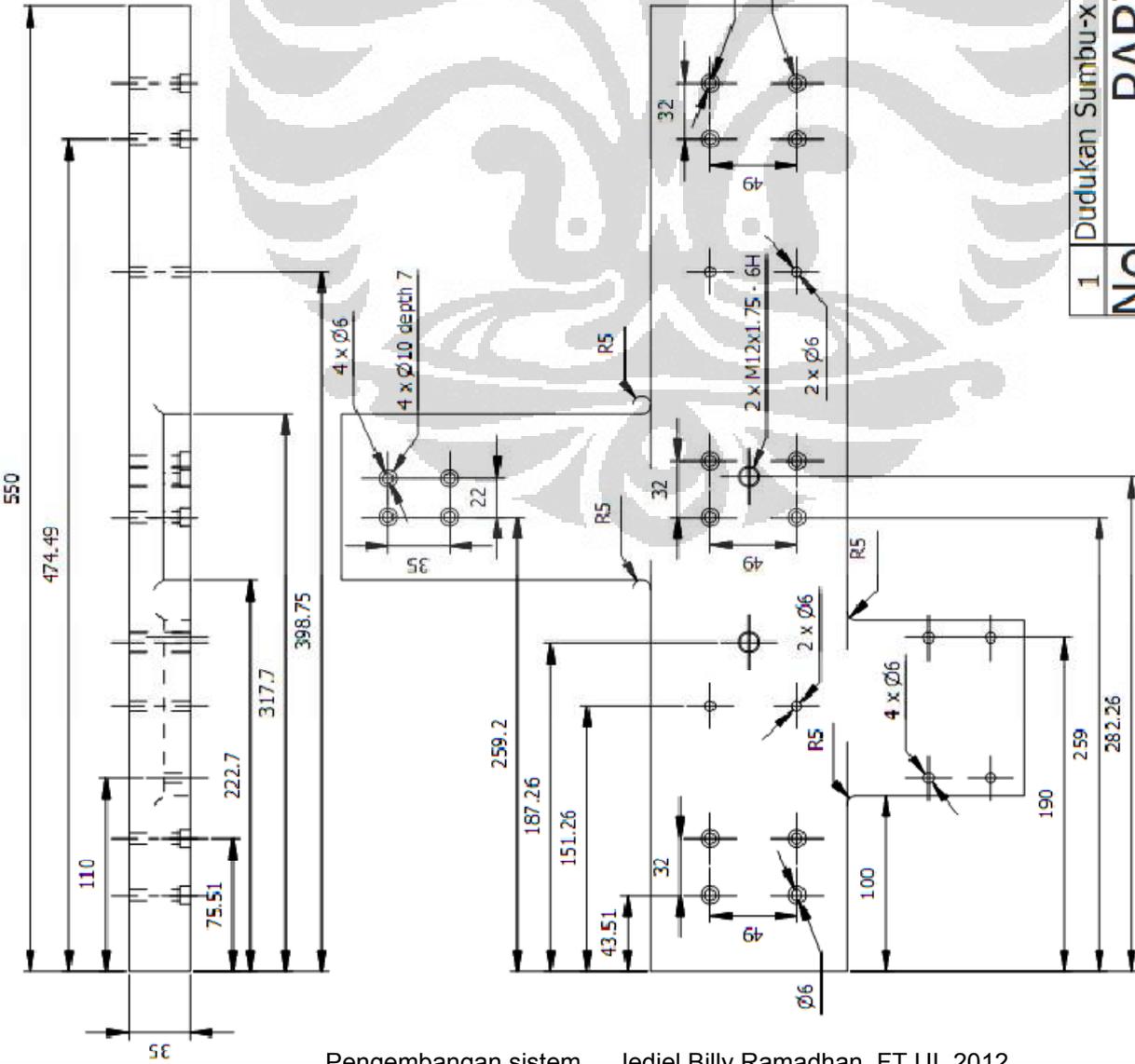


1	Dudukan Limit Switch di x	Aluminium Dural	2
No	PART	BAHAN	JUMLAH
			PERINGATAN
			Skala : 1:2
			Digambar : Jediel B R
Satuan : mm	NPM : 0706267111		
	Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	
DTM-FTUI	Dudukan Limit Switch di x	T-08 A4	

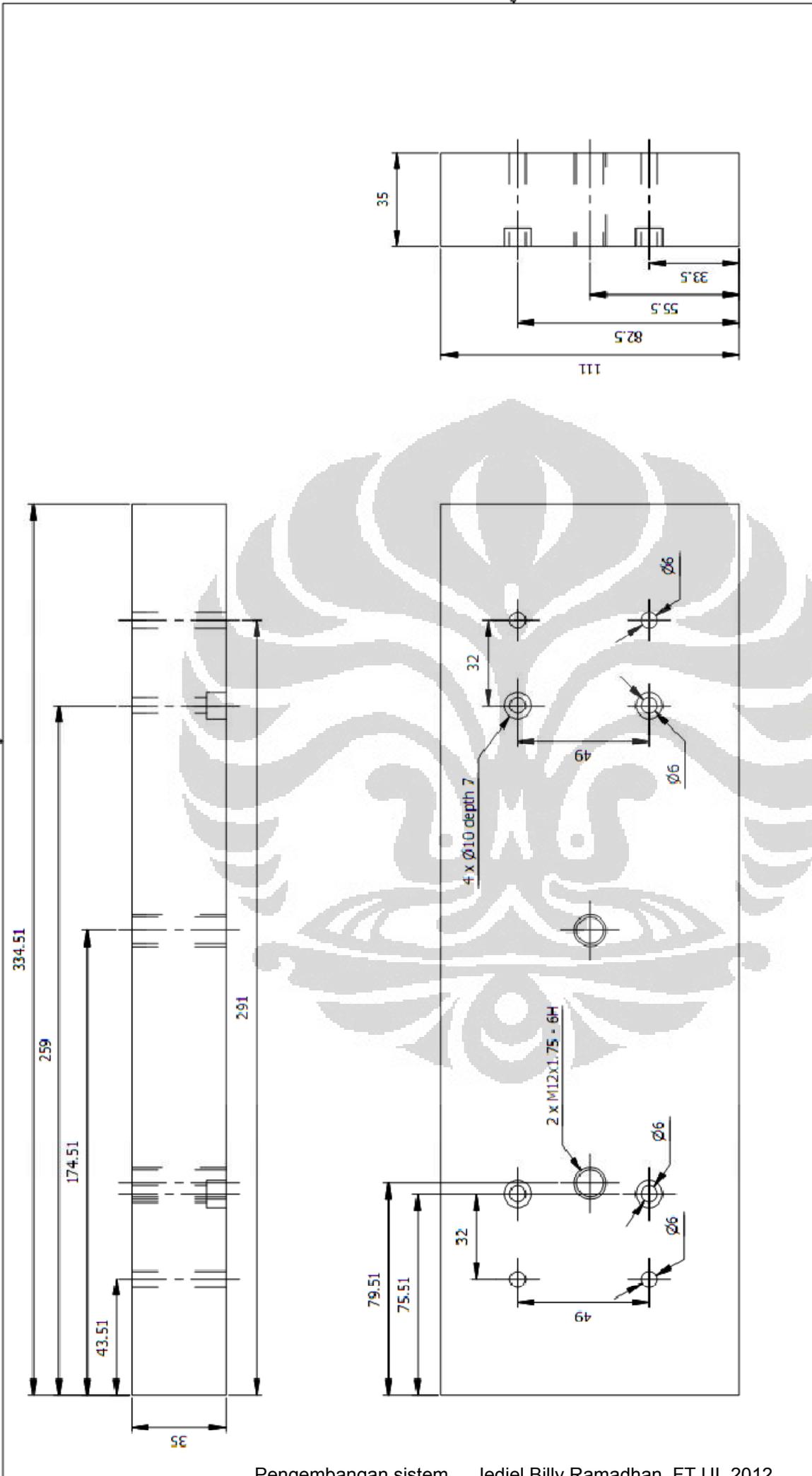


18	Motor Stepper		1
17	M12x45		4
16	M6x100		4
15	Limit Switch		2
14	M6x50		4
13	Dudukan Limit Switch di y	Aluminium Dural	2
12	FYH UCP202 P203		2
11	M6x95		4
10	M6x75		6
9	M6x15		4
8	M6x40		16
7	M6x30		4
6	Dudukan Motor Sumbu-x dan y	Aluminium Dural	1
5	20-5B1-SSV-Rolled-Ballscrew		1
4	Jembatan Sumbu-y Kanan	Aluminium Dural	1
3	Jembatan Sumbu-y Kiri	Aluminium Dural	1
2	Dudukan Sumbu-x Belakang	Aluminium Dural	1
1	Dudukan Sumbu-x Depan	Aluminium Dural	1
BAHAN			JUMLAH
PART			PERINGATAN
Skala : 1:3		Digambar : Jediel B R	
Satuan : mm		NPM : 0706267111	
Tanggal : 14-8-2011		Diperiksa : Dr. Ir. Gandjar K, M. Eng	
DTM-FTUI		Second Axis	U-1/A3

Skala (1 : 6)



1	Dudukan Sumbu-x Depan	Aluminium Dural	1
No	PART	BAHAN	JUMLAH
	Skala : 1:4	Digambar : Jediel B R	PERINGATAN
	Satuan : mm	NPM : 0706267111	
	Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	
DTM-FTUI		Dudukan Sumbu-x Depan	U-01 A4



1	Dudukan Sumbu-x Belakang	Aluminium Dural	1
No	PART	BAHAN	JUMLAH
	Skala : 1:2	Digambar : Jediel B R	PERINGATAN
	Satuan : mm	NPM : 0706267111	
	Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	
DTM-FTUI	Dudukan Sumbu-x Belakang	U-02	A4

1069.8



1041.3

992.3

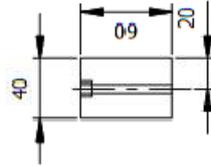
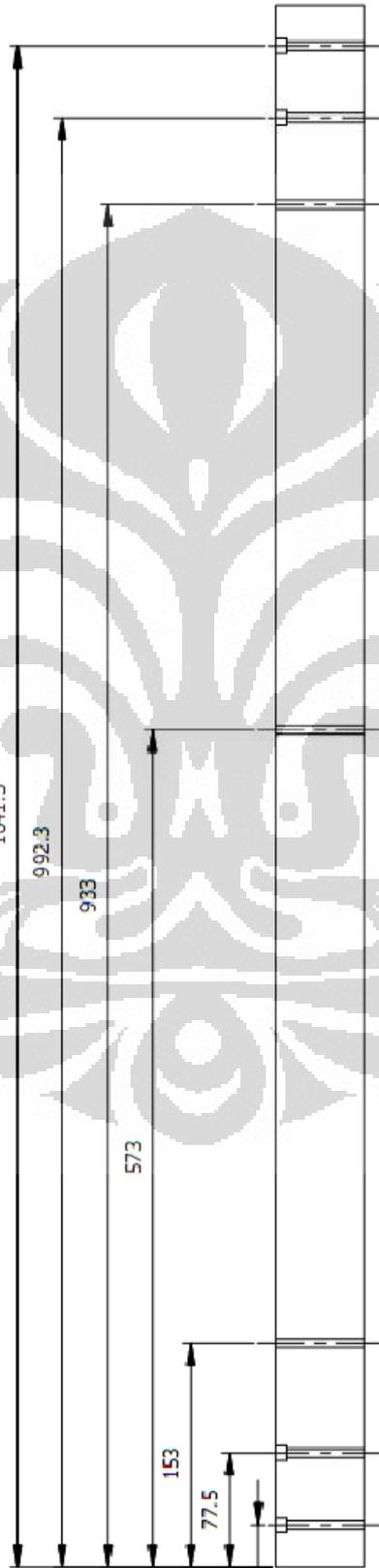
933

573

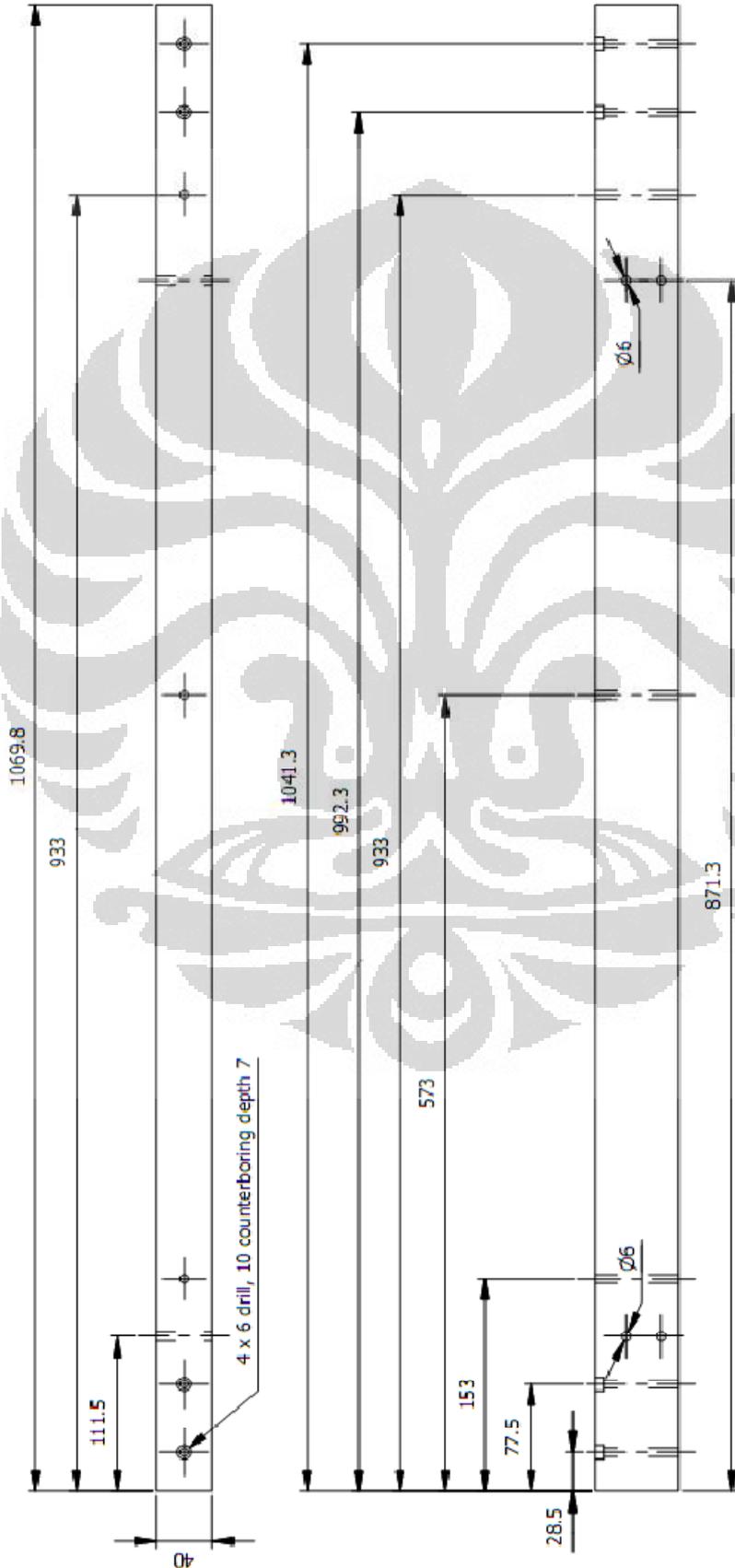
153

77.5

28.5

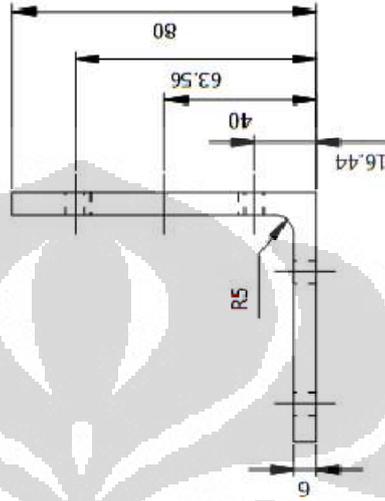
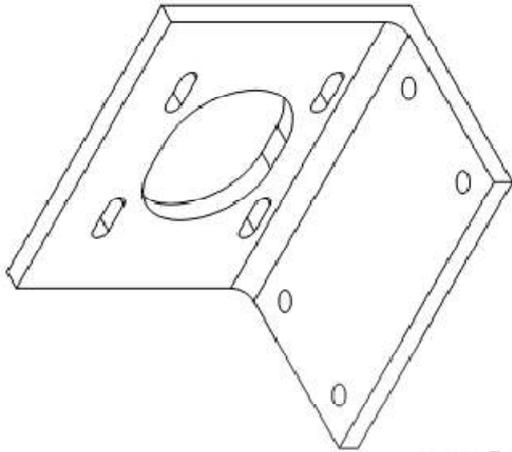
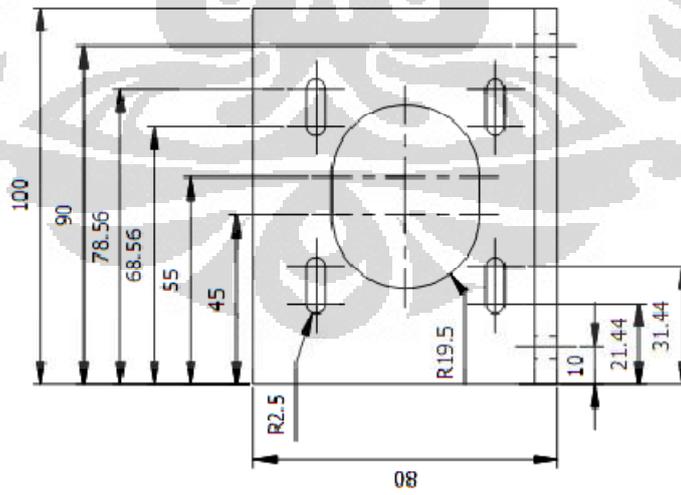
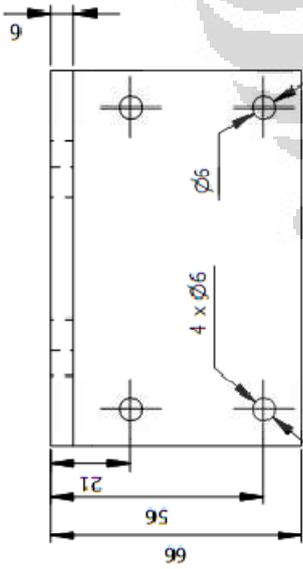


1	Jembatan Sumbu-y Kiri	Aluminium Dural	1
No	PART	BAHAN	JUMLAH
			PERINGATAN
			Skala : 1:5
			Digambar : Jediel B R
Satuan : mm	NPM : 0706267111		
Tanggal : 15-8-2011			Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng
DTM-FTUI	Jembatan Sumbu-y Kiri	U-03 A4	

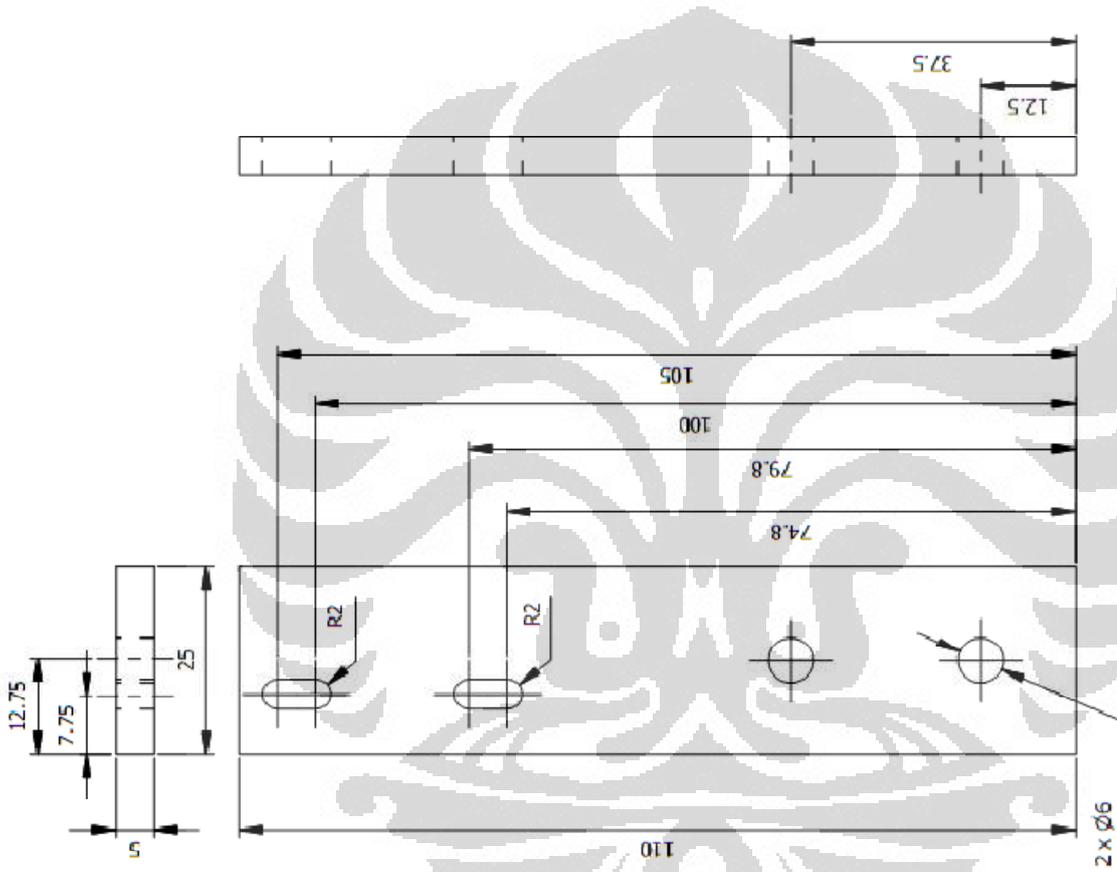


4 x 6 drill, 10 counterboring depth 7

1	Jembatan Sumbu-y Kanan	Aluminium Dural	1
No	PART	BAHAN	
		Digambar : Jediel B R	
		NPM : 0706267111	
Tanggal : 15-8-2011		Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M,Eng	
DTM-FTUI		Jembatan Sumbu-y Kanan	
		JUMLAH	
		PERINGATAN	
		U-04	
		A4	

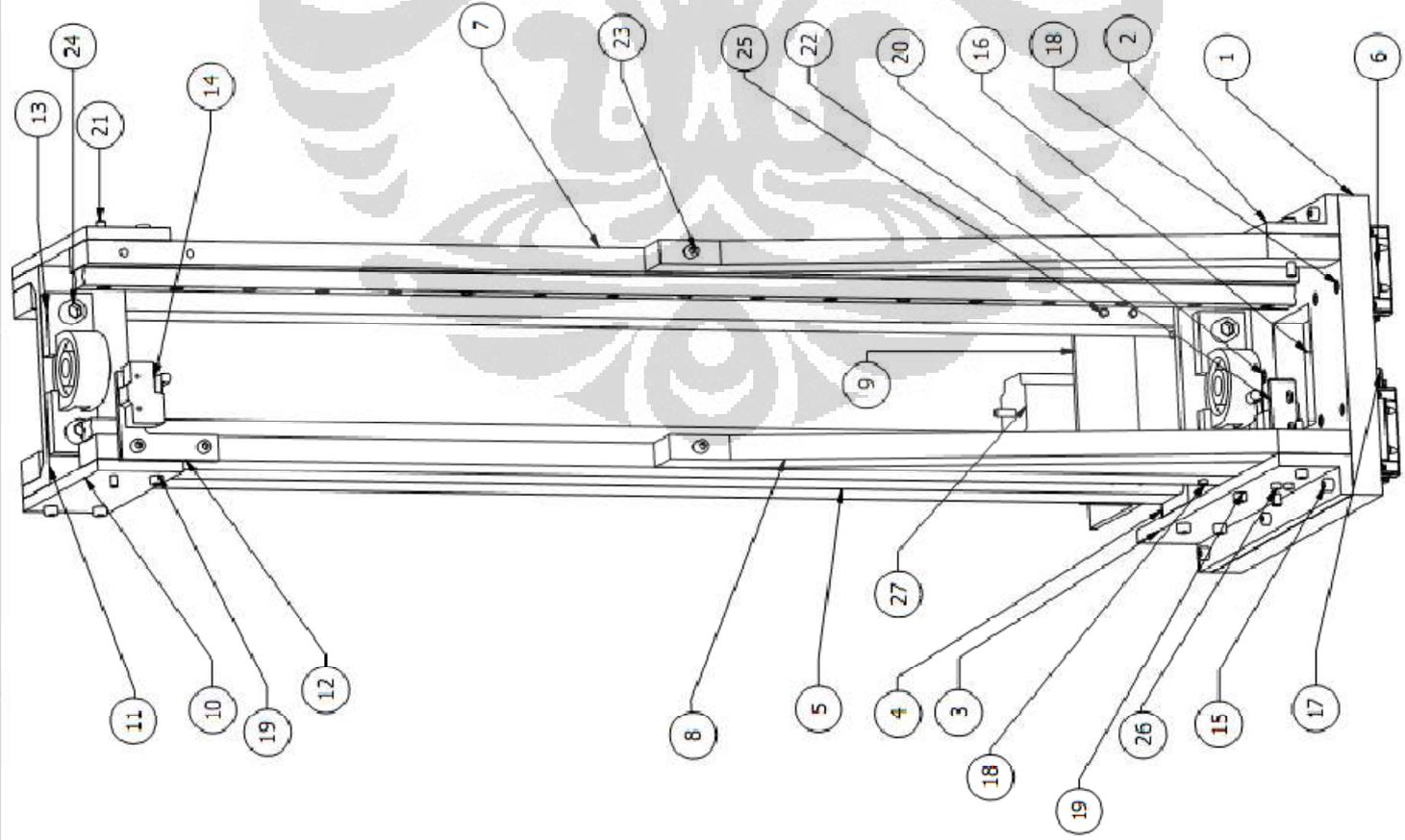


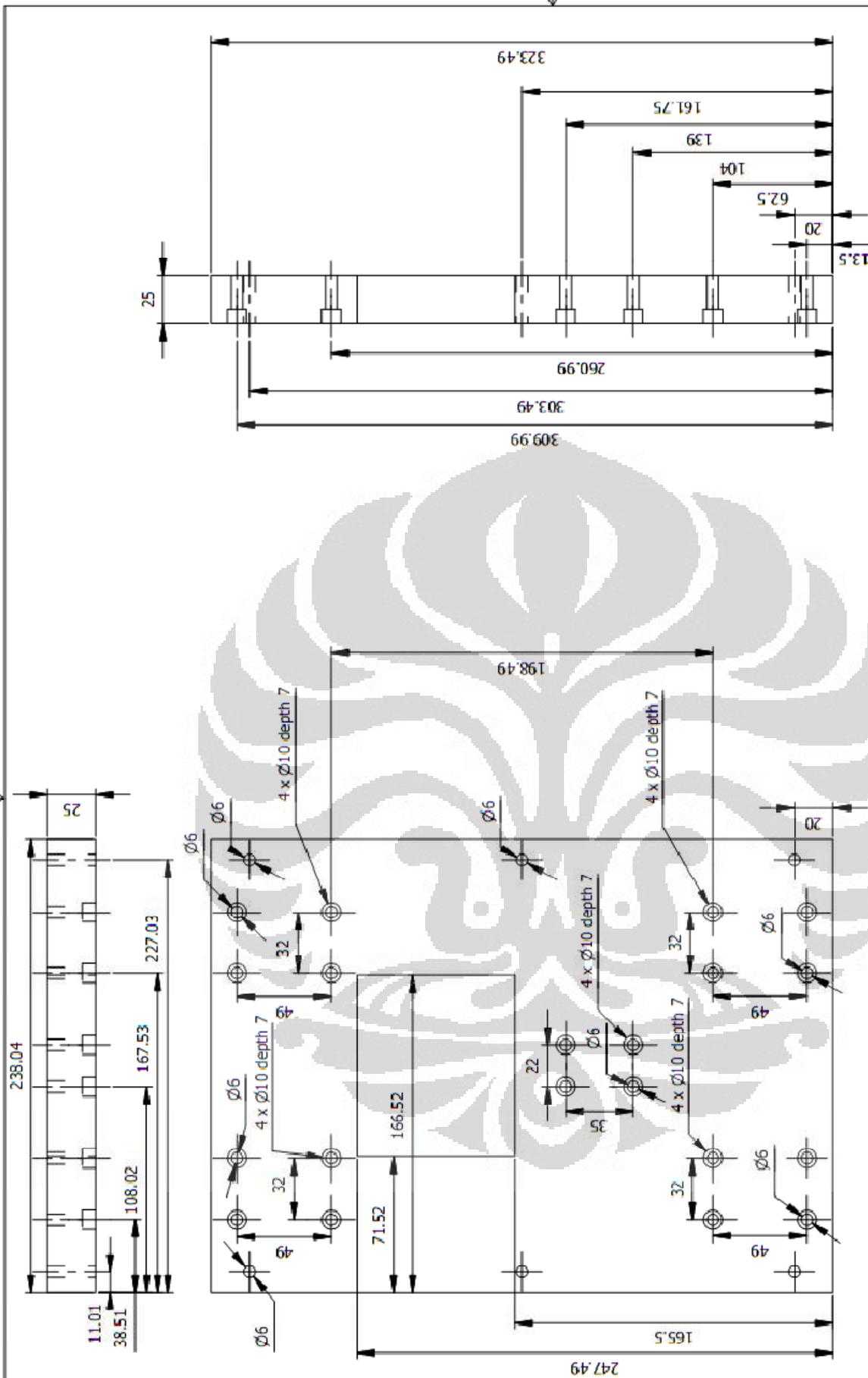
1	Dudukan Motor Sumbu-x dan y	Aluminium Dural	1
No	PART	BAHAN	JUMLAH
			PERINGATAN
			Skala : 1:2
			Digambar : Jediel B R
Satuan : mm	NPM : 0706267111		
Tanggal : 15-8-2011		Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	
DTM-FTUI	Dudukan Motor Sumbu-x dan y	U-06	A4



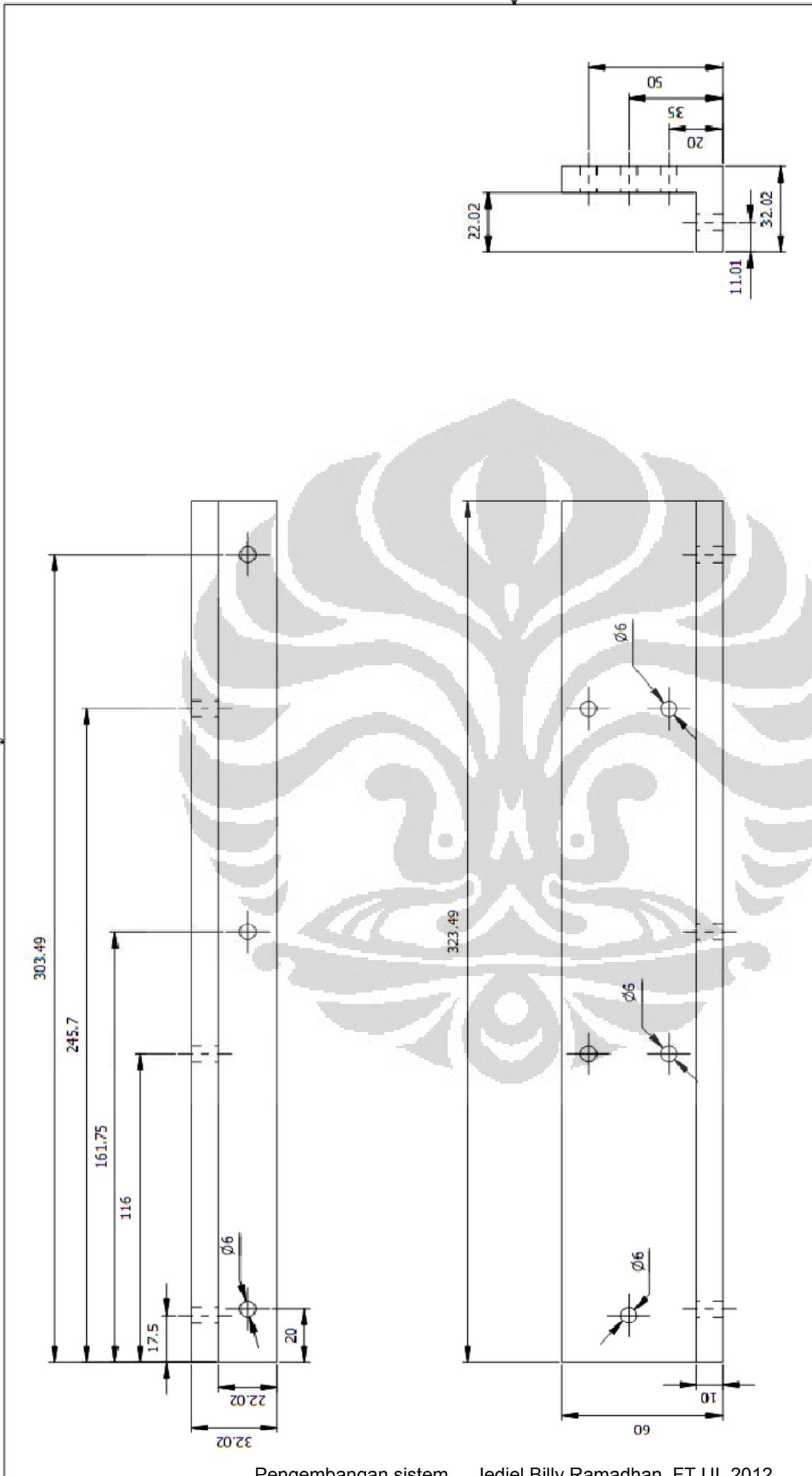
1	Dudukan Limit Switch di x	Aluminium Dural	2
NO	PART	BAHAN	JUMLAH
	Skala : 1:2	Digambar : Jediel B R	PERINGATAN
	Satuan : mm	NPM : 0706267111	
	Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	
DTM-FTUI	Dudukan Limit Switch di x	U-013	A4

27	Motor Stepper			1
26	M4x20			2
25	M6x50			6
24	M12x45			4
23	M6x85			2
22	Limit Switch Sumbu-z Bawah	Aluminium Dural		1
21	M6x45			12
20	M6x65			4
19	M6x20			4
18	M6x30			18
17	20-5B1-SSV-Rolled-Ballscrew			1
16	Dudukan Ballscrew Sumbu-y	Aluminium Dural		1
15	M6x40			8
14	Limit Switch			2
13	FYH UCP202 P203			2
12	Limit Switch Sumbu-z Atas	Aluminium Dural		1
11	Pemegang Tiang Sumbu-z Atas	Aluminium Dural		1
10	Pemegang Tiang Atas	Aluminium Dural		2
9	Dudukan Motor Sumbu-z	Aluminium Dural		1
8	Pemegang Tiang	Aluminium Dural		2
7	Tiang Sumbu-z Kanan	Aluminium Dural		2
6	Linear Guide Way			4
5	Tiang Sumbu-z Kiri	Aluminium Dural		2
4	Pemegang Tiang Sumbu-z Bawah	Aluminium Dural		1
3	Pengunci Tiang Sumbu-z Depan	Aluminium Dural		1
2	Pengunci Tiang Sumbu-z Belakang	Aluminium Dural		1
1	Dudukan Sumbu-y	Aluminium Dural		1
No	PART	BAHAN	JUMLAH	PERINGATAN
	Skala : 1:4	Digambar : Jediel B R		
	Satuan : mm	NPM : 0706267111		
	Tanggal : 14-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M,Eng		
DTM-FTUI Third Axis			V-1 A3	I

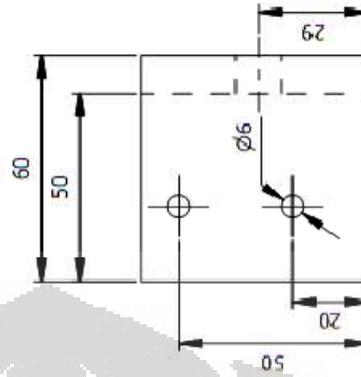
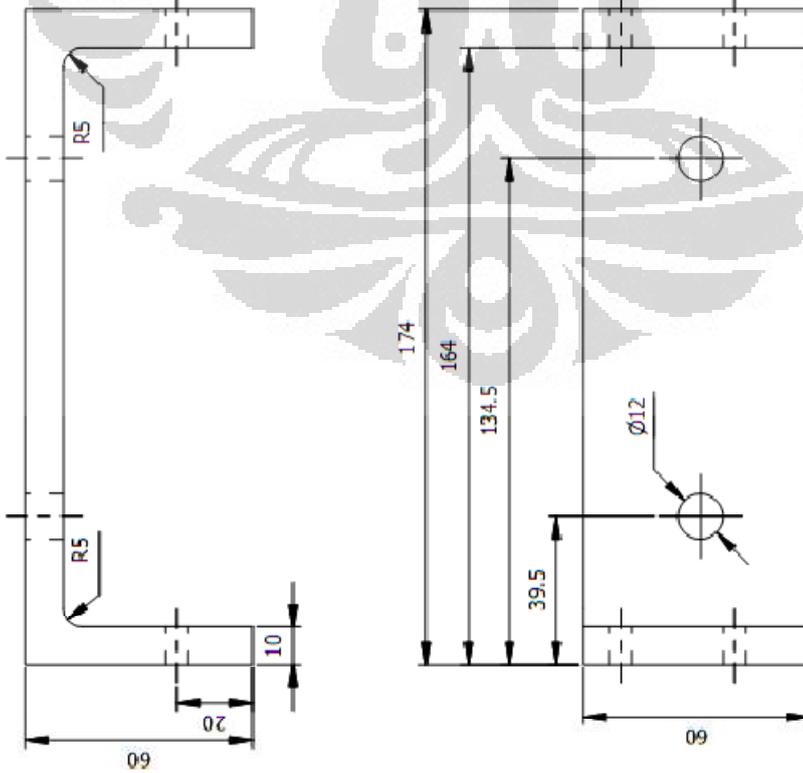
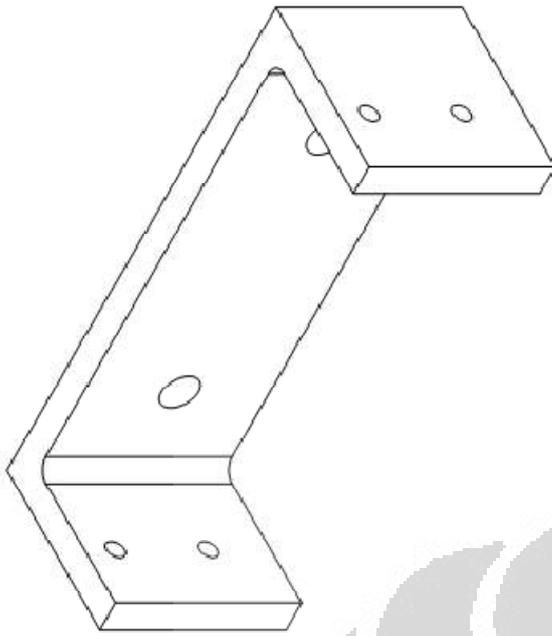




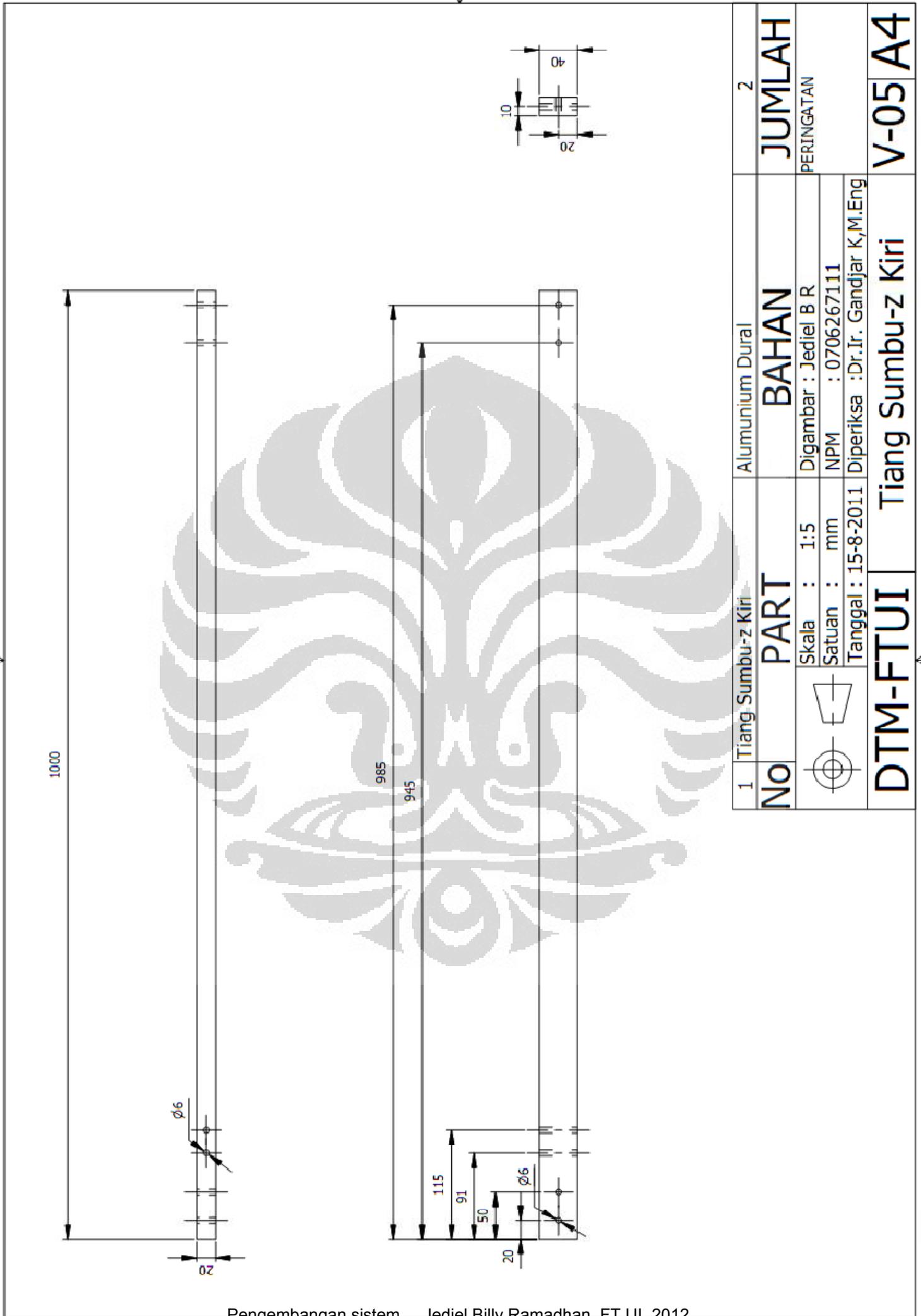
1	Dudukan Sumbu-y	Aluminium Dural	1
No	PART	BAHAN	JUMLAH
			PERINGATAN
			Skala : 1:3
			Digambar : Jediel B R
Satuan : mm	NPM : 0706267111		
Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng		
DTM-FTUI	Dudukan Sumbu-y	V-01	A4



1	Pengunci Tiang Sumbu-z Belakang	Aluminium Dural	1
No	PART	BAHAN	JUMLAH
			PERINGATAN
	Skala : 1:2	Digambar : Jediel B R	
	Satuan : mm	NPM : 0706267111	
	Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	
DTM-FTUI	Pengunci Tiang Sumbu-z Belakang	V-02	A4



1	Pemegang Tiang Sumbu-z Bawah	Aluminium Dural	1
No	PART	BAHAN	JUMLAH
			PERINGATAN
			Skala : 1:2
			Digambar : Jediel B R
Satuan : mm	NPM : 0706267111		
Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng		
DTM-FTUI	Pemegang Tiang Sumbu-z Bawah	V-04	A4

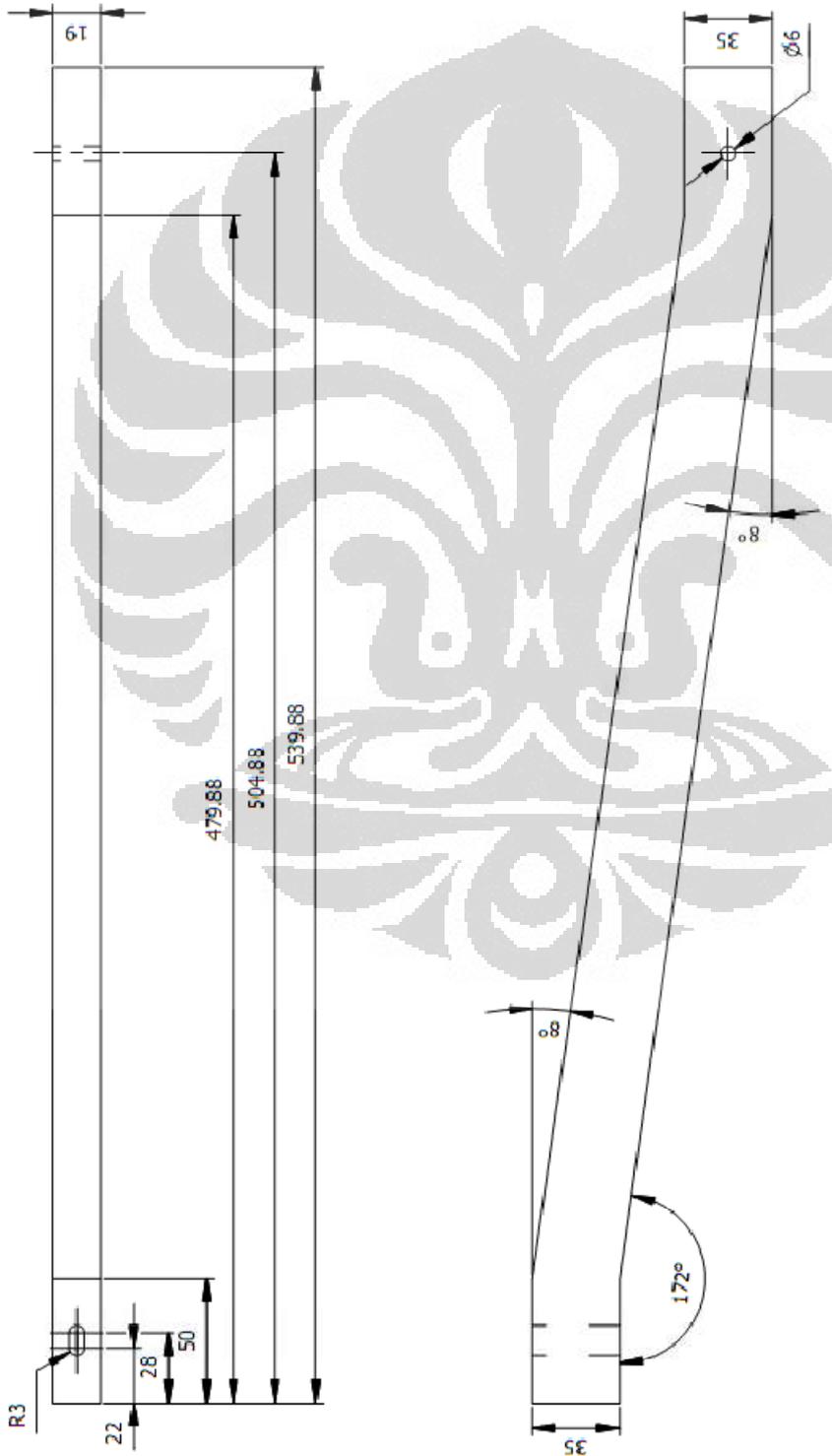
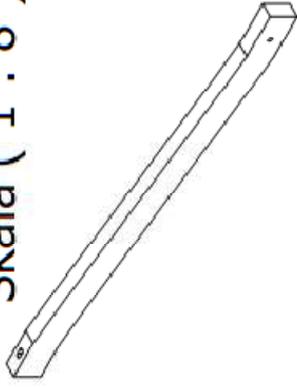


1	Tiang Sumbu-z Kiri	Aluminium Dural	2
No	PART	BAHAN	JUMLAH
	Skala : 1:5	Digambar : Jediel B R	PERINGATAN
	Satuan : mm	NPM : 0706267111	
	Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	
DTM-FTUI	Tiang Sumbu-z Kiri	V-05	A4



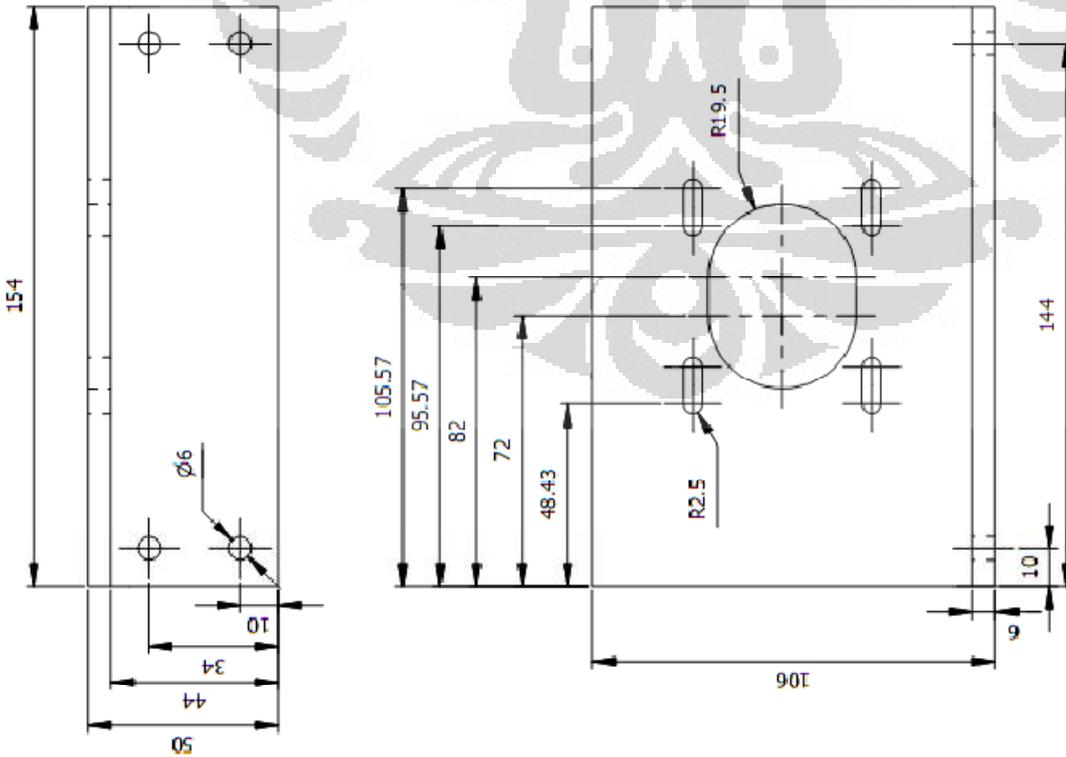
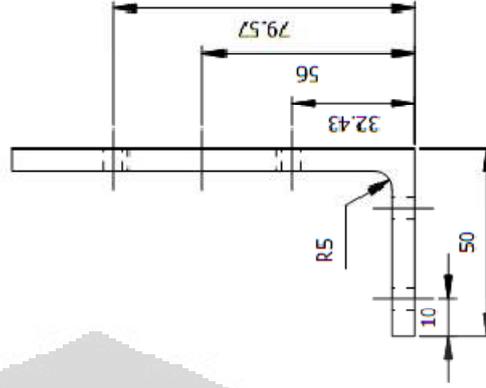
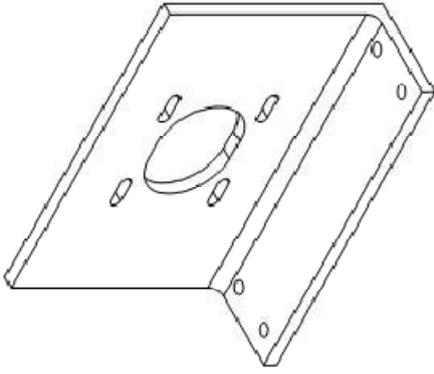
1	Tiang Sumbu-z Kanan	Aluminium Dural	2
No	PART	BAHAN	
		PERINGATAN	
		Skala : 1:5	Digambar : Jediel B R
		Satuan : mm	NPM : 0706267111
Tanggal : 15-8-2011		Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	
DTM-FTUI		Tiang Sumbu-z Kanan	
		V-07 A4	

Skala (1 : 8)

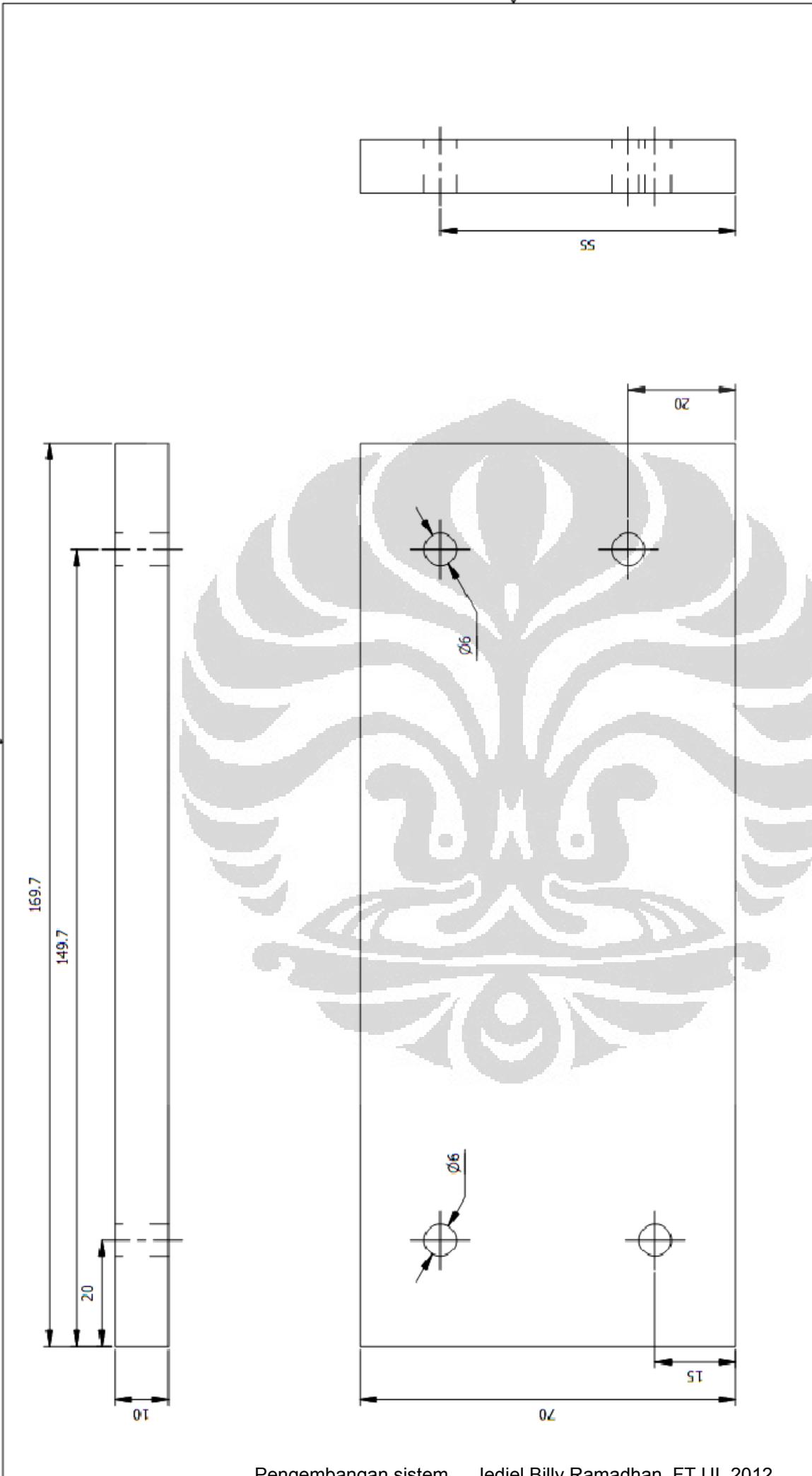


1	Pemegang Tiang	Aluminium Dural	2
No	PART	BAHAN	JUMLAH
	Skala : 1:3	Digambar : Jediel B R	PERINGATAN
	Satuan : mm	NPM : 0706267111	
	Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M,Eng	
DTM-FTUI	Pemegang Tiang	V-08	A4

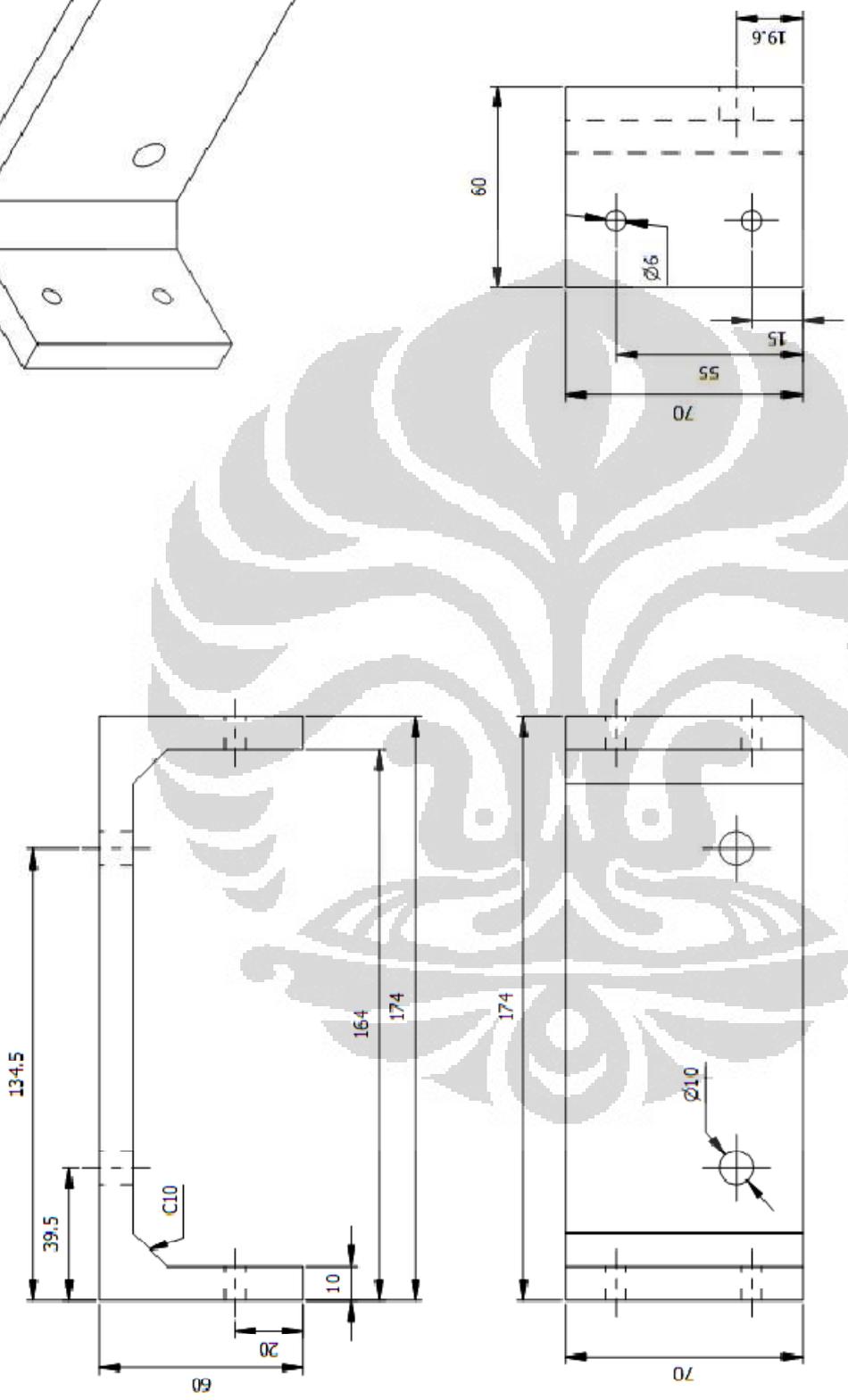
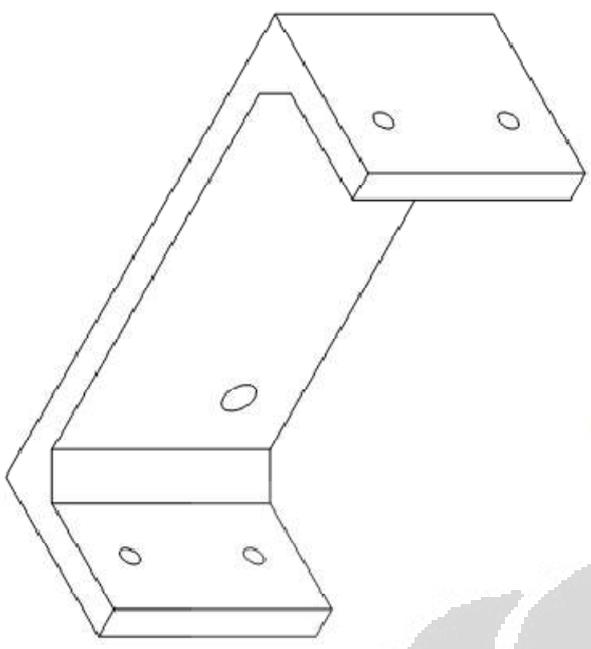
Skala (1 : 3)



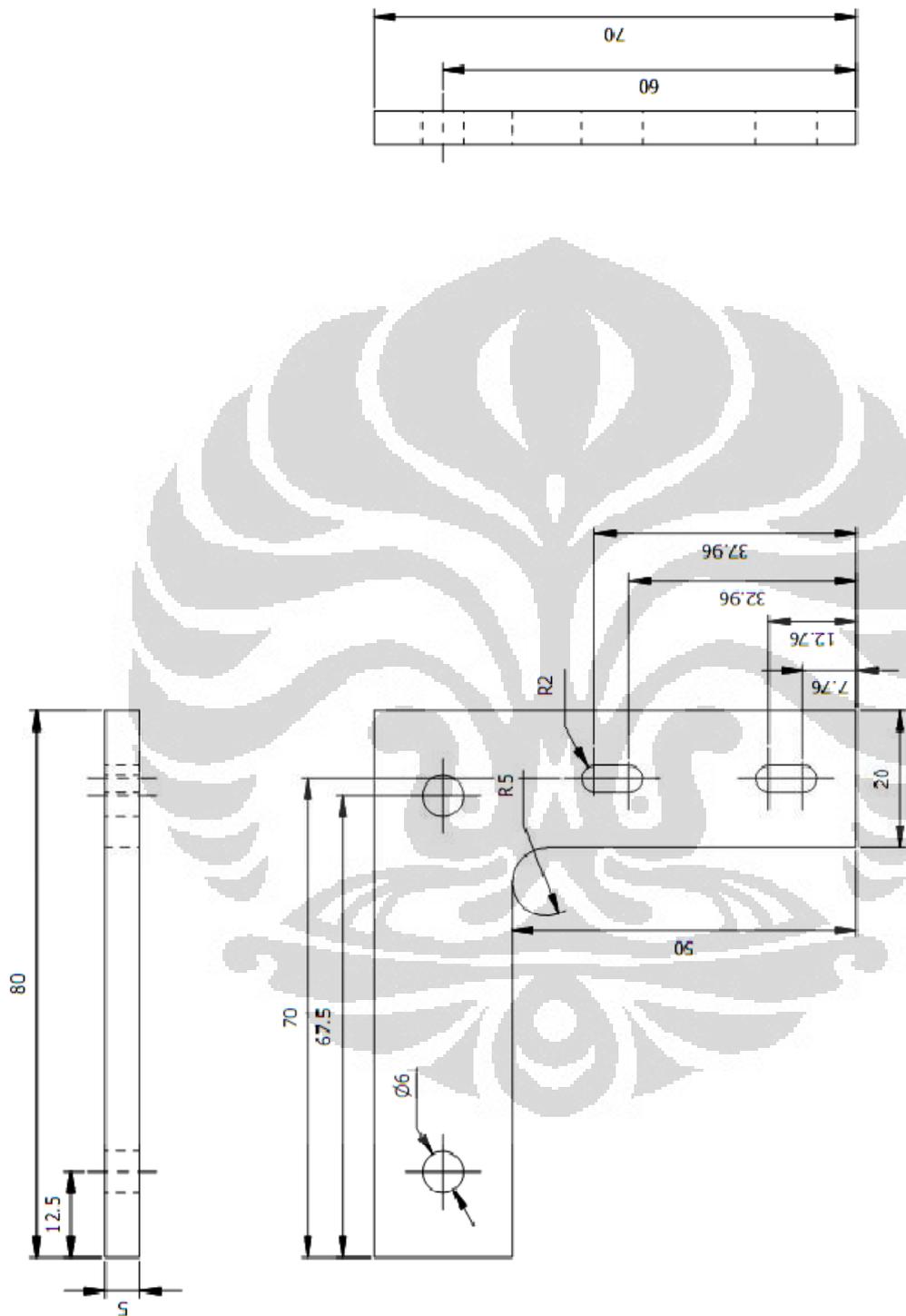
1	Dudukan Motor Sumbu-z	Aluminium Dural	1	
 	NO	PART	BAHAN	JUMLAH
		Skala : 1:2	Digambar : Jediel B R	PERINGATAN
		Satuan : mm	NPM : 0706267111	
		Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	
DTM-FTUI		Dudukan Motor Sumbu-z	V-09 A4	



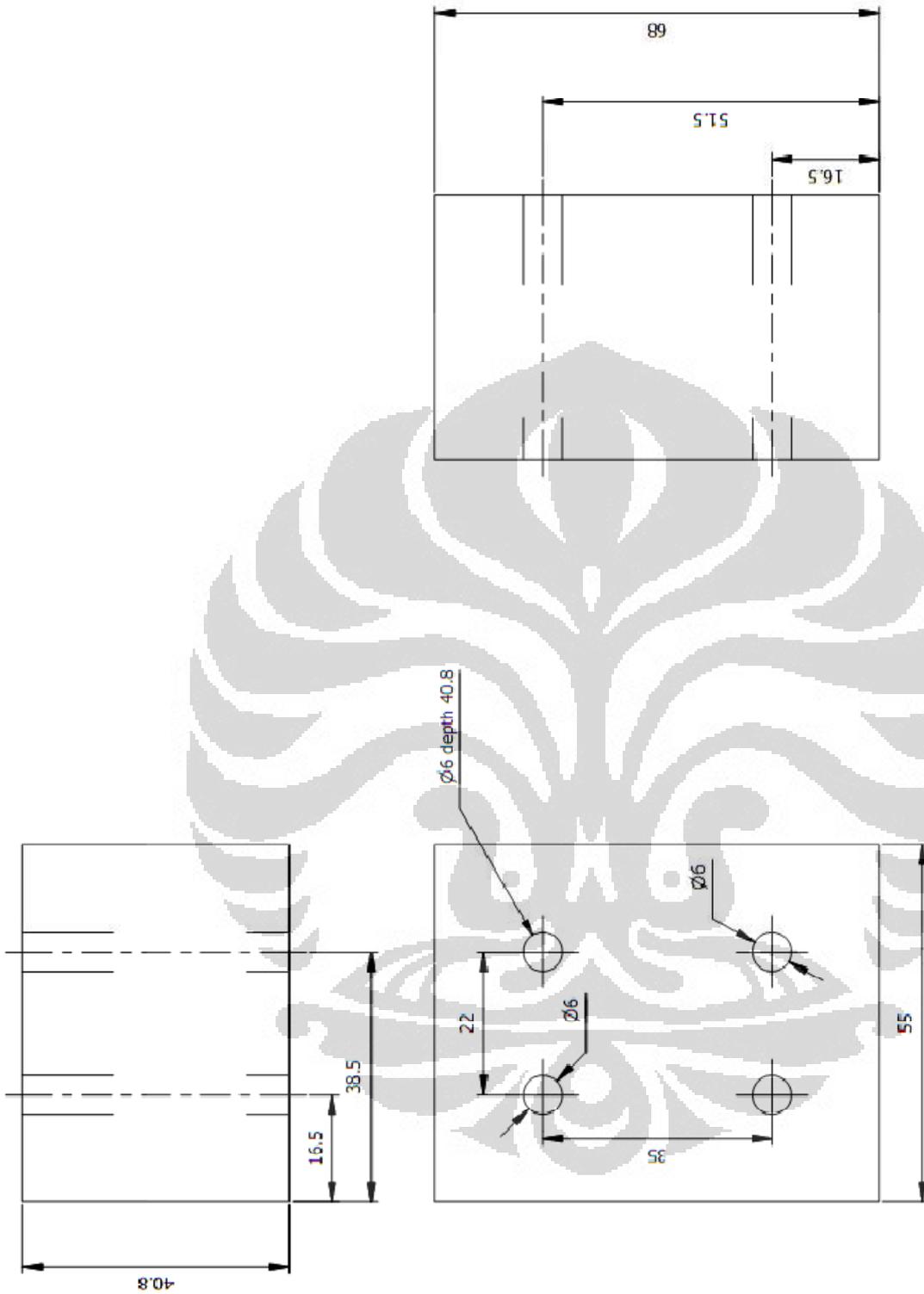
1	Pemegang Tiang Atas	Aluminium Dural	2
NO	PART	BAHAN	JUMLAH
Skala : 1:1	Digambar : Jediel B R	PERINGATAN	
Satuan : mm	NPM : 0706267111		
Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng		
DTM-FTUI	Pemegang Tiang Atas	V-010	A4



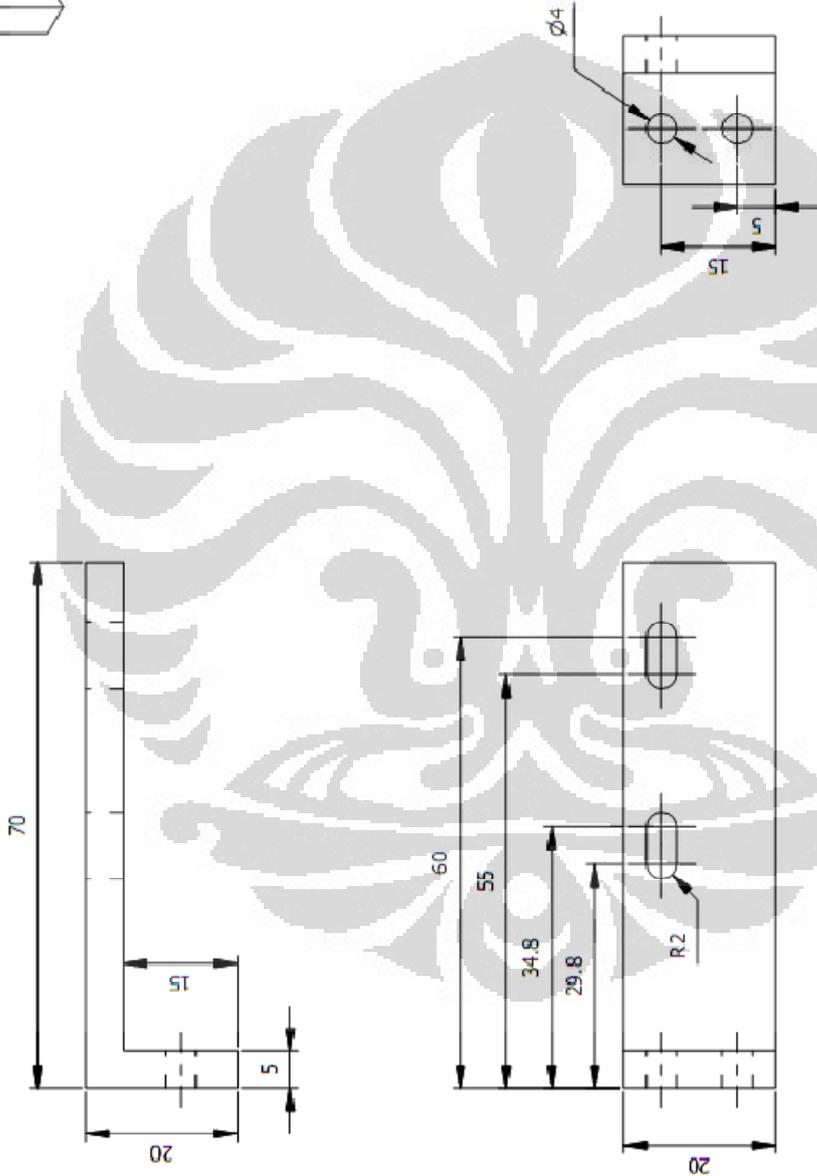
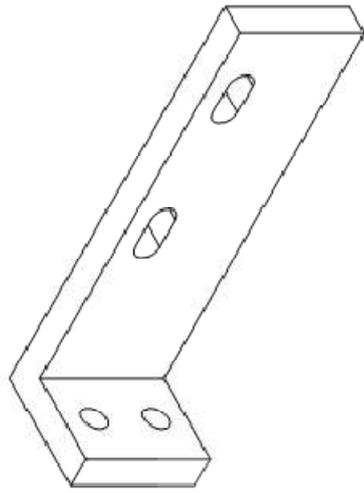
1	Pemegang Tiang Sumbu-z Atas	Aluminium Dural	1
NO	PART	BAHAN	JUMLAH
	Skala : 1:2	Digambar : Jediel B R	PERINGATAN
	Satuan : mm	NPM : 0706267111	
	Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	
DTM-FTUI	Pemegang Tiang Sumbu-z Atas	V-011	A4



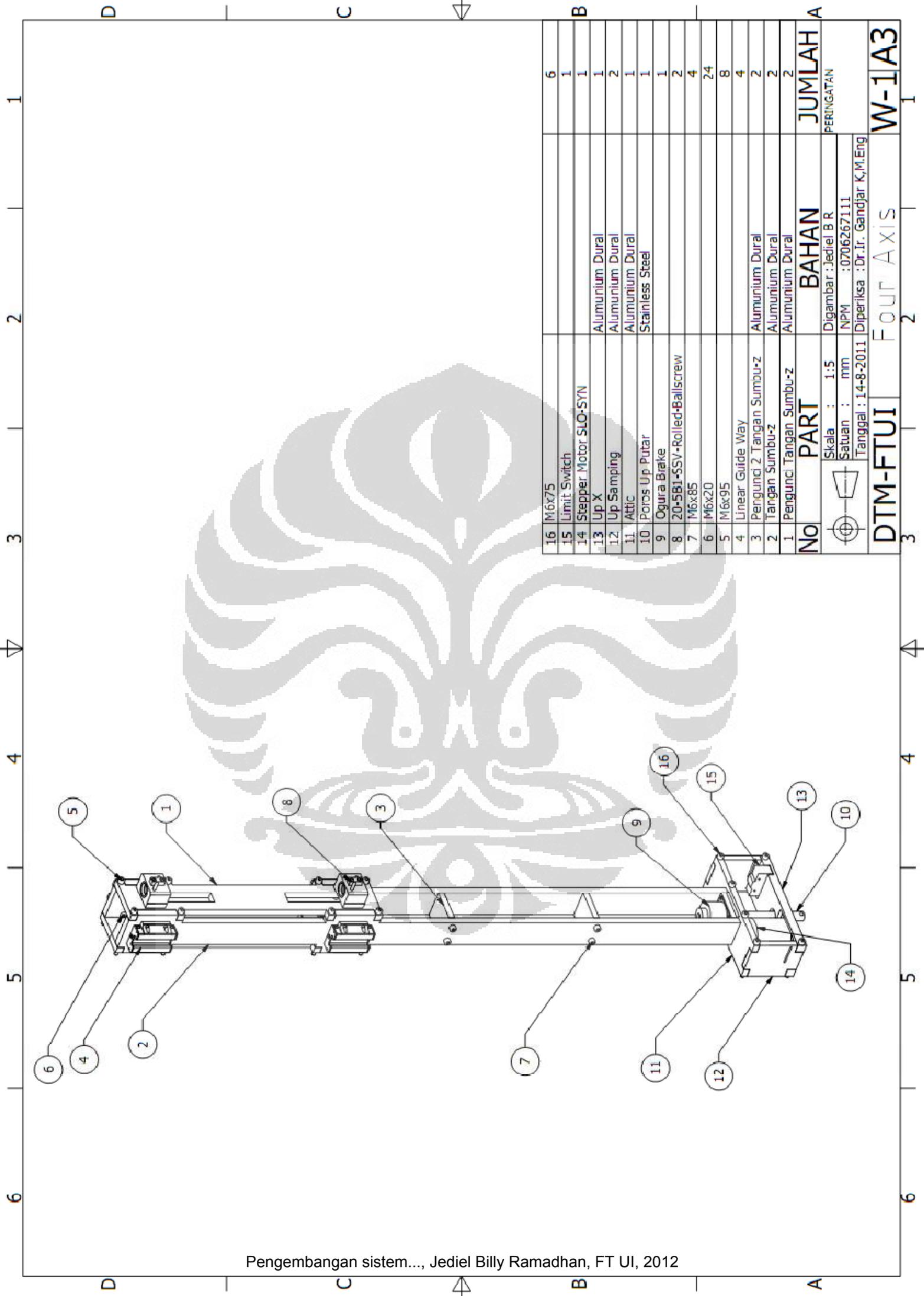
1	Limit Switch Sumbu-z Atas	Aluminium Dural	1
No	PART	BAHAN	JUMLAH
			PERINGATAN
			Digambar : Jediel B R
			NPM : 0706267111
Tanggal : 15-8-2011		Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	
DTM-FTUI		Limit Switch Sumbu-z Atas	V-012
			A4



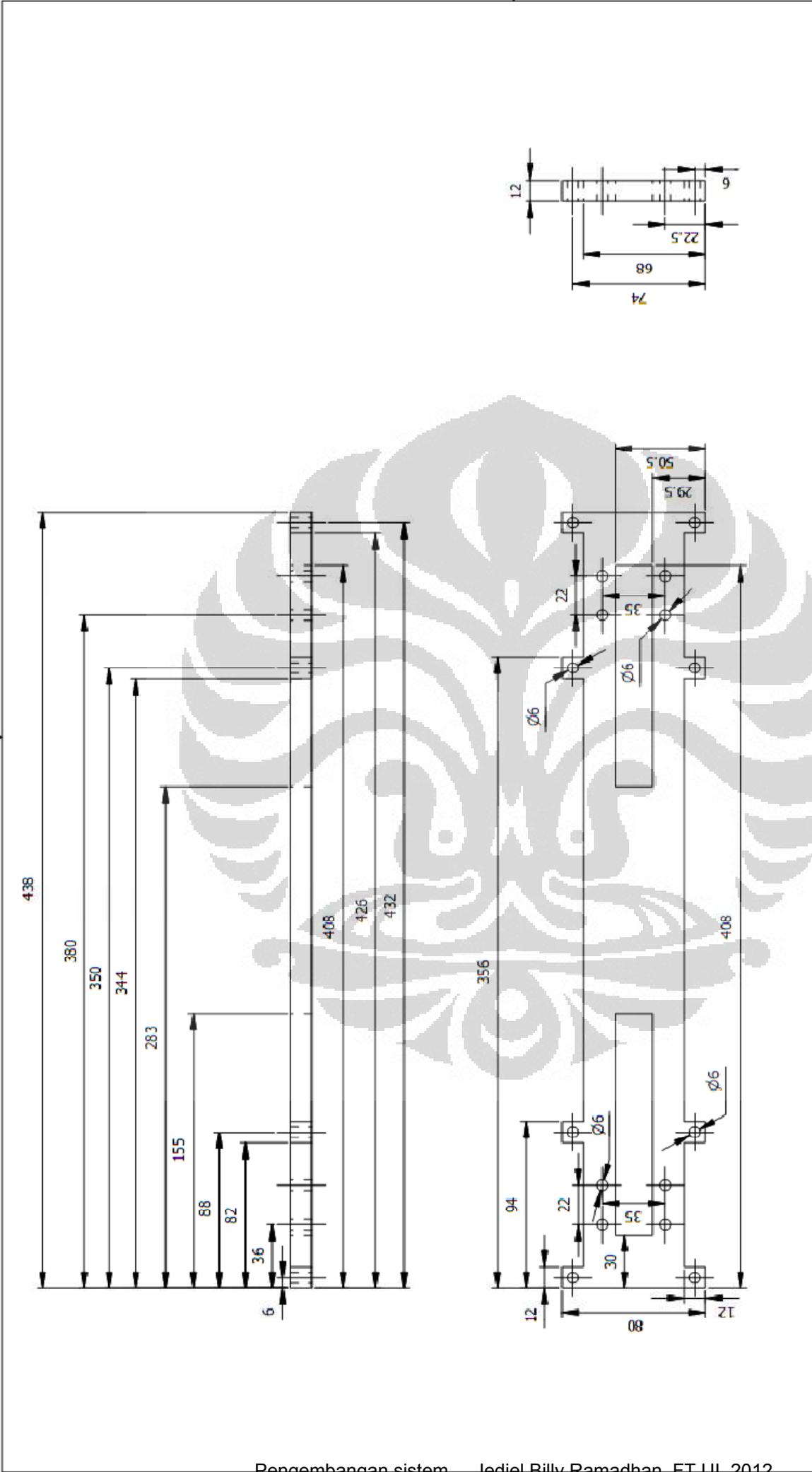
1	Dudukan Ballscrew Sumbu-y	Aluminium Dural	1
No	PART	BAHAN	JUMLAH
			PERINGATAN
			Skala : 1:1
			Digambar : Jediel B R
Satuan : mm	NPM : 0706267111		
Tanggal : 15-8-2011			Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng
DTM-FTUI	Dudukan Ballscrew Sumbu-y	V-016	A4



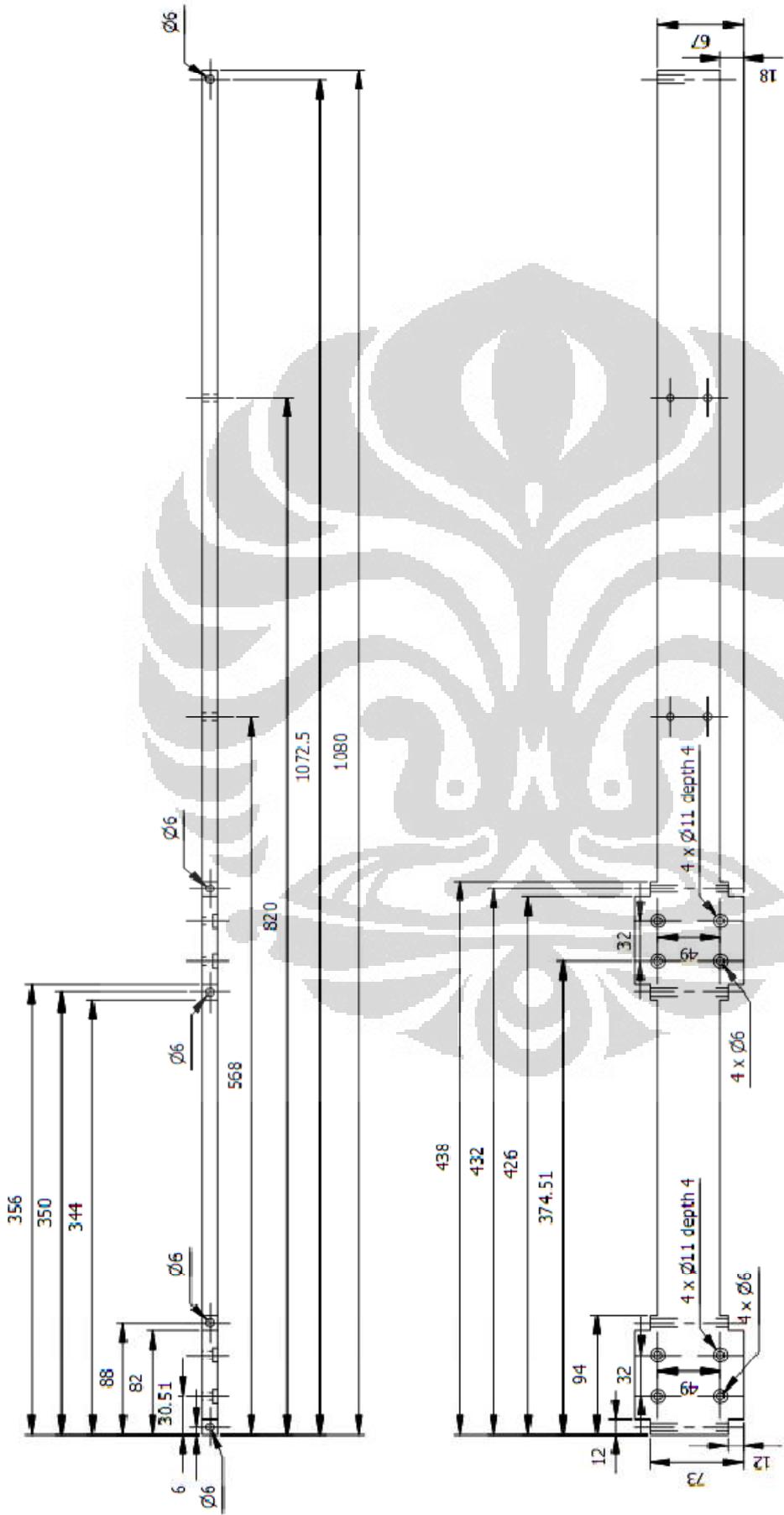
1	Limit Switch Sumbu-z Bawah	Aluminium Dural	1
NO	PART	BAHAN	JUMLAH
			PERINGATAN
			Skala : 1:1
			Digambar : Jediel B R
Satuan : mm	NPM : 0706267111		
Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng		
DTM-FTUI	Limit Switch Sumbu-z Bawah	V-022	A4



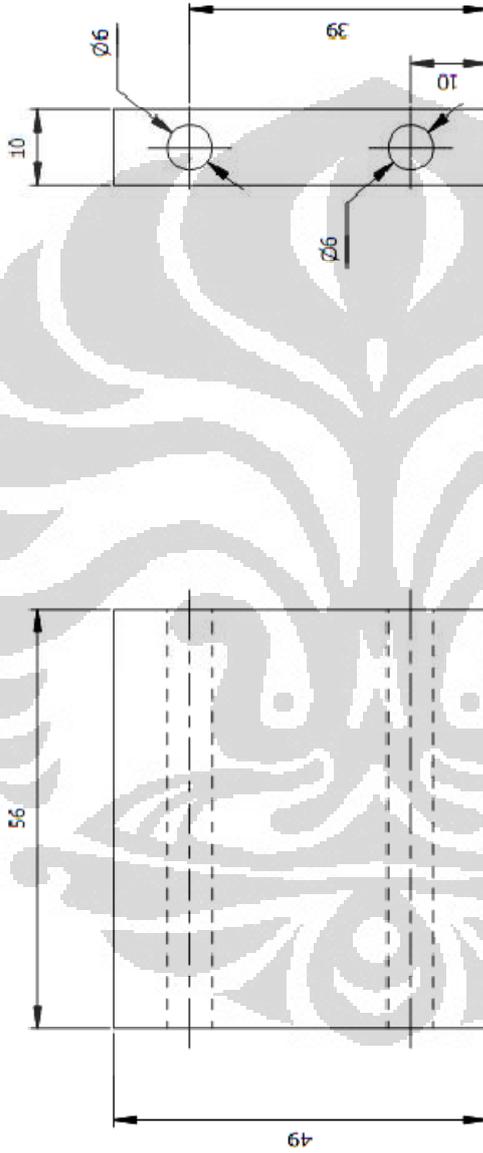
B		A	
16	M6x75		
15	Limit Switch		
14	Stepper Motor SLO-SYN		
13	Up X	Aluminium Dural	1
12	Up Samping	Aluminium Dural	2
11	Attic	Aluminium Dural	1
10	Poros Up-Putar	Stainless Steel	1
9	Ogura Brake		1
8	20-5B1-SSV-Rolled-Ballscrew		2
7	M6x85		4
6	M6x20		24
5	M6x95		8
4	Linear Guide Way		4
3	Pengunci 2 Tangan Sumbu-z	Aluminium Dural	2
2	Tangan Sumbu-z	Aluminium Dural	2
1	Pengunci Tangan Sumbu-z	Aluminium Dural	2
No PART		BAHAN	JUMLAH
Skala : 1:5		Digambar : Jediel B R	PERINGATAN
Satuan : mm		NPM : 0706267111	
Tanggal : 14-8-2011		Diperiksa : Dr. Ir. Gandjar K, M.Eng	
DTM-FTUI		FOUR AXIS	W-1A3



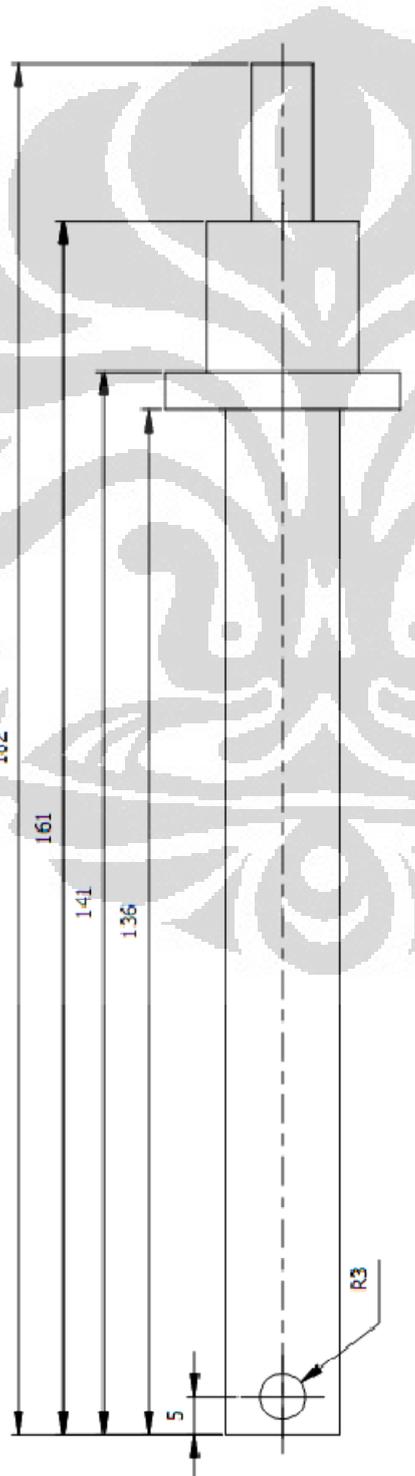
1	Pengunci Tangan Sumbu-z	Aluminium Dural	2
No	PART	BAHAN	
		PERINGATAN	
		Skala : 1:3	Digambar : Jediel B R
		Satuan : mm	NPM : 0706267111
Tanggal : 15-8-2011		Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	
DTM-FTUI		Pengunci Tangan Sumbu-z	W-01 A4



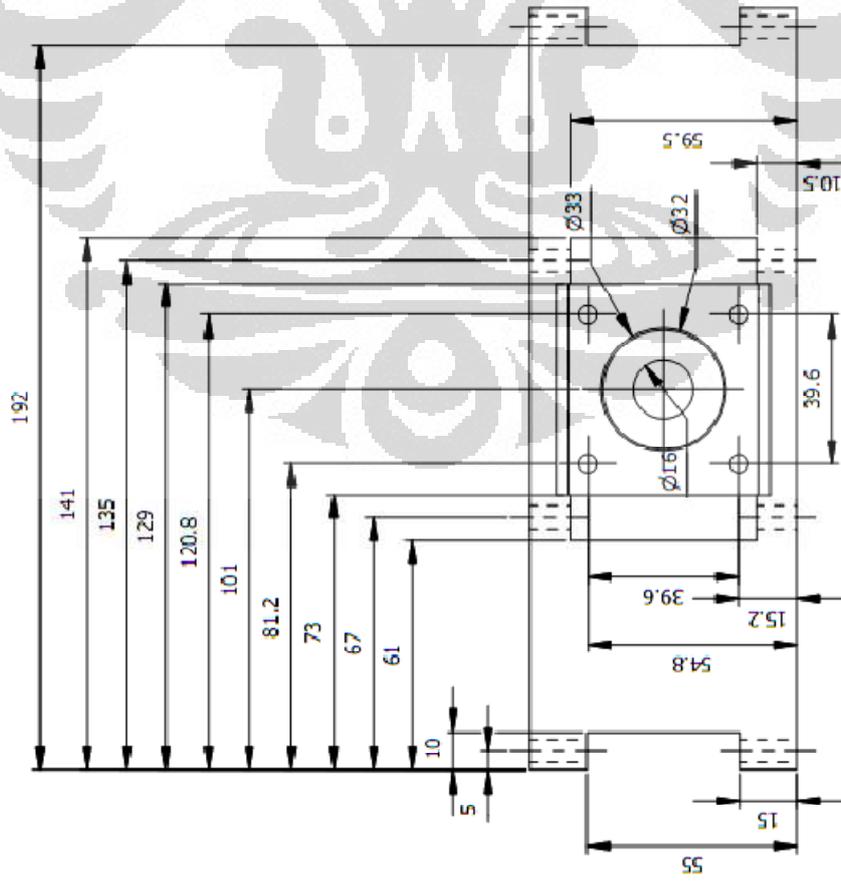
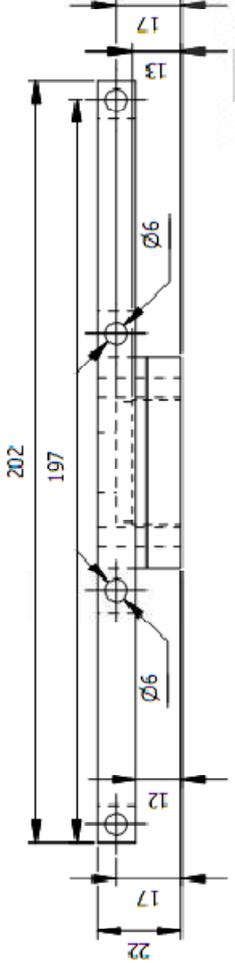
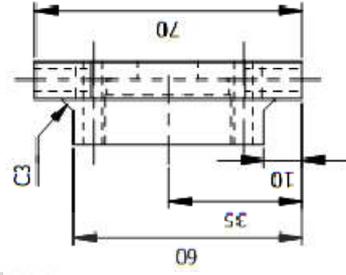
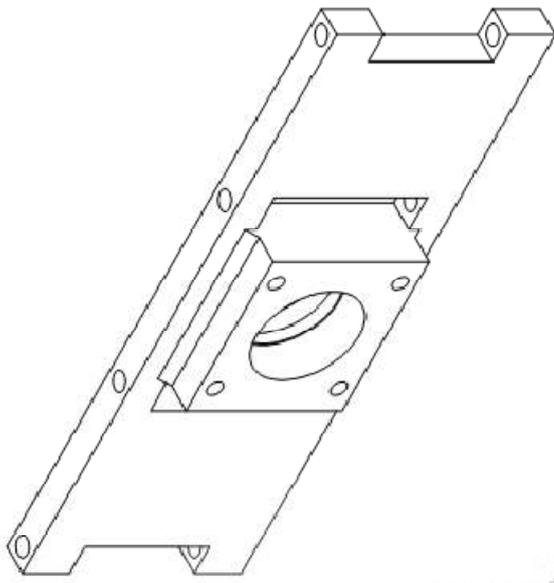
1	Tangan Sumbu-z	Aluminium Dural	2
No	PART	BAHAN	JUMLAH
			PERINGATAN
			Skala : 1:5
			Digambar : Jediel B R
Satuan : mm	NPM : 0706267111		
Tanggal : 15-8-2011			Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng
DTM-FTUI	Tangan Sumbu-z	W-02	A4



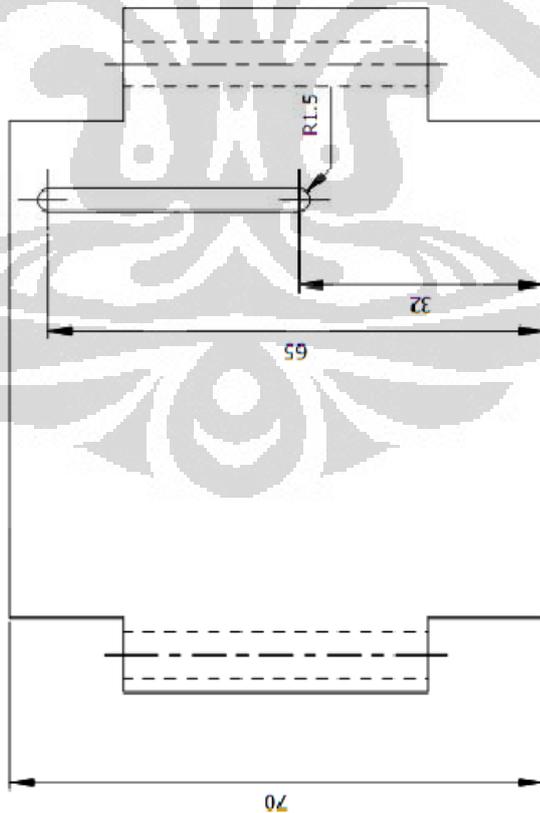
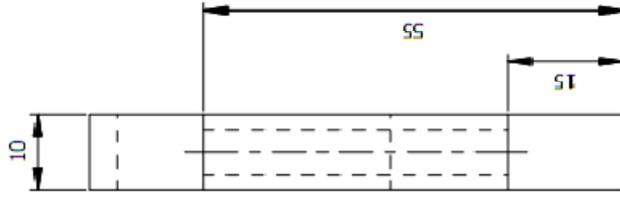
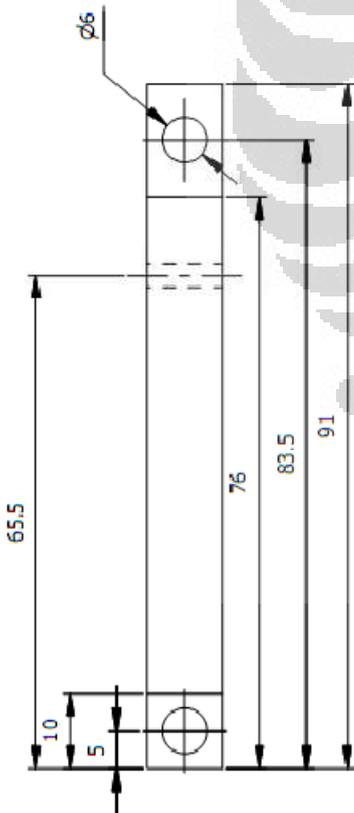
1	Pengunci 2 Tangan Sumbu-z	Aluminium Dural	2
No	PART	BAHAN	JUMLAH
	Skala : 1:1	Digambar : Jediel B R	PERINGATAN
	Satuan : mm	NPM : 0706267111	
	Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	
DTM-FTUI	Pengunci 2 Tangan Sumbu-z	W-03	A4



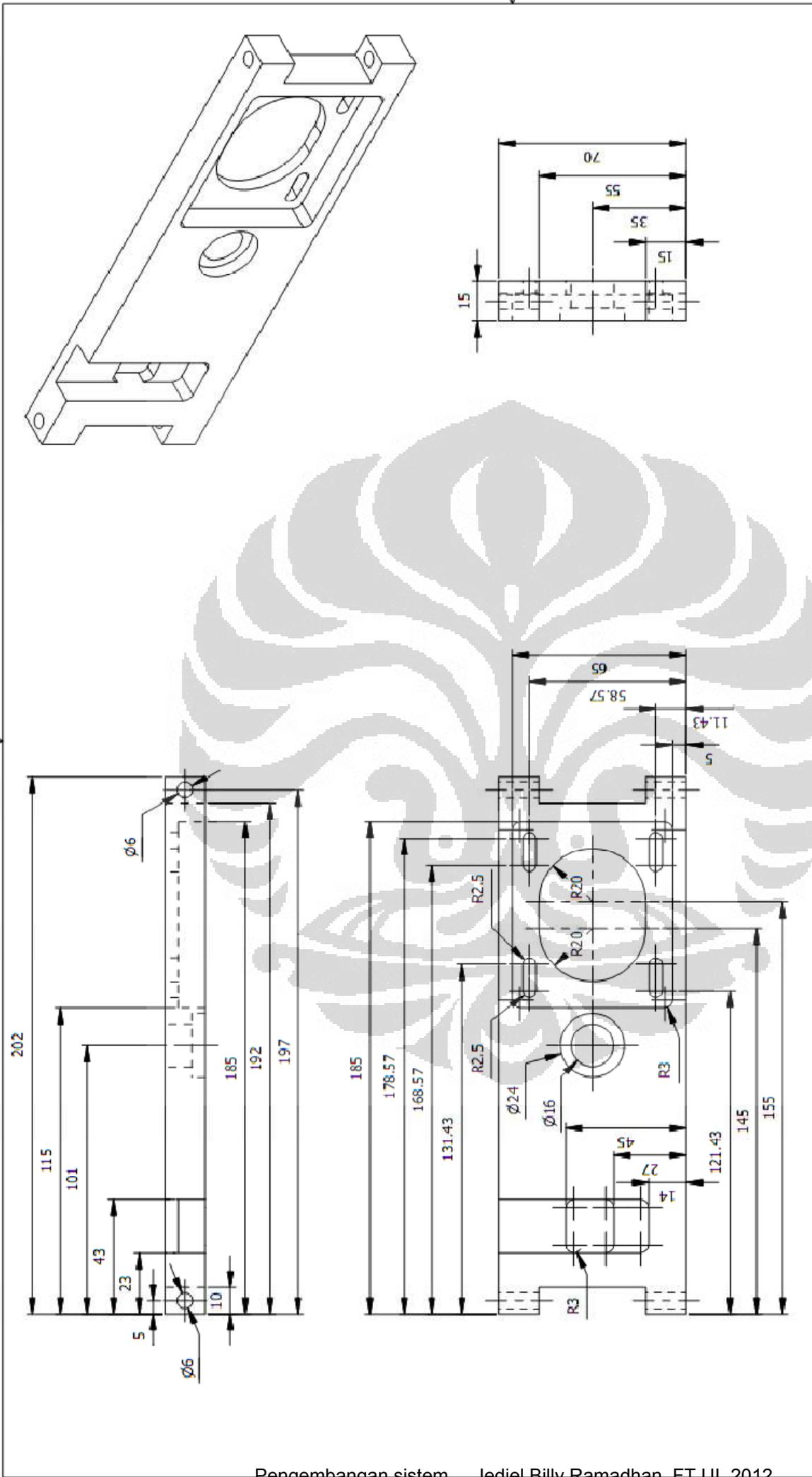
1	Poros Up Putar	Stainless Steel	1
No	PART	BAHAN	JUMLAH
Skala : 1:1	Digambar : Jediel B R	PERINGATAN	
Satuan : mm	NPM : 0706267111		
Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr. Ir. Gandjar K, M. Eng		
DTM-FTUI	Poros Up Putar	W-010	A4



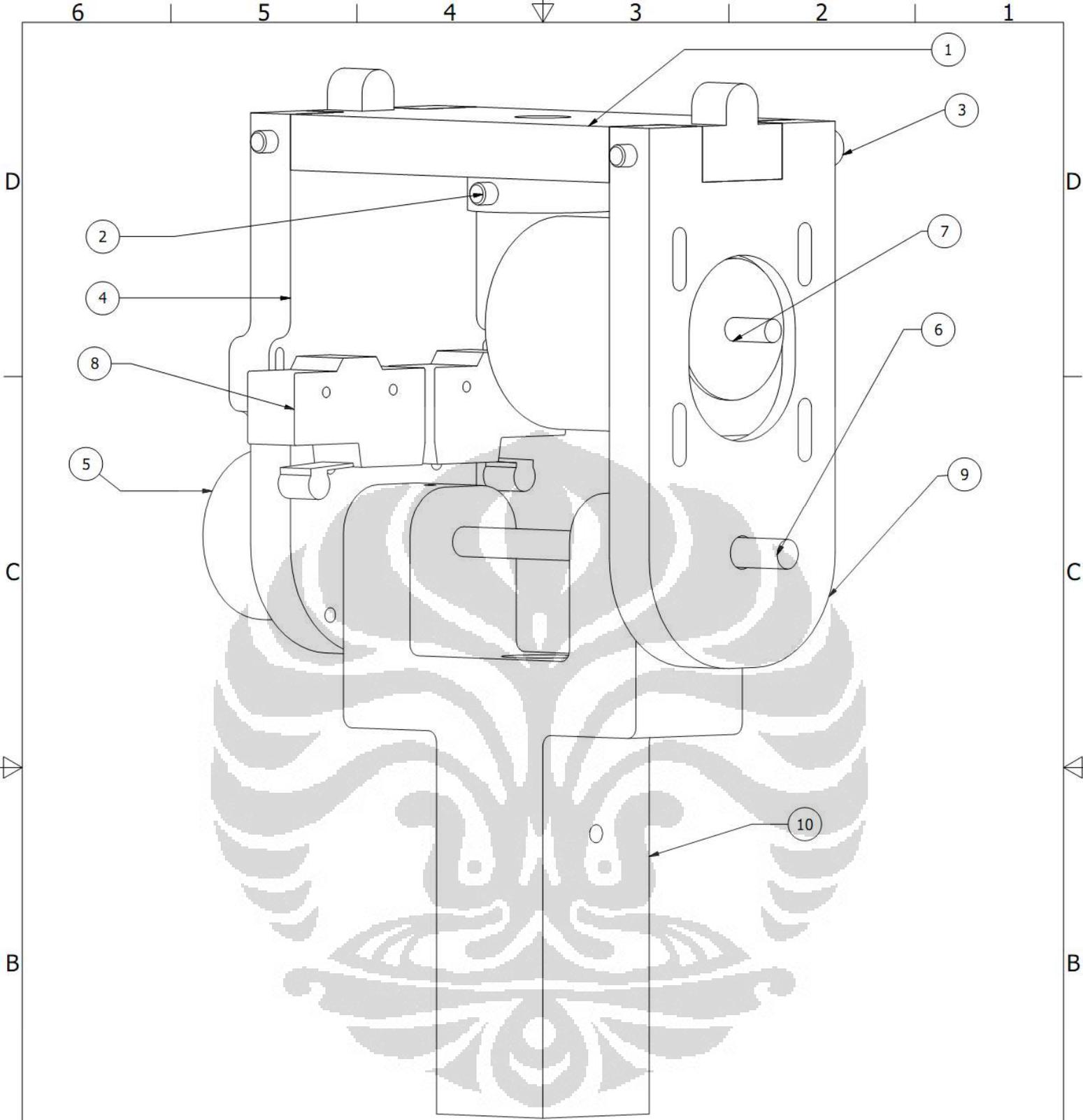
1	Attic	Aluminium Dural	1
NO	PART	BAHAN	JUMLAH
			PERINGATAN
			Skala : 1:2
			Satuan : mm
Tanggal : 15-8-2011		Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	W-011
DTM-FTUI		A4	



1	Up Samping	Aluminium Dural	2
NO	PART	BAHAN	JUMLAH
			PERINGATAN
			Skala : 1:1
			Digambar : Jediel B R
Satuan : mm	NPM : 0706267111		
Tanggal : 15-8-2011		Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	
DTM-FTUI		Up Samping	
		W-012 A4	

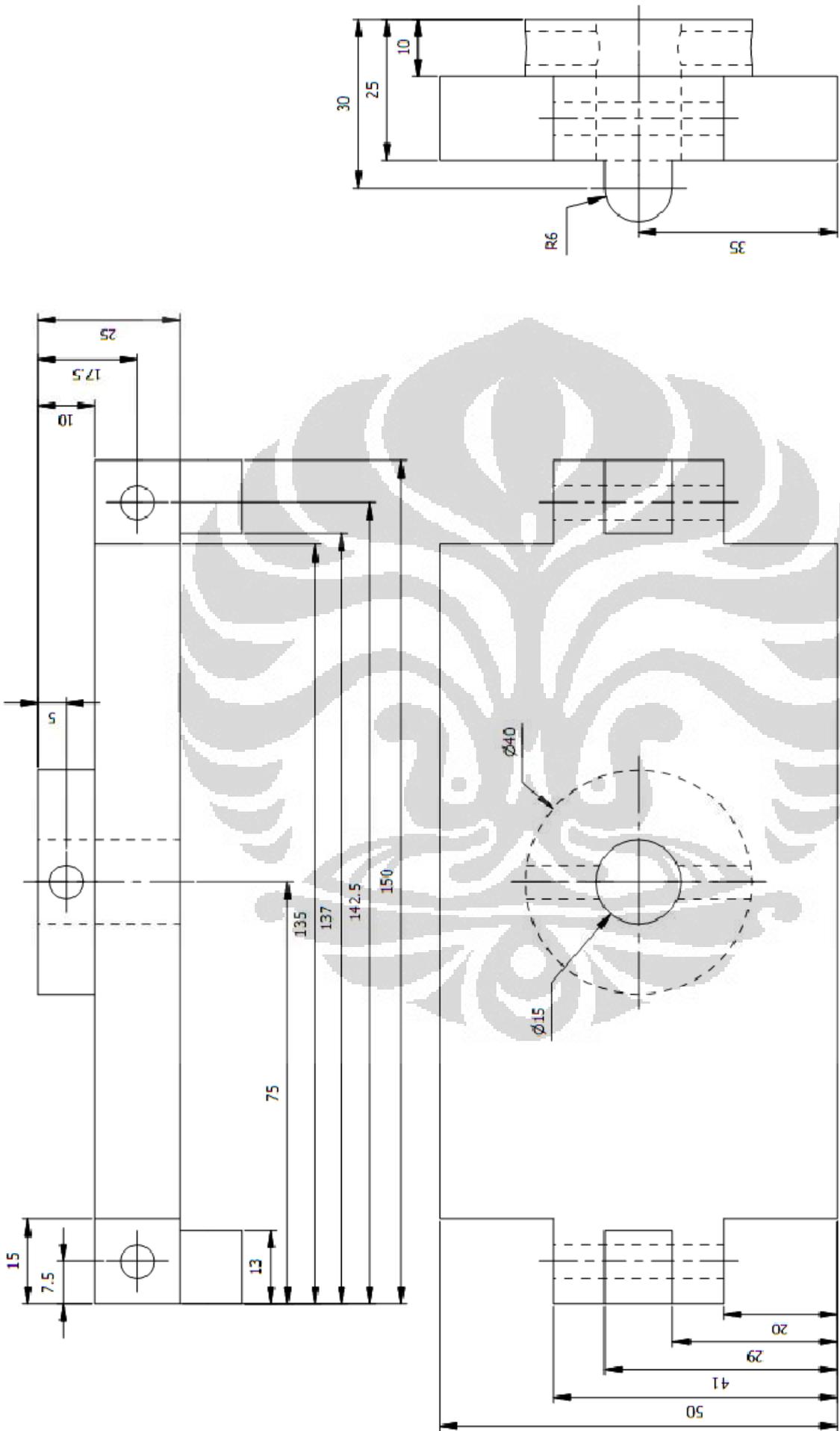


1	Up X	Aluminium Dural	1
No	PART	BAHAN	JUMLAH
Skala : 1:2	Digambar : Jediel B R	PERINGATAN	
Satuan : mm	NPM : 0706267111		
Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng		
DTM-FTUI		Up X	W-013 A4

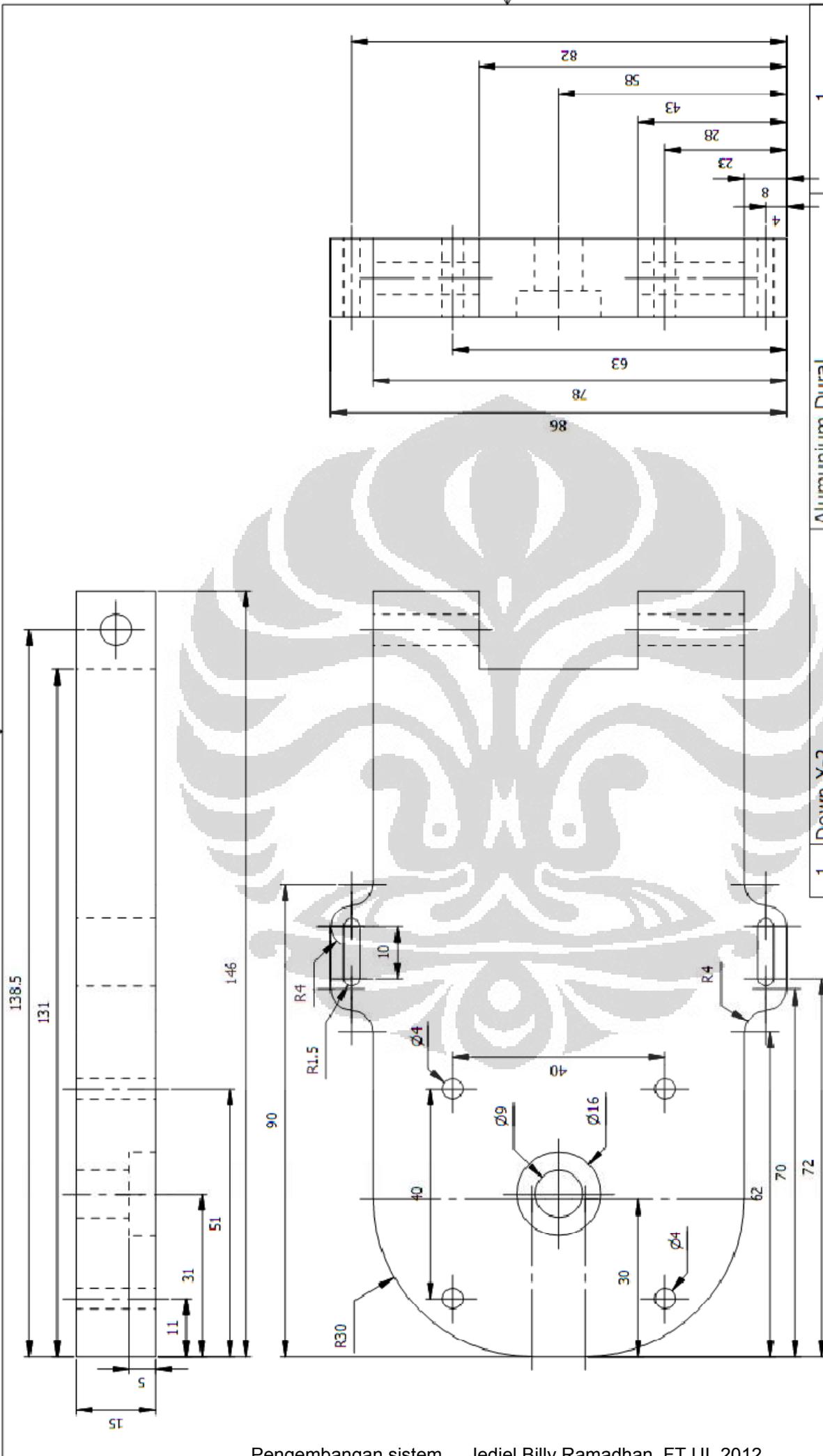


10	Arm TIG	Aluminium Dural	1
9	Down X-1	Aluminium Dural	1
8	Limit Switch		2
7	Stepper Motor SLO-SYN		1
6	Poros Up	Stainless Steel	1
5	Ogura Brake		1
4	Down X-2	Aluminium Dural	1
3	M6x75		2
2	M6x45		1
1	Up Putar	Aluminium Dural	1

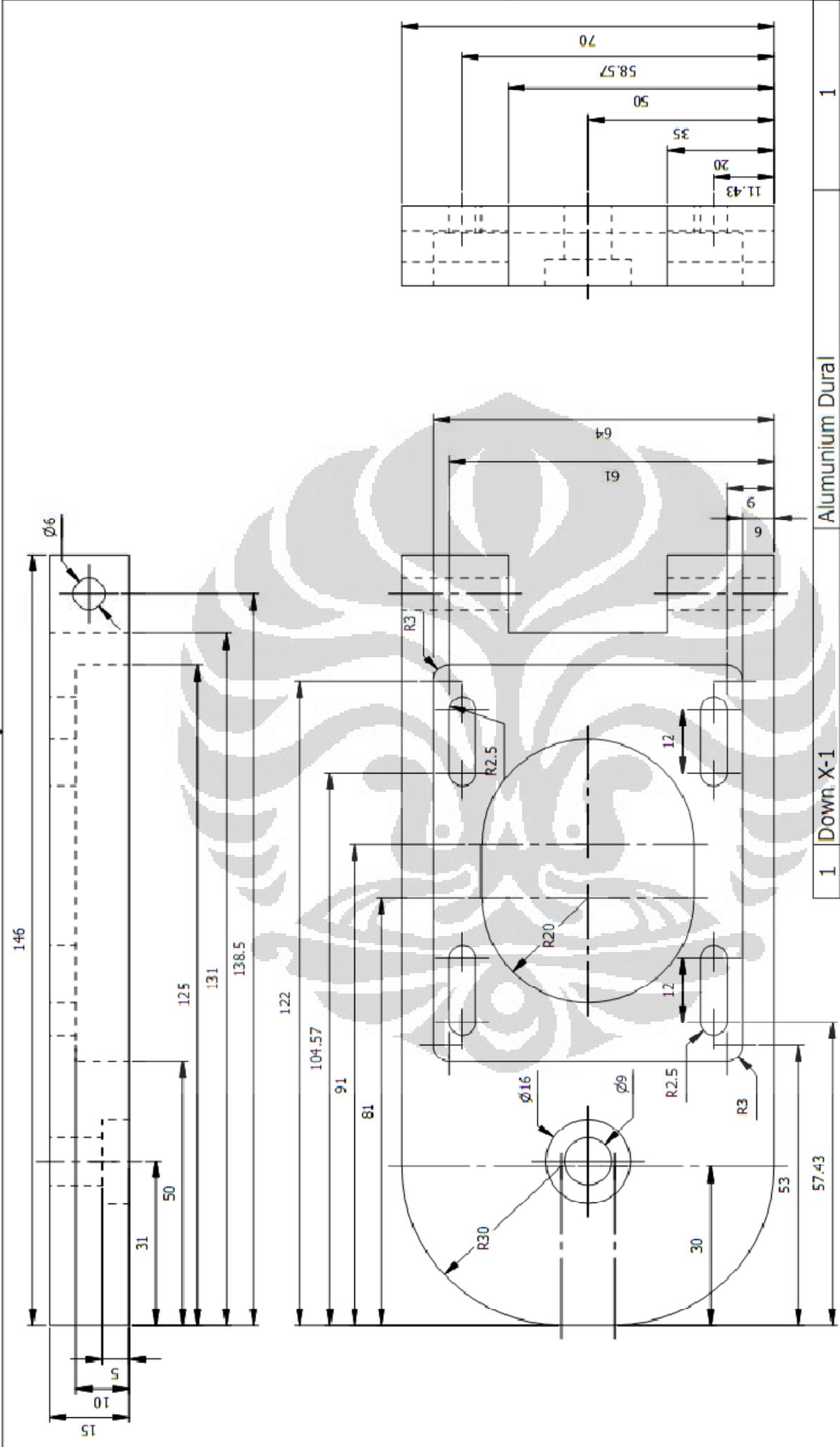
No	PART	BAHAN	JUMLAH
	Skala : 1:1	Digambar : Jediell B R	PERINGATAN
	Satuan : mm	NPM : 0706267111	
	Tanggal : 14-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M,Eng	



1	Up Putar	Aluminium Dural	1
No	PART	BAHAN	JUMLAH
	Skala : 1:1	Digambar : Jediel B R	PERINGATAN
	Satuan : mm	NPM : 0706267111	
	Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M,Eng	
DTM-FTUI	Up Putar	X-01	A4



1	Down X-2	Aluminium Dural	1
NO	PART	BAHAN	JUMLAH
			PERINGATAN
			Skala : 1:1
Satuan : mm	Digambar : Jediel B R	NPM : 0706267111	
Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng		
DTM-FTUI		Down X-2	X-04 A4



1	Down X-1	Aluminium Dural	1
NO	PART	BAHAN	JUMLAH
	Skala : 1:1	Digambar : Jediel B R	PERINGATAN
	Satuan : mm	NPM : 0706267111	
	Tanggal : 15-8-2011	Diperiksa : Dr.Ir. Gandjar K,M.Eng	
DTM-FTUI	Down X-1	X-09 A4	

