



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN SISTEM *HIGH SPEED FRICTION STIR
SPOT MICRO WELDING (FSSMW)* PADA PENGELASAN
PLAT TIPIS ALUMINIUM**

SKRIPSI

ALBERTUS AAN DIAN NUGROHO

0906604666

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN SISTEM *HIGH SPEED FRICTION STIR
SPOT MICRO WELDING* (FSSMW) PADA PENGELASAN
PLAT TIPIS ALUMUNIUM**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

ALBERTUS AAN DIAN NUGROHO

0906604666

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

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

PENGEMBANGAN SISTEM *HIGH SPEED FRICTION STIR SPOT MICRO WELDING* (FSSMW) PADA PENGELASAN PLAT TIPIS ALUMINIUM

yang dibuat untuk melengkapi sebagai persyaratan menjadi sarjana teknik pada Program Studi Teknik Mesin Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah di publikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Skripsi ini merupakan bagian yang dikerjakan bersama saudara Deden Rahayu (0906604716) dengan judul ANALISA PROSES PENGELASAN DENGAN METODE *FRICTION STIR WELDING* (FSW) PADA PLAT TIPIS ALUMINIUM.

Nama : Albertus Aan Dian Nugroho

NPM : 0906604666

Tanda Tangan : 

Tanggal : 2 Juli 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Albertus Aan Dian Nugroho

NPM : 0906604666

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Skripsi : PENGEMBANGAN SISTEM *HIGH SPEED FRICTION STIR SPOT MICRO WELDING* (FSSMW) PADA PENGELASAN PLAT TIPIS ALUMINIUM.

Telah berhasil dipertahankan di hadapan 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., M.Eng. (.....)

Penguji : Jos Istiyanto, ST., MT.,PhD. (.....)

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

Penguji : Yudan Whulanza, ST., M.Sc.,PhD. (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 2 Juli 2012

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Kuasa karena atas berkat rahmat dan karunia-Nya saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana teknik mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa dalam proses pembuatan hingga selesainya skripsi ini banyak pihak yang telah membantu dan menyemangati saya dalam pembuatan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada :

- 1) Istri dan seluruh keluarga tercinta yang selalu memberikan bantuan baik moril maupun materiil.
- 2) Dr. Ario Sunar Baskoro ST.,MT., M.Eng selaku pembimbing akademik sekaligus dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
- 3) Pak Suwarsono, Mas Ismail, Yogi Adrian, Agus S selaku rekan satu bimbingan yang saling menyemangati dan memberi masukan.
- 4) Teguh Santoso yang telah memberikan pengetahuan elektronik dalam pembuatan skripsi ini.
- 5) Deden Rahayu yang telah bekerja sama dengan baik selama pengerjaan skripsi ini.
- 6) Seluruh sahabat, rekan, dan keluarga besar Civitas Akademi Politeknik Manufaktur Astra atas dukungan yang telah memberikan kesempatan belajar dan motivasi yang lebih tinggi.
- 7) Teman-teman PPSE 2009 seperjuangan yang telah ikut berkontribusi dalam pembuatan skripsi ini.

Depok, 2 Juli 2012

Penulis

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

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

Nama : Albertus Aan Dian Nugroho
NPM : 0906604666
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 *HIGH SPEED FRICTION STIR SPOT MICRO WELDING* (FSSMW) PADA PENGELASAN PLAT TIPIS ALUMINIUM

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 : 2 Juli 2012

Yang menyatakan,



(Albertus Aan Dian Nugroho)

ABSTRAK

Nama : Albertus Aan Dian Nugroho
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : PENGEMBANGAN SISTEM *HIGH SPEED FRICTION STIR SPOT MICRO WELDING* (FSSMW) PADA PENGELASAN PLAT TIPIS ALUMINIUM.

Sebagai alternatif dari proses pengelasan konvensional untuk menyatukan logam tipis pada peralatan elektronik, peralatan medis dan mikro, metode *Friction Stir Spot Micro Welding* (FSSMW) dapat digunakan untuk membatasi kerusakan akibat panas yang berlebihan.

Dari beberapa literatur menunjukkan bahwa proses ini pada umumnya dilakukan dengan menggunakan mesin/alat khusus karena metode FSSMW ini memerlukan teknologi khusus, yakni membutuhkan kecepatan putaran *spindle* yang tinggi dan *tool* yang berdimensi kecil. Oleh karena itu Laboratorium Teknologi Manufaktur dan Otomasi DTM FTUI mencoba membuat *prototype* Mesin FSSMW untuk keperluan penelitian dengan skala laboratorium. Pembuatan prototipe mesin FSSMW meliputi konsep desain, simulasi dan analisa desain, pemilihan *spindle*, *linear shaft* dan *motor stepper* yang digunakan untuk menggerakkan mesin.

Pengujian pada prototipe mesin ini dibatasi untuk pengujian fungsi dari gerakan sumbu Y dan Z. Dan untuk mendapatkan hasil analisis yang lebih akurat, pada pengujian spesimen material plat Aluminium *type* AA1050-H16 ketebalan 400 μm maka digunakan mesin *Milling CNC*. Sedangkan untuk mendapatkan kecepatan putaran yang tinggi digunakan *mini grinder* (max. 35.000 rpm) yang dipasang ke *spindle* mesin *Milling CNC*.

Proses Pengelasan FSSMW menggunakan beberapa variasi parameter, diantaranya : Material *tool* menggunakan *High Speed Steel* (HSS) dengan *geometry tool pin* diameter (1 mm, 1.5 mm, dan 2 mm), Kecepatan putaran *spindle* (15.000 rpm, 20.000 rpm, dan 25.000 rpm), dan kecepatan tempuh (12 mm/menit, 18 mm/menit dan 24 mm/menit). Setelah proses pengelasan, dilakukan pengamatan visual dan pengujian tarik.

Hasil pengamatan visual menunjukkan adanya *flashing* dari perbedaan diameter *pin* pada *tool*. Semakin besar diameter *pin* mengakibatkan semakin besar pula *flashing* pada permukaan benda uji. Sedangkan pada hasil kekuatan uji tarik dianalisis dengan menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) dimana parameter yang berpengaruh adalah kecepatan tempuh. Semakin lambat kecepatan tempuhnya maka kekuatan tariknya akan semakin besar.

Kata kunci: *Friction Stir Spot Micro Welding* (FSSMW), *High Speed*, , uji tarik, plat tipis aluminium, *Response Surface Methodology* (RSM)

ABSTRACT

Name : Albertus Aan Dian Nugroho
Major : Mechanical Engineering
Title : DEVELOPMENT OF HIGH SPEED FRICTION
STIR SPOT MICRO WELDING (FSSMW) SYSTEM
IN WELDING OF ALUMINIUM THIN PLATE.

As an alternative to conventional soldering and welding in joining thin metals for electronic, medical and microdevices, friction stir welding may be utilized in order to limit the excessive heat damage.

From some of the literature suggests that this process is generally carried out using the machine / tool specifically for this FSSMW methods require special technology, which requires high spindle rotation speed and the small dimension tool. Therefore, Manufacturing Technology and Automation Laboratory DTM UI designed a prototype machine for FSSMW research at the laboratory scale. FSSMW prototyping machines include concept design, simulation and analysis of design, selection of spindle, linear shaft, and stepper motors used to drive the machine.

Tests on the prototype machine was limited to testing the function of Y and Z axis movement. And to obtain a more accurate analysis results, on the test specimen plate material type AA1050-H16 aluminum thickness of 400 μm was used CNC Milling machines. Meanwhile, to obtain a high rotation speed, mini grinder (max. 35 000 rpm) mounted to the spindle CNC Milling machine was used.

FSSMW welding process used some variation of parameters, including : tool material using the High Speed Steel (HSS) with a geometry tool pin diameter (1 mm, 1.5 mm and 2 mm), rotation speed spindle (15,000 rpm, 20,000 rpm, and 25,000 rpm) , and the travel speed (12 mm / min, 18 mm / min and 24 mm / min). After the welding process, visual observation and tensile testing was performed.

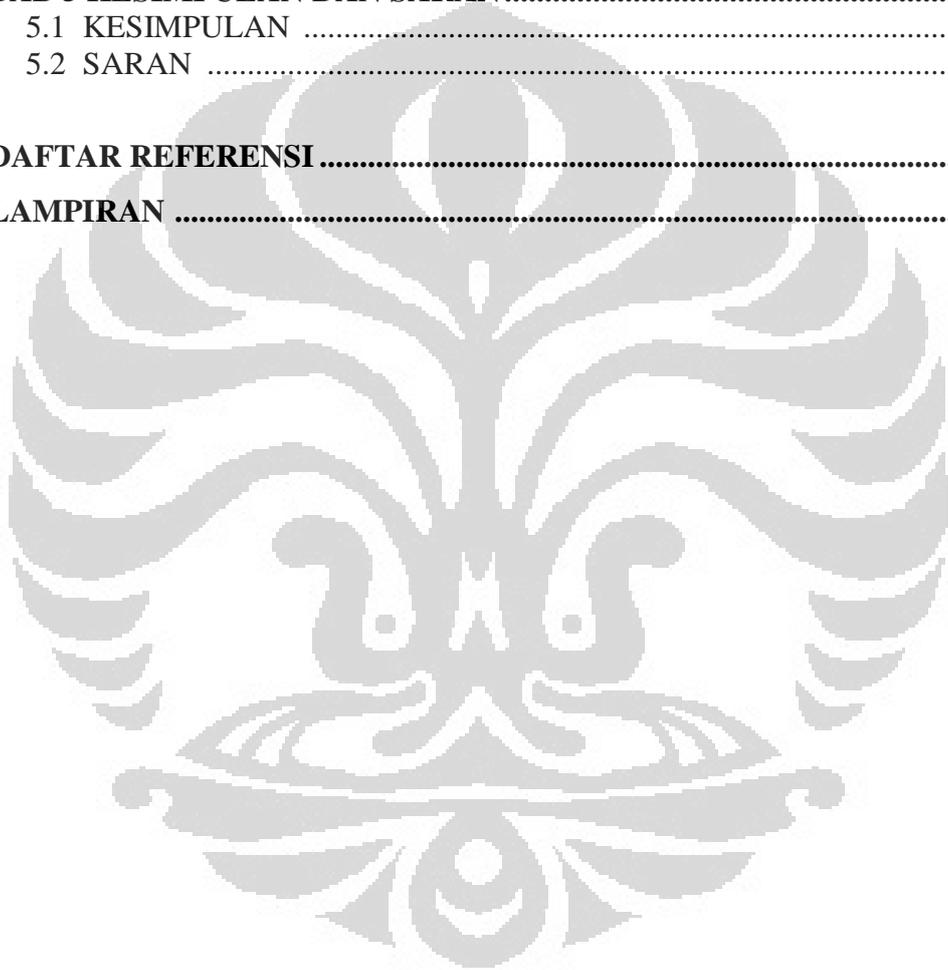
From visual observations it's shown the presence of different flashing pin on the tool diameter. The larger the diameter the greater the resulting pin flashing on the specimen surface. While the results of tensile strength tests that were analyzed by using Response Surface Methodology (RSM) shown that the travel speed influences the tensile strength. And the slower travel speed the higher tensile strength of welded material strength.

Keywords: Friction Stir Welding Micro Spot (FSSMW), High Speed, tensile test, a thin aluminum plate, Response Surface Methodology (RSM)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. LATAR BELAKANG.....	1
1.2. PERUMUSAN MASALAH.....	2
1.3. TUJUAN PENELITIAN.....	3
1.4. BATASAN MASALAH.....	3
1.5. METODOLOGI PENELITIAN.....	4
1.6. SISTEMATIKA PENULISAN.....	5
BAB 2 DASAR TEORI.....	7
2.1. FRICTION STIR SPOT WELDING.....	7
2.1.1 Prinsip Kerja.....	8
2.1.2 Parameter Pengelasan.....	9
2.1.3 Tool Geometry.....	9
2.1.4 Daerah terpengaruh pada pengelasan FSSW.....	11
2.2. UJI MEKANIK.....	12
2.3. MATERIAL ALUMINIUM.....	12
2.4. PERANCANGAN MEKANIKAL MESIN.....	17
2.4.1 Komponen Penggerak Mesin.....	18
2.4.2 Perancangan Mekanis.....	23
2.4.3 Kalkulasi Kontruksi.....	25
2.5. KRITERIA KEGAGALAN STATIK.....	28
2.5.1 Teori Kegagalan untuk Material Ulet.....	30
2.5.2 Teori Kegagalan untuk Material Getas.....	32
2.5.3 Pemilihan Kriteria Kegagalan.....	34
2.5.4 Faktor Keamanan.....	35
BAB 3 PEMBUATAN MESIN.....	37
3.1. DIAGRAM ALIR PEMBUATAN MESIN.....	37
3.2. KONSEP DESAIN.....	37
3.3. DETAIN DESAIN.....	38
3.4. ESTIMASI PERHITUNGAN MEKANIKA.....	39
3.5. STRESS ANALISIS.....	49
3.6. MANUFAKTUR.....	53

3.7. PENGUJIAN MESIN	58
3.8. SPESIFIKASI MESIN	60
BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA	61
4.1. BENDA UJI	61
4.2. TOOL GEOMETRY	63
4.3. PERSIAPAN PERALATAN	64
4.4. PROSES FSSMW	65
4.5. PENGAMBILAN DATA DAN ANALISIS.....	67
4.6. RESPONSE SURFACE METHODOLOGY (RSM).....	73
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	78
5.1 KESIMPULAN	78
5.2 SARAN	78
DAFTAR REFERENSI	80
LAMPIRAN	82



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema Proses FSW	7
Gambar 2.2	Skema Kerja dari FSSW	8
Gambar 2.3	Tiga Tahapan Proses FSSW.....	8
Gambar 2.4	Konfigurasi Desain Tool FSSW.....	10
Gambar 2.5	Contoh Desain Pin pada Tool FSW	11
Gambar 2.6	Daerah-daerah terpengaruh pada FSSW	12
Gambar 2.7	Aluminium casting dan tempa	13
Gambar 2.8	Metode pembentukan aluminium.....	14
Gambar 2.9	Pendekatan Concurrent Engineering.....	17
Gambar 2.10	Simulasi 3 sumbu pada tangan kanan	18
Gambar 2.11	Stepper Motor	18
Gambar 2.12	Ballscrew, linear shaft, dan bushing SC.....	18
Gambar 2.13	Stepper Motor	19
Gambar 2.14	Ballscrew.....	20
Gambar 2.15	Potongan Ballscrew.....	20
Gambar 2.16	Mini Grinder	23
Gambar 2.17	Kurva tegangan-regangan material ulet dan material getas ..	29
Gambar 2.18	Grafik representasi TEDM	30
Gambar 2.19	Grafik representasi TTGM	32
Gambar 2.20	Grafik representasi TTNM	33
Gambar 2.21	Bukti eksperimental kriteria-kriteria kegagalan	35
Gambar 3.1	Diagram alir pembuatan prototipe mesin FSSMW	37
Gambar 3.2	Konsep desain awal.....	38
Gambar 3.3	Pengembangan dari konsep desain menjadi detail desain.....	38
Gambar 3.4	Simulasi pembebanan sumbu Y	40
Gambar 3.5	Free body diagram sumbu Y	41
Gambar 3.6	Shear diagram sumbu Y	41
Gambar 3.7	Moment diagram sumbu Y.....	41
Gambar 3.8	Simulasi stress analisis pada sumbu Y.....	42
Gambar 3.9	Free body diagram sumbu X.....	43

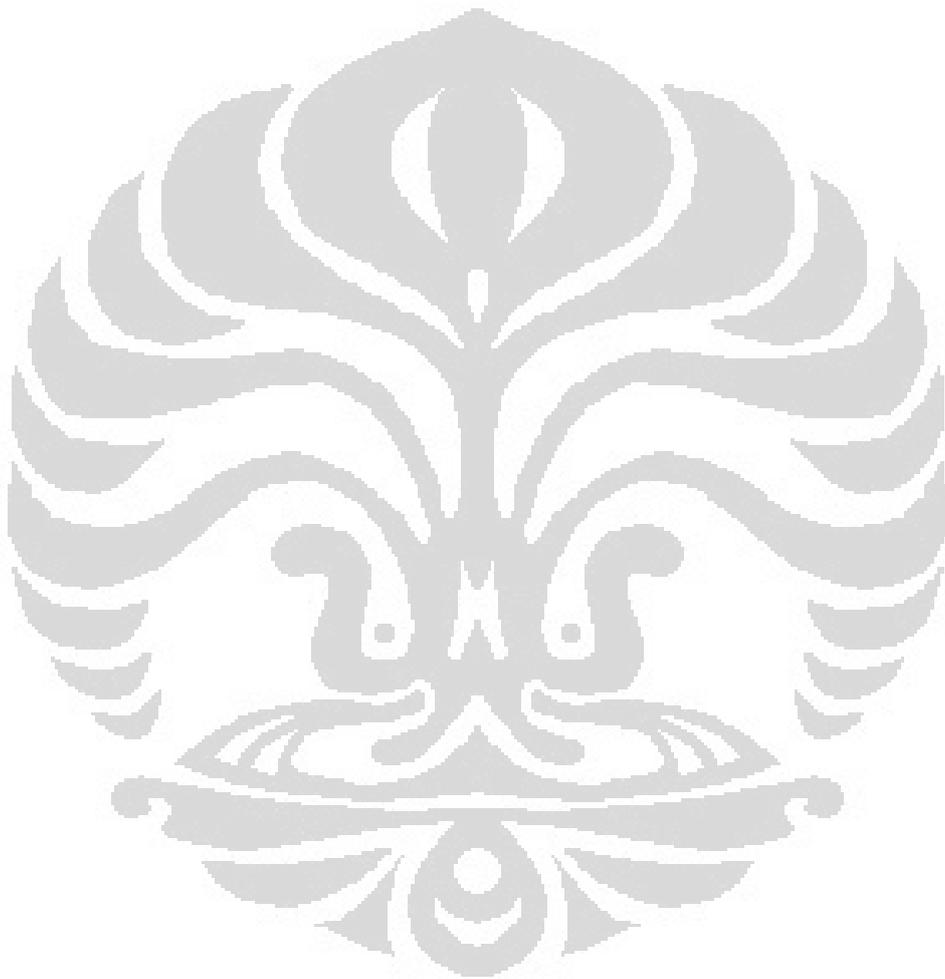
Gambar 3.10	Shear diagram sumbu X.....	43
Gambar 3.11	Moment diagram sumbu X.....	43
Gambar 3.12	Sebaran tegangan Von Mises pada sumbu Y.....	50
Gambar 3.13	Displacement pada sumbu Y.....	50
Gambar 3.14	Sebaran tegangan Von Mises pada sumbu X.....	51
Gambar 3.15	Displacement pada sumbu X.....	52
Gambar 3.16	Motor stepper 23LC051-025-8W-F8-1.....	54
Gambar 3.17	Konfigurasi pengkabelan Motor Stepper.....	54
Gambar 3.18	Besi profil kanal U.....	55
Gambar 3.19	Mini grinder.....	56
Gambar 3.20	Rangkaian elektikal penggerak sumbu mesin.....	58
Gambar 3.21	Pengujian kesejajaran <i>table</i>	58
Gambar 3.22	Arah pergerakan dial indicator.....	59
Gambar 3.23	Prototipe mesin FSSMW.....	60
Gambar 4.1	Diagram alir percobaan FSSMW.....	61
Gambar 4.2	Material AA 1050-H16 untuk uji metode FSSMW.....	63
Gambar 4.3	Variasi tool geometry.....	64
Gambar 4.4	Attachment mini grinder ke spindle mesin milling CNC.....	64
Gambar 4.5	Vibrotest 60.....	65
Gambar 4.6	Mini grinder terpasang pada mesin CNC.....	65
Gambar 4.7	Benda uji dicekam dengan jig.....	66
Gambar 4.8	Program CNC untuk proses FSSMW.....	66
Gambar 4.9	Proses sebelum dan setelah FSSMW.....	67
Gambar 4.10	Marking nomer pada spesimen.....	67
Gambar 4.11	Mesin uji tarik Galdabini.....	71
Gambar 4.12	Grafik hubungan antara diameter pin dan rpm.....	76
Gambar 4.13	Grafik hubungan antara diameter pin dan feeding.....	76
Gambar 4.14	Grafik hubungan antara diameter rpm dan feeding.....	77

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Contoh Material Tool FSSW dan aplikasinya	10
Tabel 2.2	Pembagian Aluminium berdasarkan komposisi kimia.....	15
Tabel 2.3	Pembagian Aluminium berdasarkan sifat mekanik	16
Tabel 2.4	Faktor Keamanan yang disarankan dalam perancangan	36
Tabel 3.1	Mechanical properties linear shaft S55C	40
Tabel 3.2	Spesifikasi bearing 6202	45
Tabel 3.3	Data teknis ballscrew dan nut	45
Tabel 3.4	Spesifikasi Motor Stepper	48
Tabel 3.5	Properties material shaft S55C	49
Tabel 3.6	Hasil stress analisis sumbu Y	51
Tabel 3.7	Hasil stress analisis sumbu X.....	52
Tabel 3.8	Tegangan yang terjadi pada sumbu Y dan sumbu X	53
Tabel 3.9	Ukuran besi profil kanal U.....	56
Tabel 3.10	Spesifikasi Mini Grinder.....	56
Tabel 3.11	Standard part prototipe mesin FSSMW	57
Tabel 3.12	Hasil pengujian kesejajaran.....	59
Tabel 3.13	Spesifikasi prototipe mesin FSSMW	60
Tabel 4.1	Chemical composition AA 1050.....	62
Tabel 4.2	Mechanical properties AA 1050	62
Tabel 4.3	Physical properties AA 1050	62
Tabel 4.4	Fabrication response for AA 1050	63
Tabel 4.5	Pengamatan visual hasil pengelasan FSSMW	68
Tabel 4.6	Matrik visual hasil pengelasan FSSMW	70
Tabel 4.7	Hasil uji tarik FSSMW pada material AA 1050	72
Tabel 4.8	Notasi dan level variabel bebas.....	73
Tabel 4.9	Desain matriks dari hasil percobaan	74

DAFTAR LAMPIRAN

GAMBAR TEKNIK PROTOTIPE MESIN FSSMW



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Perkembangan sistem mikro di komunitas industri sangatlah menakjubkan, dilihat dari kecepatan maupun keragaman penggunaannya. Tren dari sistem mikro yang lebih kecil dan canggih memerlukan alat mekanis yang diperkecil, berpresisi tinggi, dan berkualitas tinggi untuk proses penggabungan, perakitan, dan pengemasan piranti. Demikian juga dengan teknologi penyambungan dua material atau pengelasan sistem mikro. Pada hakekatnya proses las atau pengelasan adalah proses penyambungan dua material atau lebih, biasanya material logam yang menyebabkan peleburan di antara material yang disambungkan. Pada umumnya proses pengelasan dilakukan dengan cara mencairkan kedua material dan memberikan bahan tambah pada material yang mencair sehingga pada saat material mendingin akan menjadi sambungan permanen yang kuat.

Proses pengelasan sendiri ada beberapa macam yang sudah umum diterapkan baik di masyarakat luas ataupun di dunia industri diantaranya adalah Gas Welding (*Oxyacetylene*), *Arc welding* (GMAW, SMAW, TIG, MIG dll), *Resistance welding*, dan *Laser welding*. Proses, bahan, metode serta teknologi tersebut sudah sangat umum diterapkan dan sangat berkembang di Indonesia.

Metode *Friction Stir Spot Welding* (FSSW) merupakan turunan dari Metode *Friction Stir Welding* (FSW) yang diciptakan dan dikembangkan oleh The Welding Institute (TWI) pada tahun 1991, yang pada awal penelitiannya diaplikasikan untuk material aluminium paduan [1].

Sebagai alternatif, metode *Friction Stir Welding* ini dapat diterapkan pada aplikasi logam tipis untuk peralatan elektronik, peralatan medis dan mikro, dengan tujuan untuk membatasi kerusakan akibat panas yang berlebihan. Shelley melaporkan bahwa metode *Friction Stir Welding* memiliki potensi untuk diterapkan dalam penyegelan kemasan dalam industri elektronik dan fotonik, maupun untuk pengelasan *aluminium foil* untuk keperluan industri pesawat terbang [2]. Nagasaka dan Nisihara mengembangkan sebuah metode untuk *Micro Friction Stir Welding* yang dilakukan terhadap lembaran Magnesium AZ 31

dengan ketebalan sebesar 400 dan 600 μm , namun kekuatan mekanis dan karakteristikasi struktur mikro dari pengelasannya tidak dipublikasikan [3]. Scialpi dan kawan-kawan telah dengan sukses mengelas Aluminium Alloy 2023-T3 tipis dan lembaran 6082-T6 dengan ketebalan 800 μm . Mereka melaksanakan uji statik dan uji lelah pada hasil pengelasannya. Kekerasan mikro dan tekanan residual pada hasil pengelasan juga ikut diukur. Mekanisme kegagalan pada hasil pengelasan tidak dideskripsikan dalam pekerjaan mereka [4].

Dari beberapa literatur menunjukkan bahwa proses pengelasan dengan metode *Friction Stir Spot Micro Welding* (FSSMW) ini dilakukan dengan membuat mesin/alat khusus, karena metode FSSMW ini memerlukan teknologi yang khusus, yakni membutuhkan kecepatan putaran *spindle* yang tinggi dan *tool* yang berdimensi kecil [5]. Oleh karena itu, untuk melakukan penelitian lebih lanjut mengenai karakteristik dan parameter pada FSSMW dengan hasil yang efisien, waktu yang singkat serta biaya yang relatif murah Laboratorium Teknologi Manufaktur dan Otomasi DTM FTUI mencoba membuat prototipe mesin FSSMW untuk keperluan penelitian dengan skala laboratorium yang fungsinya untuk melakukan pengelasan dengan metode FSSMW yang nantinya mesin ini bisa terus digunakan untuk penelitian lebih lanjut mengenai metode FSSMW secara khusus, dan metode FSW pada umumnya.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Sistem FSSMW didesain dan dirancang sesuai dengan kebutuhan untuk pengelasan dengan metode FSSMW skala laboratorium. Perancangan tersebut dimulai dari desain mekanikal dan perhitungan *stress analisis*. Semua itu dilakukan secara bertahap dan dengan perhitungan analisis menyeluruh sehingga hasil akhirnya mesin tersebut dapat berfungsi sesuai dengan yang diinginkan dan menghasilkan sambungan yang sesuai standar.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini merupakan bagian dari proyek riset untuk mengembangkan sebuah prototipe sistem FSSMW yang tujuan akhirnya untuk melakukan pengelasan FSSMW pada logam.

Oleh karena itu, penelitian ini dikhususkan untuk pembuatan prototipe mesin FSSMW dari segi mekanika yang nantinya akan digabungkan dengan penelitian lanjutan untuk menguji penerapannya pada proses FSSMW pada plat tipis aluminium dan mengembangkan proses FSSMW pada material Aluminium AA 1050-H16 dimana pengembangan difokuskan pada perubahan parameter kecepatan putar, diameter dari pin/*probe tool* dan kecepatan tempuh, serta sejauh mana korelasi antara parameter tersebut dengan visual hasil pengelasan dan pengujian tarik (*flashing* dan uji tarik).

1.4 BATASAN MASALAH

Hal yang akan dibahas dalam laporan tugas akhir ini adalah pembuatan prototipe mesin FSSMW dengan asumsi dan batasan sebagai berikut :

1. Penelitian ini membahas mengenai desain dan perancangan mekanika mesin.
2. Untuk gerakan mesin, digunakan Sumbu-Z dan Sumbu-Y.
3. Getaran mesin diabaikan.
4. Proses FSSMW pada material Aluminium 1050-H16 ketebalan 400 μm dilakukan dengan menggunakan mesin *Milling* CNC Makino KE 55, sedangkan putaran *spindlenya* menggunakan *Mini Grinder* untuk mendapatkan kecepatan putaran yang tinggi.
5. Pada pengujian hasil dari mesin parameter yang digunakan adalah kecepatan putaran *spindle*, *geometry tool*, dan variasi kecepatan tempuh (*travel speed*).
6. Variasi putaran *spindle* pada *Mini Grinder* adalah : 15.000 rpm, 20.000 rpm, dan 25.000 rpm
7. Variasi kecepatan tempuh (*travel speed*) adalah 12 mm/menit, 18 mm/menit, dan 24 mm/menit.

8. Material tool yang digunakan adalah *High Speed Steel* (HSS) dengan diameter *shoulder* 3 mm, diameter *pin/probe* ada 3 variasi, yakni : diameter 1 mm, 1.5 mm dan 2 mm. Sedangkan panjang *probe* 500 μm .
9. Tipe sambungan las *lap joint* dengan kedalaman 600 μm .
10. Pencekaman benda kerja menggunakan *jig* pada ragam meja rata.

1.5 METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Study Literatur

Merupakan pengumpulan data-data, teori atau informasi yang berkaitan dengan materi bahasan yang berasal dari buku-buku, jurnal yang berasal dari dosen, internet maupun perpustakaan.

2. Perancangan Mesin

Perancangan mesin dalam hal ini adalah perancangan mekanika mesin. Desain dibantu menggunakan *software* CAD, yakni : Autodesk Inventor 2012. Perancangan mekanika mesin ini dibangun sesuai dengan prinsip *Design for Manufacturability, Assembly and Dissassembly* (DFMAD) sehingga memudahkan untuk proses *trouble-shooting*.

3. Manufaktur Mesin

Pada tahap ini *part-part* mekanika mesin yang sesuai dengan spesifikasi desain yang telah ditentukan sebelumnya pada tahapan perancangan, dikerjakan di *workshop* untuk dilakukan proses manufaktur, perakitan dan pengecatan.

4. Pengujian Fungsi Mesin

Pada tahap ini dilakukan pengujian sistem gerakan mesin dan putaran *spindle*. Dari hasil pengujian tersebut dilakukan evaluasi apakah mesin sudah dapat berfungsi sesuai dengan yang diinginkan atau belum. Jika belum sesuai, maka akan dilakukan analisa sampai mesin tersebut dapat berfungsi sesuai dengan kebutuhan.

5. Proses *Friction Stir Spot Micro Welding*

Proses ini dilakukan dengan cara bertahap, dari pengadaan material uji yang berupa lembaran plat tipis aluminium dan sistematis untuk setiap parameter

yang diinginkan, dari variasi bentuk tool, variasi kecepatan putaran mesin dan juga variasi kecepatan tempuh (*travel speed*).

6. Uji Tarik

Proses yang dilakukan pada tahap ini adalah diawali dengan persiapan sampel sesuai dengan standar yang diinginkan, kemudian dilanjutkan dengan pengujian tarik dari material hasil proses pengelasan FSSMW.

7. Analisis Data

Data yang telah diolah, kemudian dianalisis menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM). Dari analisis tersebut akan diperoleh kesimpulan terhadap proses pengujian.

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Penulisan laporan tugas akhir ini dibagi menjadi beberapa bab agar maksud dan tujuan yang ingin disampaikan dapat tercapai dengan baik.

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang yang melandasi penulisan skripsi, perumusan masalah, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika penulisan.

BAB 2 DASAR TEORI

Bab ini berisi tentang teori-teori yang mendasari penelitian ini. Dasar teori ini meliputi dasar teori *Friction Stir Welding* dan *Friction Stir Spot Welding*, *tool design*, material, serta proses perancangan mekanikal mesin. Dasar teori yang ada dikutip dari beberapa buku dan referensi lain yang mendukung dalam penulisan ini.

BAB 3 PEMBUATAN MESIN

Berisi tentang pembuatan mekanika dengan proses manufaktur serta kontrol berdasarkan cara kerja mesin yang diinginkan. Kemudian dilakukan pengujian terhadap *prototype* mesin *Friction Stir Spot Micro Welding* yang telah dibuat.

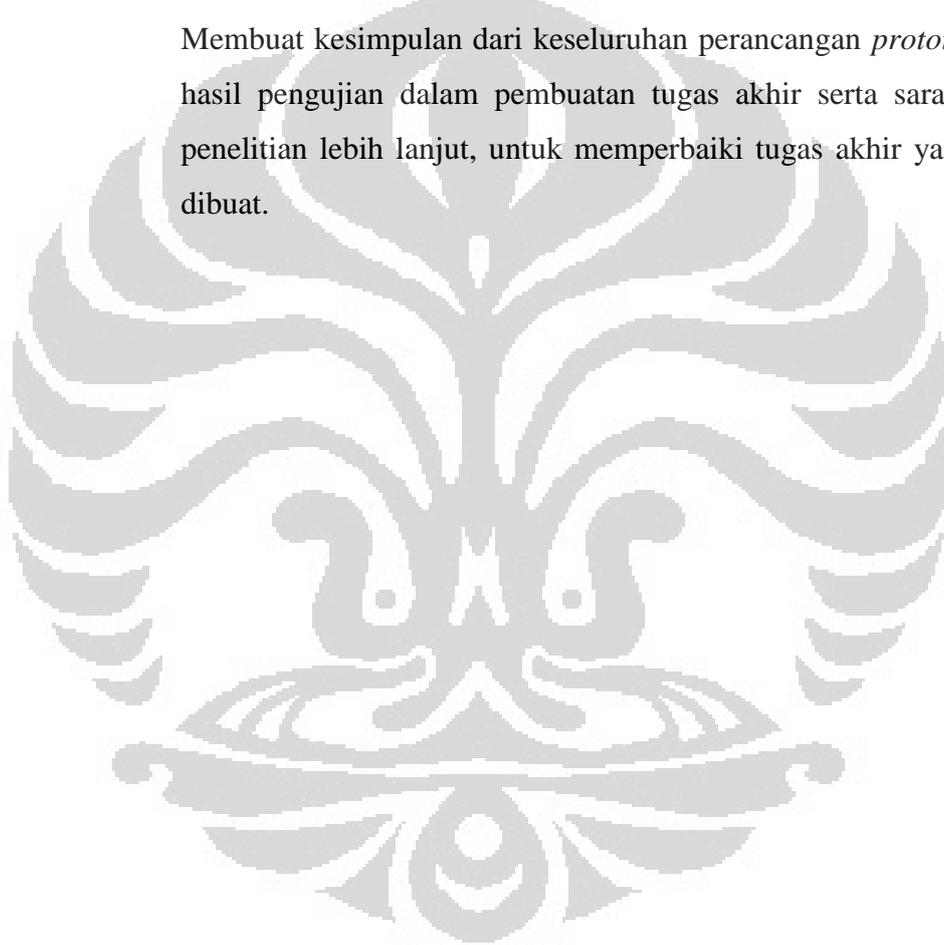
BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

Bab ini menjelaskan tentang alat pengujian yang digunakan, metode persiapan, metode pengambilan data dan metode pengujian yang dilakukan.

Sedangkan analisis data berisikan data-data dan analisis dari hasil yang diperoleh dari proses pengambilan data dan pengujian tersebut.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Membuat kesimpulan dari keseluruhan perancangan *prototype* dan hasil pengujian dalam pembuatan tugas akhir serta saran untuk penelitian lebih lanjut, untuk memperbaiki tugas akhir yang telah dibuat.

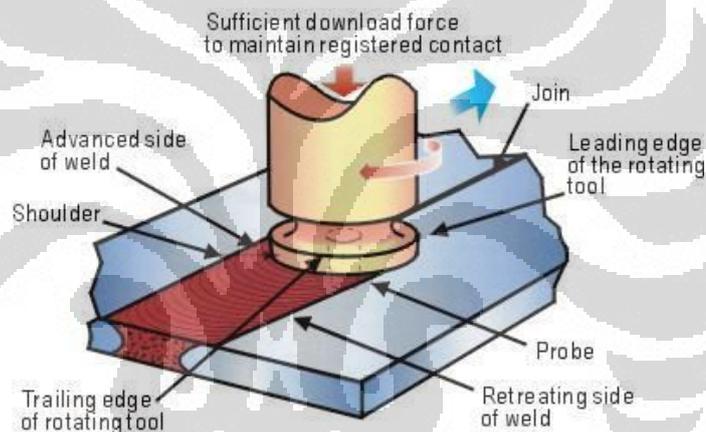


BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 FRICTION STIR SPOT WELDING

Friction Stir Spot Welding (FSSW) merupakan turunan dari *Friction Stir Welding* (FSW), salah satu teknik pengelasan baru yang diciptakan pada tahun 1991 oleh The Welding Institute (TWI), Cambridge, Inggris [1].

FSW termasuk *unconsumable solid-state joining proces* yang berarti pengelasan tanpa bahan tambah dan suhu kerjanya tidak melewati titik lebur benda kerja dan digunakan untuk aplikasi dimana kebutuhan akan perubahan karakteristik dasar dari benda kerja bisa diminimalisir sekecil mungkin.

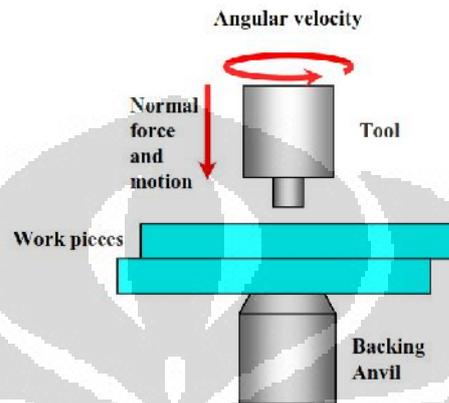


Gambar 2.1 Skema proses FSW [1]

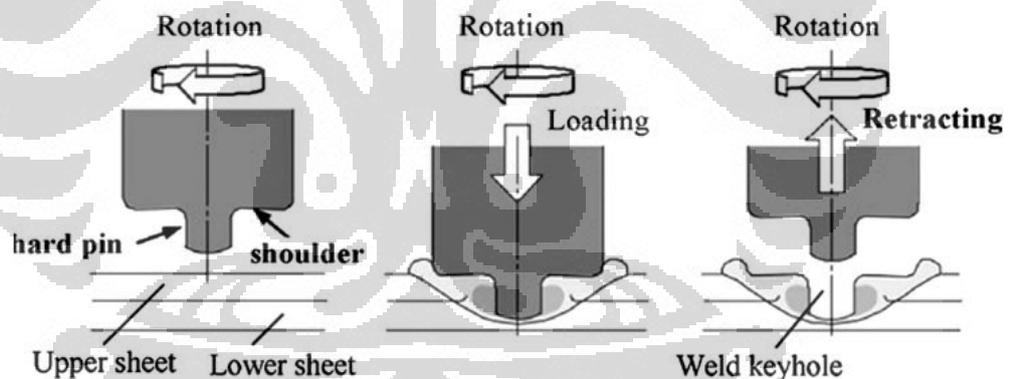
Proses FSW ini dapat menyambung sisi dua buah lempengan yang sejajar, dengan perkakas berbentuk silinder yang ujungnya terdiri dari bahu (*shoulder*) untuk menekan bagian las, dan *pin/probe* untuk mengaduk bagian sambungan las. Perkakas diputar dengan kecepatan tertentu yang konstan dengan *pin* diposisikan antara bagian yang akan disambung. Gesekan antara *pin* dan logam dapat mencapai temperatur yang tinggi, sehingga logam disekelilingnya menjadi plastis dan proses adukan akan terjadi. Bahu (*shoulder*) perkakas las ditekan pada permukaan bagian las dan bergerak ke arah bagian sambungan lain dengan kecepatan tertentu [1].

2.1.1 Prinsip Kerja

Prinsip kerja dari FSSW sama dengan FSW, kecuali pada bagian dari *tool* yang bergerak sepanjang jahitan las (*weld seam*). Pada FSSW *tool* hanya bergerak menusuk material yang akan disambung. Untuk jelasnya bisa melihat Gambar 2.2 dan 2.3 [6].



Gambar 2.2 : Skema kerja dari FSSW [6]



Gambar 2.3 Tiga tahapan proses FSSW [6]

Tool berputar dan menekan material kemudian *shoulder* terkena permukaan benda kerja sampai *probe/pin* berada di dalam permukaan benda kerja. Pada posisi ini benda kerja berada dalam kondisi plastis karena pemanasan akibat dari sentuhan gesekan antara *shoulder* dengan permukaan benda kerja (terjadi proses penyatuan material). Proses selesai, *tool* diangkat dengan putaran yang sama. Setelah terangkat akan membentuk “hole” pada benda kerja [6].

2.1.2 Parameter Pengelasan

Welding parameter dari FSSW meliputi kecepatan putar (*rotational speed*), *travel speed*, gaya normal (*normal force*), *lateral force*, kemiringan tool, kedalaman *shoulder* (*shoulder plunge*), kedalaman penetrasi *probe* (*butt joint*), kedalaman penetrasi *probe* pada benda terbawah (*lap joint*), dll. *Welding* parameter biasanya dipublikasi di lingkungan yang terbatas, sehingga sedikit sekali yang dipublikasi untuk umum. Walaupun dipublikasi biasanya ada beberapa parameter yang tidak dipublikasikan dan hanya sedikit yang disebutkan seperti kedalaman penetrasi *probe*, *shoulder plunge*, dan kemiringan. Parameter yang umumnya tidak dipublikasikan antara lain adalah *rotational speed*, *travel speed*, *tool design* dll. Secara umum *travel speed* dan *rotational* yang lambat biasanya digunakan untuk material yang keras atau material yang tipis. Meningkatkan *rotational speed* atau menurunkan *travel speed* cenderung akan meningkatkan masukan panas dan temperature pengelasan. Bagaimanapun, peningkatan atau penurunan parameter *rotational speed* dan *travel speed* yang drastis bisa menimbulkan efek merugikan. Walaupun begitu penelitian dalam pengembangan *travel speed* terus berkembang untuk alasan ekonomis.

2.1.3 Tool Geometry

Hal pertama yang harus diperhatikan pada saat merancang *tool* yang akan digunakan adalah pemilihan material yang akan digunakan, beberapa karakter material yang harus dipenuhi oleh sebuah *tool* adalah [7] :

1. Memiliki kekuatan yang baik di suhu ruang dan di suhu tinggi.
2. Stabilitas material tetap terjaga pada saat suhu tinggi
3. Tahan gesek dan aus
4. Material yang digunakan tidak bereaksi dengan benda kerja
5. *Thermal expansion* rendah
6. Mampu mesin yang baik
7. Homogen secara *microstructure* dan masa jenis
8. Tersedia luas di pasaran.

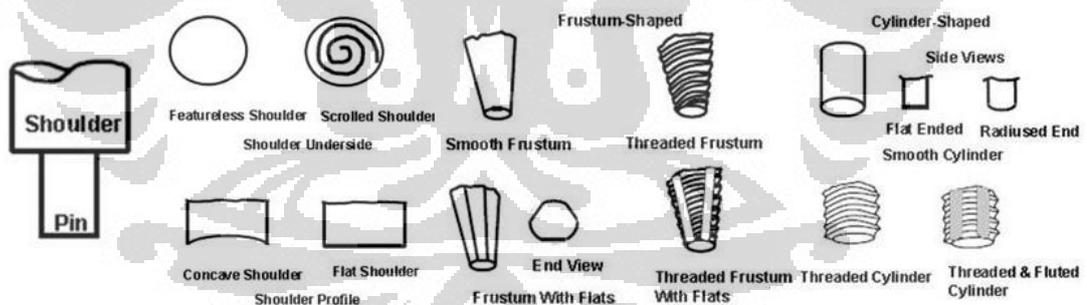
Tabel 2.1 Contoh Material Tool FSSW dan aplikasinya [7]

Alloy	Thickness		Tool material
	mm	in.	
Aluminum alloys	<12	<0.5	Tool steel, WC-Co
	<26	<1.02	MP159
Magnesium alloys	<6	<0.24	Tool steel, WC
Copper and copper alloys	<50	<2.0	Nickel alloys, PCBN(a), tungsten alloys
	<11	<0.4	Tool steel
Titanium alloys	<6	<0.24	Tungsten alloys
Stainless steels	<6	<0.24	PCBN, tungsten alloys
Low-alloy steel	<10	<0.4	WC, PCBN
Nickel alloys	<6	<0.24	PCBN

(a) PCBN, polycrystalline cubic boron nitride

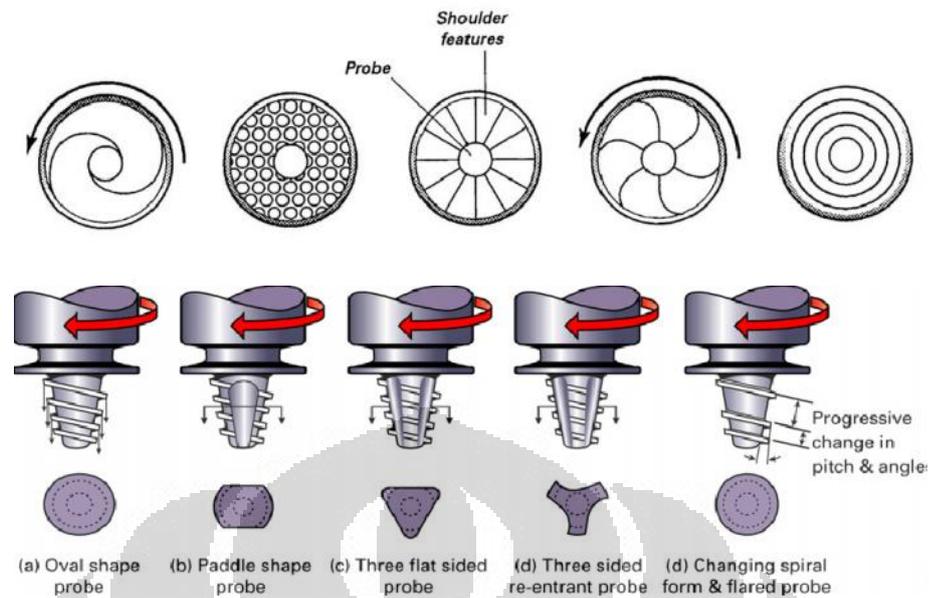
Hal yang kedua adalah bentuk dari *shoulder* dan *pin* dari *tool*, dua bagian utama dari sebuah *tool* yang digunakan dalam FSSW adalah :

Shoulder, bagian ini adalah bagian yang membangun panas dengan gesekan yang dilakukannya terhadap benda kerja, bagian ini juga yang menjadi penahan material panas yang ada di bawahnya. Disamping itu bagian ini pun yang memberikan gaya *vertikal* ke arah benda kerja yang menjaga kondisi contact tool dengan benda kerja [7].



Gambar 2.4 Konfigurasi Desain Tool FSSW [1]

Pin/ Nib/Probe, adalah bagian yang melakukan penetrasi ke dalam benda kerja, dimana bagian dari *tool* ini adalah bagian yang mengaduk material atau mengalirkan material yang sudah melunak akibat panas yang dihasilkan *shoulder*, sehingga dapat menciptakan suatu sambungan antara dua material.



Gambar 2.5 Contoh Desain Pin pada Tool FSSW [9]

Yang selanjutnya adalah ukuran dari *tool*, *diameter shoulder*, *diameter pin*, panjang *pin* dan panjang *tool* secara keseluruhan diatur sesuai dengan proses yang diinginkan yaitu ketebalan benda kerja, kemiringan tool pada saat proses, kekuatan sambungan dan *clearence* antar benda kerja.

2.1.4 Daerah Terpengaruh pada pengelasan FSSW

Daerah-daerah yang terpengaruh pada FSSW adalah sebagai berikut [7] :

1. *Base Metal*

Base metal adalah daerah yang tidak terpengaruh panas dari pengelasan dan tidak merubah *microstructure* maupun *mechanical properties*.

2. *Heat Affected Zone (HAZ)*

HAZ adalah zona terpengaruh panas, zona ini umumnya terjadi pada semua jenis pengelasan. Daerah ini terkena pengaruh *microstructure* maupun *mechanical properties*.

3. *Thermo Mechanical Affected Zone (TMAZ)*

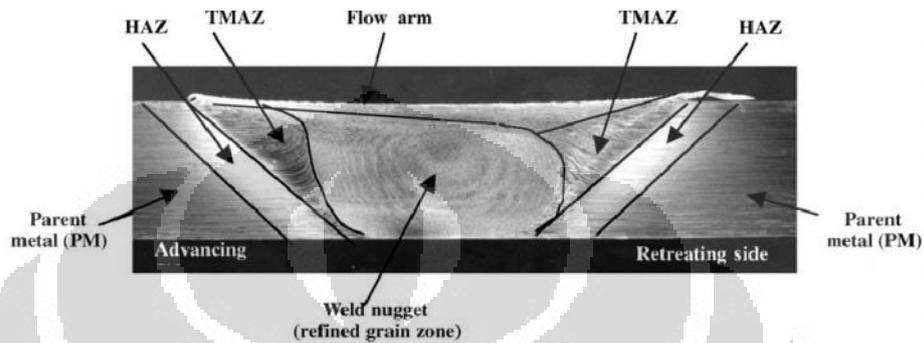
TMAZ adalah zona terpengaruh adukan dari tool dan terpengaruh panas dari gesekan *tool* dengan material pada daerah las-lasan.

4. *Flow Arm Zone*

Adalah zona yang terseret adukan oleh *shoulder* yang menjadi batas pengelasan dari FSW.

5. *Stir Zone / Weld Nugget Zone*

Adalah zona dimana terjadi percampuran atau pengadukan untuk menggabungkan dua material menjadi satu yang disebut juga zona aduk. Zona ini terpengaruh adukan dari pin.



Gambar 2.6 Daerah-daerah terpengaruh pada FSSW [7]

2.2 UJI MEKANIK

Pengujian hasil pengelasan FSSW bisa melalui pengujian rusak benda uji (*destructive test*) dan pengujian tanpa merusak benda uji (*undestructive test*). Sambungan *butt* bisa diuji dengan visual, uji tarik, uji bengkok (*bend*), *X-ray*, struktur mikro dll. Uji tarik dan bengkok bisa dilakukan secara *transverse* atau *longitudinal* bergantung pada kebutuhan aplikasinya. Benda uji biasanya diambil dari potongan benda kerja hasil pengelasan. Uji tegangan geser (*ultimate shear strength*) dilakukan dengan *single-shear testing*, menggunakan specimen yang ditakik pada bagian sampingnya untuk memfokuskan fracture yang terjadi. Uji ini cukup ideal untuk mengetahui data spesifik region pengelasan. Uji bengkok (*bend test*) digunakan untuk mengetahui data kualitatif dari keuletan sambungan longitudinal dan *transverse*.

2.3 MATERIAL ALUMINIUM

Alumunium paduan adalah paduan material dimana Alumunium menjadi bahan utamanya sedangkan pepadu yang biasanya sering digunakan adalah Tembaga(Cu), Silikon(Si), Magnesium(Mg), Mangan (Mn) dan Zinc(Zn).

Alumunium dikelompokkan menjadi dua bagian besar, yaitu Alumunium Tuang (*Cast*) dan Alumunium Tempa (*Wrought*), dan keduanya dibagi lagi ke dalam sub kelompok menjadi *Heat Treatable* dan *Non-Heat Treatable*. 85% dari material diatas biasanya digunakan untuk material tempa dalam bentuk *rolled plate*, kertas (*sheet*) dan material Extrusi. Alumunium tuang memiliki biaya total yang lebih rendah bila dibandingkan dengan Alumunium tempa karena Alumunium jenis ini memiliki titik lebur yang rendah, sehingga energi yang dibutuhkan lebih rendah, tetapi memiliki kekuatan tarik yang lebih rendah pula dibandingkan dengan *wrought product* [10].



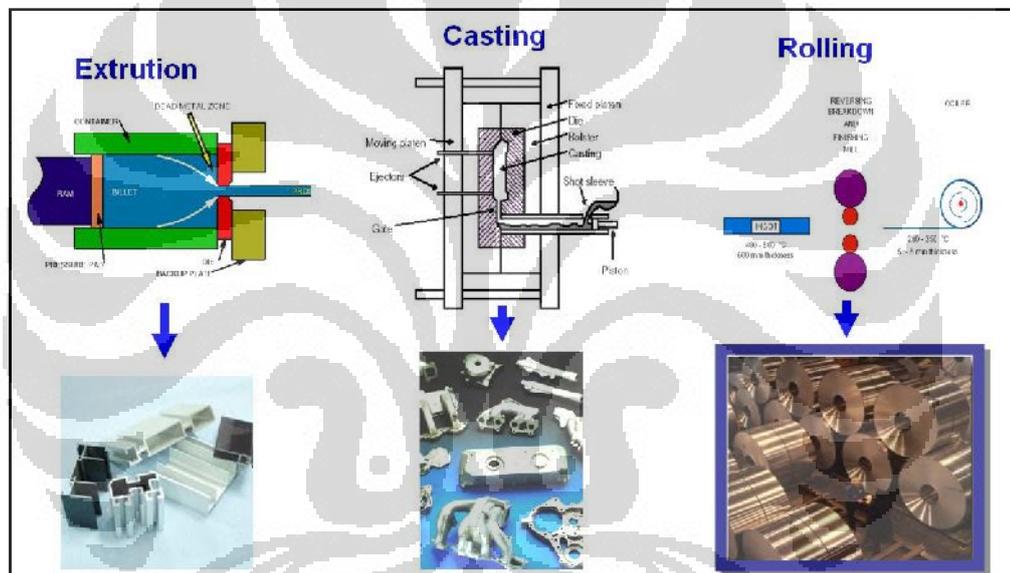
Gambar 2.7 Alumunium casting dan tempa

Material ini banyak digunakan pada struktur atau *part-part* yang menginginkan beban yang ringan dan tahan karat, karena material ini memiliki berat jenis rendah dan ketahanan karat yang baik [11].

Pada dasarnya Alumunium memiliki beberapa karakter utama yaitu [11] :

1. Ringan : berat jenis rendah ($2,7 \text{ gr/cm}^3$), hanya $1/3$ baja
2. *Ratio strength to weight* (kekuatan/berat) : sangat baik
3. Temperatur lebur rendah (660°C), sehingga peralatan peleburan lebih sederhana
4. Sifat mampu cor (*castability*) sangat baik
5. Sifat mampu mesin (*machinability*) baik
6. Sifat permukaan (*surface finish*) baik
7. Ketahanan korosi baik
8. *Konduktor* panas dan listrik yang baik

9. Mudah dipadu (*alloying*) dengan unsur lain untuk menghasilkan sifat yang diinginkan
10. BJ rendah, mudah tercampur dengan pengotor (*dross*) oksida misal Al_2O_3 yang BJ (2.1 gr/mm^3) nya hampir sama BJ Aluminium Cair (2.3 gr/mm^3)
11. Sebaiknya menggunakan *degasser* atau GBF (*Gas Bubble Floation = Argon Treatment*)
12. Mengalami penyusutan (*shrinkage*) yang cukup Tinggi 3.5 – 8.5 % (rata-rata 6 %)



Gambar 2.8 Metode pembentukan Aluminium [11]

Menurut standard yang digunakan di Dunia seperti JIS, ASM, ISI, ISO dll material aluminium dibagi kedalam beberapa kelas dengan penamaan sesuai dengan standard yang digunakan. Pengklasifikasian ini berdasarkan komposisi kimia paduannya dan juga sifat-sifat mekaniknya.

Tabel 2.2 : Pembagian material Aluminium berdasarkan komposisi kimia [12]

Japan												
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Ti	Pb	Cr	similar to*
AC1A	1,2 max	0,4 max	4,0-5,0	0,3 max	0,2 max	0,05 max	0,3 max	0,05 max	0,25 max	0,05 max	0,05 max	
AC1B	0,2 max	0,3 max	4,2-5,0	0,1 max	0,2-0,35	0,05 max	0,1 max	0,05 max	0,05-0,3	0,05 max	0,05 max	AC-21100, Z1201
AC2A	4,0-6,0	0,7 max	3,0-4,5	0,55 max	0,25 max	0,3 max	0,55 max	0,05 max	0,2 max	0,15 max	0,15 max	AC-45100 / AC-45200
AC2B	5,0-7,0	0,8 max	2,0-4,0	0,5 max	0,5 max	0,35 max	1,0 max	0,1 max	0,2 max	0,2 max	0,2 max	AC-45200, 318.0 / 319.0, Z1107
AC3A	10,0-13,0	0,7 max	0,25 max	0,35 max	0,15 max	0,1 max	0,3 max	0,1 max	0,2 max	0,1 max	0,15 max	AC-44000 / AC-44100 / AC-44200 / AC-47000, Z1102
AC4A	8,0-10,0	0,4 max	0,25 max	0,3-0,6	0,35-0,6	0,1 max	0,25 max	0,05 max	0,2 max	0,1 max	0,15 max	AC-43200 / AC-43300, 359.0, Z1104
AC4B	7,0-10,0	0,8 max	2,0-4,0	0,5 max	0,5 max	0,35 max	1,0 max	0,1 max	0,2 max	0,2 max	0,2 max	AC-46200, 332.0
AC4C	6,5-7,5	0,4 max	0,25 max	0,35 max	0,25-0,45	0,1 max	0,35 max	0,05 max	0,2 max	0,1 max	0,1 max	AC-42000 / AC-42200, 356.0 / 356.0 / 444.0, Z1101 / Z1101A
AC4CH	6,5-7,5	0,17 max	0,2 max	0,1 max	0,3-0,45	0,05 max	0,1 max	0,05 max	0,2 max	0,05 max	0,05 max	AC-42100, Z1101 / Z1101A / Z1114A
AC4D	4,5-5,5	0,5 max	1,0-1,5	0,5 max	0,45-0,6	0,2 max	0,3 max	0,05 max	0,2 max	0,1 max	0,15 max	AC-45300, 355.0, Z1105 / Z1105A
AC5A	0,6 max	0,7 max	3,5-4,5	0,35 max	1,3-1,8	1,7-2,3	0,15 max	0,05 max	0,2 max	0,05 max	0,15 max	242.0
AC7A	0,2 max	0,25 max	0,1 max	0,6 max	3,6-5,5	0,05 max	0,15 max	0,05 max	0,2 max	0,05 max	0,15 max	AC-51300
AC8A	11,0-13,0	0,7 max	0,8-1,3	0,15 max	0,8-1,3	0,8-1,5	0,15 max	0,05 max	0,2 max	0,05 max	0,1 max	AC-48000, Z1108 / Z1109
AC8B	8,5-10,5	0,8 max	2,0-4,0	0,5 max	0,6-1,5	0,1-1,0	0,5 max	0,1 max	0,2 max	0,1 max	0,1 max	
AC8C	8,5-10,5	0,8 max	2,0-4,0	0,5 max	0,6-1,5	0,5 max	0,5 max	0,1 max	0,2 max	0,1 max	0,1 max	
AC9A	22,0-24,0	0,7 max	0,5-1,6	0,5 max	0,6-1,5	0,5-1,5	0,2 max	0,1 max	0,2 max	0,1 max	0,1 max	
AC9B	18,0-22,0	0,7 max	0,5-1,6	0,5 max	0,6-1,5	0,5-1,5	0,2 max	0,1 max	0,2 max	0,1 max	0,1 max	

Tabel 2.3 : Pembagian material Aluminium berdasarkan sifat mekaniknya [12].

Alloy type		Temper	Tensile strength (min) [ksi] ([MPa])	Yield strength (min) [ksi] ([MPa])	Elongation in 2 in [%]
ANSI	UNS				
201.0	A02010	T7	60.0 (414)	50.0 (345)	3.0
204.0	A02040	T4	45.0 (310)	28.0 (193)	6.0
242.0	A02420	O	23.0 (159)	N/A	N/A
		T61	32.0 (221)	20.0 (138)	N/A
A242.0	A12420	T75	29.0 (200)	N/A	1.0
295.0	A02950	T4	29.0 (200)	13.0 (90)	6.0
		T6	32.0 (221)	20.0 (138)	3.0
		T62	36.0 (248)	28.0 (193)	N/A
		T7	29.0 (200)	16.0 (110)	3.0
319.0	A03190	F	23.0 (159)	13.0 (90)	1.5
		T5	25.0 (172)	N/A	N/A
		T6	31.0 (214)	20.0 (138)	1.5
328.0	A03280	F	25.0 (172)	14.0 (97)	1.0
		T6	34.0 (234)	21.0 (145)	1.0
355.0	A03550	T6	32.0 (221)	20.0 (138)	2.0
		T51	25.0 (172)	18.0 (124)	N/A
		T71	30.0 (207)	22.0 (152)	N/A
C355.0	A33550	T6	36.0 (248)	25.0 (172)	2.5
		F	19.0 (131)	9.5 (66)	2.0
356.0	A03560	T6	30.0 (207)	20.0 (138)	3.0
		T7	31.0 (214)	N/A	N/A
		T51	23.0 (159)	16.0 (110)	N/A
		T71	25.0 (172)	18.0 (124)	3.0
		T6	34.0 (234)	24.0 (165)	3.5
A356.0	A13560	T61	35.0 (241)	26.0 (179)	1.0
443.0	A04430	F	17.0 (117)	7.0 (48)	3.0
B443.0	A24430	F	17.0 (117)	6.0 (41)	3.0
512.0	A05120	F	17.0 (117)	10.0 (69)	N/A
514.0	A05140	F	22.0 (152)	9.0 (62)	6.0
520.0	A05200	T4	42.0 (290)	22.0 (152)	12.0
535.0	A05350	F	35.0 (241)	18.0 (124)	9.0
705.0	A07050	T5	30.0 (207)	17.0 (117) [†]	5.0
707.0	A07070	T7	37.0 (255)	30.0 (207) [†]	1.0
710.0	A07100	T5	32.0 (221)	20.0 (138)	2.0
712.0	A07120	T5	34.0 (234)	25.0 (172) [†]	4.0
713.0	A07130	T5	32.0 (221)	22.0 (152)	3.0
771.0	A07710	T5	42.0 (290)	38.0 (262)	1.5
		T51	32.0 (221)	27.0 (186)	3.0
		T52	36.0 (248)	30.0 (207)	1.5
		T6	42.0 (290)	35.0 (241)	5.0
		T71	48.0 (331)	45.0 (310)	5.0

2.4 PERANCANGAN MEKANIKAL MESIN

Alur perancangan pada pembuatan prototipe mesin FSSMW ini menggunakan 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 teknis seperti analisa kebutuhan [13].

Cara pendekatan ini dapat mengurangi terjadinya kesalahan pada suatu langkah perancangan yang dapat mengakibatkan proses harus kembali ke langkah sebelumnya. Sebagai contohnya apabila dalam proses pengerjaan manufaktur seperti *milling*, *drilling* atau *turning* ada salah satu *part* yang tidak sesuai dengan toleransi yang kita inginkan, maka bisa mengakibatkan ketidak-lurusan dan menyebabkan kerusakan pada *part* tersebut, atau pada mesin secara keseluruhan.

Sub bab berikut akan memaparkan secara singkat langkah-langkah yang dilakukan dalam rangka pengembangan sistem FSSMW untuk pengelasan plat tipis aluminium berdasarkan pendekatan *concurrent engineering*.

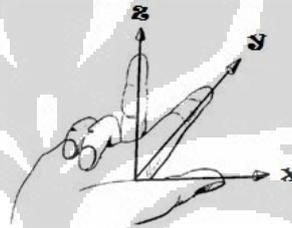


Gambar 2.9 Pendekatan Concurrent Engineering

2.4.1 Komponen Penggerak Mesin

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada Bab 1 Pendahuluan tentang kebutuhan mesin FSSMW, maka dari itu laboratorium manufaktur mencoba untuk membuat prototipe mesin FSSMW khusus untuk pengelasan material plat aluminium yang sederhana, kokoh dan dimensinya kecil supaya bisa dipindah-pindahkan (*portable*).

Untuk pembuatan prototipe mesin FSSMW ini, sebenarnya cukup dibutuhkan dua gerakan yakni sumbu Z dan sumbu Y, akan tetapi untuk efektifitas pembuatan dan bisa digunakan untuk penelitian lebih lanjut pada mesin ini sudah dirancang dengan menggunakan 3 sumbu. (gambar 2.10)



Gambar 2.10 Simulasi 3 sumbu dengan tangan kanan

Oleh karena itu, untuk bisa mendapatkan 3 gerakan tersebut dibutuhkan 3 aktuator. Aktuator yang digunakan adalah stepper motor (Gambar 2.11). Sedangkan untuk membantu pergerakan, dibutuhkan *ballscrew*, *linear shaft* dan *bushing single closed*. (Gambar 2.12)



Gambar 2.11 Stepper Motor

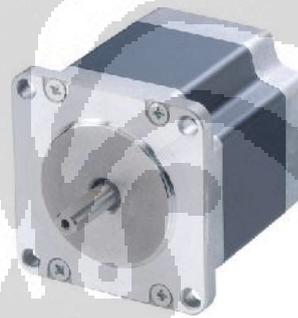


Gambar 2.12 Ballscrew, linear shaft dan bushing SC

Sistem pergerakan yang dibantu oleh *ballscrew*, *linear shaft* dan *bushing single closed* merupakan pergerakan untuk ketiga sumbu, yakni sumbu-x, sumbu-y dan sumbu-z. Perancangan harus memperhatikan kebutuhan-kebutuhan tersebut supaya pembuatan prototipe mesin FSSMW bisa bekerja secara efektif dan tepat guna.

2.1.1.1 Motor Stepper [14]

Motor stepper adalah perangkat Elektromekanik yang mengubah pulsa elektrik menjadi gerakan mekanis diskrit. Pada prinsipnya motor mengkonversi tenaga listrik ke dalam daya mekanis. Suatu motor stepper mengkonversi sinyal elektrik ke dalam pergerakan (putaran) spesifik. Pergerakan yang diciptakan oleh sinyal masing-masing dapat diulang dengan tepat, itulah sebabnya mengapa motor stepper sangat efektif untuk aplikasi pergerakan posisi [14].



Gambar 2.13 Stepper Motor

Motor stepper memiliki beberapa kebutuhan standar yang harus dipenuhi agar dapat bekerja dengan baik, antara lain:

- Tegangan/arus yang memadai untuk setiap lilitan untuk langkah tiap step.
- Lama tegangan/arus harus diberikan untuk setiap langkah atau step.

Hal ini diperlukan untuk memberikan waktu yang cukup bagi torsi untuk memindahkan posisi ke kutub ke posisi yang paling dekat dengan kutub stator (lilitan).

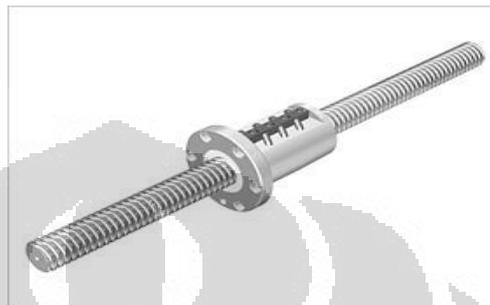
Torsi yang dihasilkan oleh motor stepper adalah fungsi dari :

- Banyaknya langkah (step rate)

- Arus pada kumparan
- Type dari alat yang digunakan (beban)

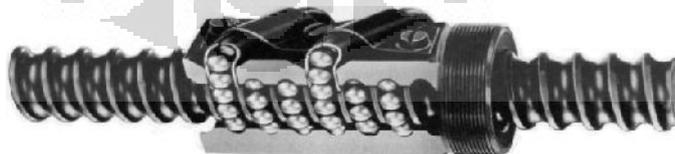
(Gaya yang dihasilkan juga terpengaruh oleh hal-hal tersebut)

2.1.1.2 Ballscrew [15]



Gambar 2.14 Ballscrew

Kebutuhan umum dalam perancangan mekanis adalah menggerakkan komponen-komponen dalam arah *linier*. Salah satu komponen dan sistem yang menghasilkan gerakan linier adalah *ballscrew*. *Ballscrew* dirancang untuk mengubah gerakan putar menjadi gerakan *linier* dan menghasilkan gaya untuk menggerakkan elemen mesin sepanjang lintasan yang diinginkan. *Ballscrew* mempunyai fungsi yang sama dengan *leadscrew*, tetapi konfigurasiya berbeda. Mur berisi banyak bola kecil yang membuat kotak gelinding dengan batang ulir, memberikan gesekan yang kecil dan efisiensi yang tinggi [15].



Gambar 2.15 Potongan ballscrew [15]

Gambar 2.15 menunjukkan pandangan potongan *ballscrew* yang tersedia dipasaran. *Ballscrew* menggantikan gesekan luncur pada *leadscrew* konvensional dengan gesekan gelindingan bola-bola bantalan.

Bola-bola bantalan bersirkulasi dalam cincin baja yang dikeraskan yang berbentuk alur cekung miring dalam ulir dan mur, seluruh beban reaktif antara ulir dan mur dibawa oleh bola-bola bantalan yang hanya bersinggungan fisik antara bola-bola itu. Saat ulir dan mur berputar relatif satu terhadap yang lain, bola-bola bantalan dialihkan dari satu ujung mur dan dibawa oleh pipa sirkulasi pemandu bola menuju ke ujung mur bola lainnya. Sirkulasi ini memungkinkan perjalanan tanpa batas dari mur dan ulir.

Parameter aplikasi yang dipertimbangkan dalam pemilihan *ballscrew* meliputi hal berikut [15] :

1. Beban aksial yang dialami *screw* selama operasi
2. Kecepatan putar *screw*
3. Beban statis maksimum pada *screw*
4. Arah beban
5. Cara penumpuan ujung-ujung sekrup
6. Panjang sekrup
7. Perkiraan umur
8. Kondisi lingkungan

a. Torsi dan efisiensi ballscrew

Efisiensi *ballscrew* biasanya diambil 90%. Ini jauh melampaui Efisiensi pada *leadscrew* tanpa kontak gelinding yang biasanya berkisar 20% sampai 30%. Jadi untuk ukuran screw yang sama, torsi yang dibutuhkan untuk membawa beban jauh lebih kecil. Daya yang dibutuhkan juga dengan sendirinya akan berkurang. Perhitungan torsi untuk memutar dituliskan pada persamaan 2.3 [15]

$$TI = \frac{FL}{2\pi} \quad (2.0)$$

Maka Efisiensi *Ballscrew*,

$$e = \frac{TI}{Tu} \quad (2.1)$$

Jadi Torsi yang dibutuhkan untuk memutar ulir ,

$$e = \frac{TI}{Tu} = \frac{FL}{2\pi Tu} = 0.177FL \quad (2.2)$$

$$\text{Jadi, } Tu = \frac{FL}{2\pi e} = 0.177FL \quad (2.3)$$

Keterangan:

e = Efisiensi *Ballscrew* (90%)

F = Gaya yang dipindahkan

L = kisar ulir

TI = Initial Torsi

Tu = Torsi yang dibutuhkan untuk memutar ulir

Kisar (L) didefinisikan sebagai jarak aksial yang ditempuh oleh ulir bila diputar satu kali putaran penuh. p adalah jarak dari sebuah titik pada satu ulir ketitik yang sesuai ulir berikutnya (*pitch*).

$$L = p = \frac{1}{n} \quad (2.4)$$

Karena gesekannya kecil, *Ballscrew* sebenarnya tidak pernah dapat mengunci sendiri. Dalam perancangan juga menggunakan kelebihan sifat ini, dengan menggunakan beban yang diterapkan pada mur untuk memutar ulir. Ini disebut putaran balik (*back driving*), torsi putaran balik dapat dihitung dari:

$$Tb = \frac{FL e}{2\pi} = 0.143FL \quad (2.5)$$

Keterangan:

e = Efisiensi *Ballscrew* (90%)

F = Gaya yang dipindahkan

L = kisar ulir

Tb = Torsi Balik (*back driving*)

2.1.1.3 Motor Spindle

Motor *spindle* merupakan penggerak utama mesin yang digunakan untuk memotong dan memakan benda kerja. Pada mesin prototipe ini menggunakan *mini grinder* sebagai motor *spindle*-nya.



Gambar 2.16 Mini Grinder

2.4.2 Perancangan Mekanis [15]

Untuk merancang alat dan sistem mekanis, diperlukan keahlian menggabungkan beberapa komponen dan peralatan menjadi suatu sistem selaras dan kuat, yang memenuhi kebutuhan dan standaritas. Tujuan akhir dari sebuah perancangan mekanis adalah menghasilkan produk yang bermanfaat yang memenuhi kebutuhan konsumen, pembuatannya cukup aman, efisien, andal, ekonomis dan praktis. Dalam melakukan perancangan dibutuhkan ketrampilan dan pengetahuan meliputi hal-hal sebagai berikut:

1. Pembuatan desain, gambar teknik, dan perancangan dengan komputer.
2. Sifat bahan, pemrosesan bahan, dan pembuatan bahan.
3. Statika, dinamika, kekuatan bahan, kinematika dan proses pembuatan.
4. Analisis tegangan.
5. Perancangan eksperimen dan pengujian unjuk kerja bahan dan sistem mekanis.
6. Kreativitas dan pemecahan masalah.
7. Pengetahuan khusus mengenai perilaku elemen mesin seperti poros, bantalan, motor, dll

a. Desain / Sketsa

Dalam merancang suatu konstruksi hal yang perlu diperhatikan pertama kali adalah desain / sketsa. Beberapa langkah harus dilakukan sebelum memperoleh hasil yang ideal:

1. Hambatan yang timbul
2. Kemampuan untuk memecahkan masalah
3. Memenuhi tuntutan pemakai

Setelah persyaratan umum dipenuhi untuk sebuah desain konstruksi, tahap selanjutnya adalah:

1. Menentukan ukuran utama
2. Tata letak yang pasti sudah ditetapkan

Ini bertujuan membuat konstruksi menjadi sederhana, hemat bahan kerja dan tidak memakan banyak ruang. Langkah berikutnya adalah tahap-tahap mendesain konstruksi total yaitu:

1. Kebutuhan (*Need*) : keaslian dan standard yang digunakan
2. Menentukan ukuran-ukuran utama dengan perhitungan kasar
3. Menentukan alternatif - alternatif
4. Desain yang berkala : kalkulasi bagian kritis
5. Pemilihan bahan : kekuatan tejamin, bahan mudah didapat dan permesinan yang mudah
6. Mengamati desain secara teliti
7. Gambar lengkap dan daftar elemen: toleransi dan simbol pengerjaan, memenuhi standrisasi, keterangan mengenai metode-metode khusus pada bahan.

b. Pengelompokan konstruksi total

- ✓ Mengelompokan beberapa komponen menjadi beberapa kelompok utama.
- ✓ Menentukan ukuran dan bobot konstruksi.
- ✓ Standard dan kemudahan cara produksi dan penggunaan komponen.

c. Pengecekan gambar kerja

Pengecekan dilakukan secara berurutan, karena memperhatikan hubungan satu komponen dengan komponen lainnya yang tidak ada hubungannya adalah sukar. Harus ditetapkan dulu, dari segi-segi mana pokok utama tersebut dinilai. Misalnya:

- 1) Menemukan titik-titik kritis
- 2) Kekuatan
- 3) Lokasi pergeseran
- 4) Perakitan (*assembling*)
- 5) Produksi
- 6) Standarisasi
- 7) Penghematan
- 8) Dimensi

2.4.3 Kalkulasi Kontruksi

Merupakan salah satu sebuah perencanaan perhitungan, dimana perhitungan ini untuk menganalisa dan mendapatkan data-data dalam melakukan suatu pembuatan kontruksi agar mendapatkan hasil yang di harapkan, dengan melakukan perhitungan terlebih dahulu.

2.4.3.1 Kinematika [13]

Kenematika adalah ilmu yang mempelajari gerak komponen mesin gaya-gaya terhadap benda diam dan bergerak serta mempelajari pengaruh gerak terhadap gaya dan daya.

a. Syarat Keseimbangan Benda Tegar

Pada kenyataannya, semua benda akan mengalami perubahan bentuk apabila diberi gaya luar tetapi pada benda padat umumnya perubahan ini sangat kecil sehingga tidak berpengaruh pada kondisi keseimbangan statisnya. Benda tegar didefinisikan sebagai suatu benda yang tidak berubah bentuknya ketika diberi gaya luar.

Berbeda dengan partikel (benda titik) yang hanya mungkin mengalami gaya translasi, benda tegar selain bisa mengalami gerak translasi juga bisa mengalami rotasi. Untuk itu, diperlukan dua syarat agar benda tegar seimbang, yaitu resultan gaya dan resultan momen gaya terhadap satu titik sembarang sama dengan nol. Secara matematis dapat ditulis:

$$\sum \tau = 0 \text{ dan } \sum F = 0 \quad (2.6)$$

Syarat keseimbangan benda tegar yang terletak pada suatu bidang datar (misal bidang XY), dinyatakan sebagai berikut:

$$\sum F = 0 \text{ maka } \sum F_x = 0 \text{ dan } \sum F_y = 0 \quad (2.7)$$

$\sum F_x =$ Resultan Gaya pada resultan komponen X

$\sum F_y =$ Resultan Gaya pada resultan komponen Y

b. Koordinat titik tangkap Gaya resultan

Misalkan beberapa gaya yang bekerja pada bidang XY . Setiap gaya tersebut dapat diuraikan atas komponen-komponennya pada sumbu X dan sumbu Y . Sebagai contoh, komponen-komponen pada sumbu X adalah $F_{x1}, F_{x2} \dots F_{xn}$ dengan jarak masing-masing pada sumbu X adalah $y_1, y_2 \dots y_n$. Sedangkan komponen-komponen pada sumbu Y adalah $F_{y1}, F_{y2} \dots F_{yn}$ dengan jarak masing-masing pada sumbu Y adalah $x_1, x_2 \dots x_n$.

Jika resultan komponen gaya pada sumbu y adalah R_y dengan jarak X_R dari sumbu Y , maka berlaku hubungan:

$$R_y \cdot x = \sum_{i=1}^n F_{yi} \cdot x_i \quad (2.8)$$

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n F_{yi} \cdot x_i}{R_y} = \frac{F_{y1} \cdot x_1 + F_{y2} \cdot x_2 + \dots + F_{yn} \cdot x_n}{R_y} \quad (2.9)$$

R_y

$$R_x \cdot y = \sum_{i=1}^n F_{xi} \cdot y_i \quad (2.10)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n F_{xi} \cdot y_i}{R_x} = \frac{F_{x1} \cdot y_1 + F_{x2} \cdot y_2 + \dots + F_{xn} \cdot y_n}{R_x} \quad (2.11)$$

Ket:

$\sum F_x$ = Resultan Gaya pada resultan komponen X

$\sum F_y$ = Resultan Gaya pada resultan komponen Y

(x,y) = Titik tangkap Gaya resultan

F_{xi} = berada positif jika berarah kekanan

F_{yi} = berada positif jika berarah keatas

x_i = berada positif jika berarada dikanan titik acuan

y_i = berada positif jika berarada diatas titik acuan

c. Perhitungan pada poros [16]

Pada poros yang menderita beban puntir dan beban lentur sekaligus, maka pada permukaan poros akan terjadi tegangan geser karena momen puntir dan tegangan lentur karena momen lengkung, maka daya rencana poros dapat ditentukan dengan rumus:

$$P_d = f_c P (kW) \quad (2.12)$$

Dimana

P_d = daya rencana (kW)

F_c = factor koreksi

P = daya nominal motor penggerak (kW)

Jika momen puntir (disebut juga momen rencana) adalah T (kg.mm) maka:

$$P_d = \frac{(T/1000)(2fn_1/60)}{102} \quad (2.13)$$

sehingga

$$T = 9,74 \times 10^5 \frac{P_d}{n_1} \quad (2.14)$$

Bila momen rencana T (kg.mm) dibebankan pada suatu diameter poros d (mm), maka tegangan geser (kg.mm²) yang terjadi adalah:

$$\dagger = \frac{T}{(fd^3/16)} = \frac{5,1T}{d^3} \quad (2.15)$$

Meskipun dalam perkiraan sementara ditetapkan bahwa beban hanya terdiri atas momen puntir saja, perlu ditinjau pula apakah ada kemungkinan pemakaian dengan beban lentur dimasa mendatang. Jika memang diperkirakan akan terjadi pemakaian dengan beban lentur maka dapat dipertimbangkan pemakaian factor C_b yang harganya antara 1,2-2,3. (jika tidak diperkirakan akan terjadi pembebanan lentur maka C_b diambil = 1,0).

Dari persamaan diatas diperoleh rumus untuk menghitung diameter poros.

$$d = \left[\frac{5,1}{\dagger_a} K_t C_b T \right]^{1/3} \quad (2.16)$$

dimana:

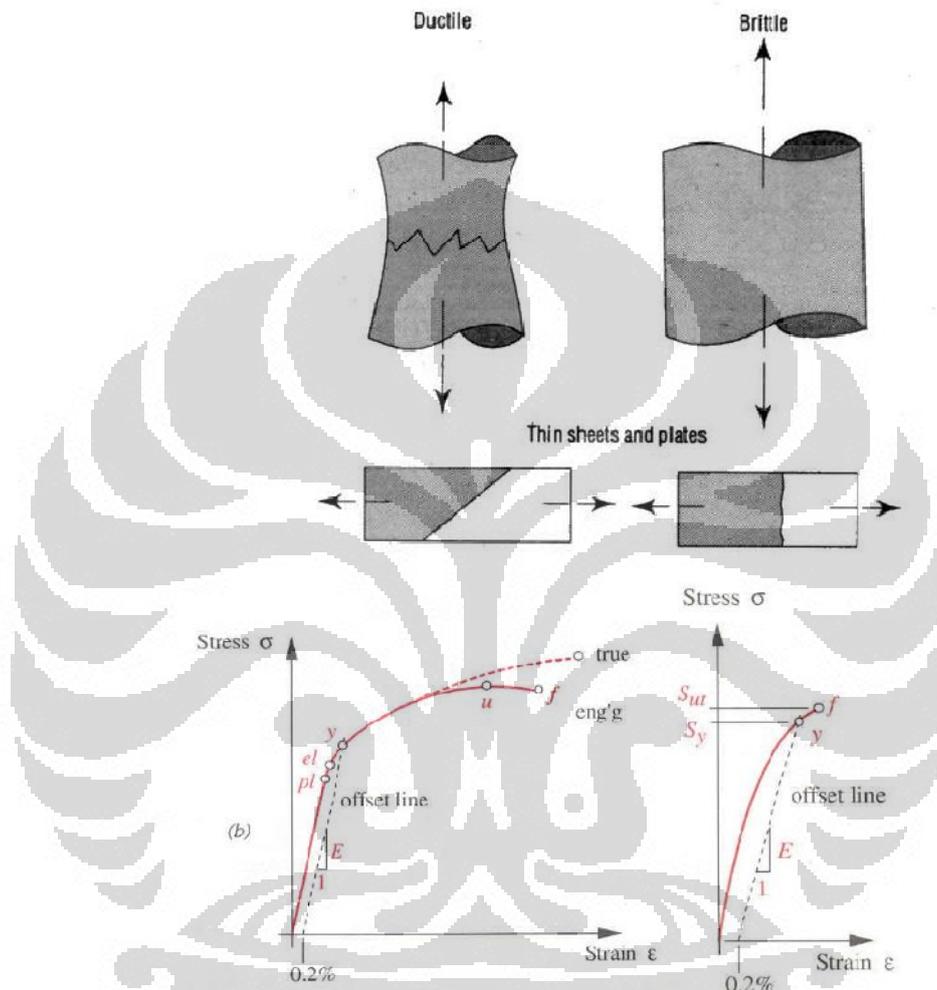
$$\dagger_a = \dagger_B / (sf_1 \times sf_2) \quad (2.17)$$

2.5 KRITERIA KEGAGALAN STATIK

Kegagalan pada suatu elemen mesin dapat terjadi dalam berbagai wujud misalnya retak, patah, korosi, aus, dll. Penyebab kegagalan juga bermacam-macam seperti misalnya salah desain, beban operasional, kesalahan *maintenance*, cacat material, temperatur, lingkungan, dll. Kegagalan akibat beban mekanis adalah berhubungan dengan jenis tegangan yang terjadi pada komponen mesin. Beban mekanis yang dimaksud adalah beban dalam bentuk gaya, momen, tekanan, dan beban mekanis lainnya.

Uji tarik dapat menjelaskan terjadinya kegagalan pada spesimen yang mendapatkan beban. Pada Gambar 2.17 menunjukkan kurva tegangan regangan

pada spesimen material ulet (*ductile*) dan material getas (*brittle*). Terlihat fenomena “*yielding*” pada material ulet, sedangkan pada material getas kegagalan atau patah terjadi tanpa adanya *yielding* yang signifikan.



Gambar 2.17 Kurva tegangan-regangan material ulet dan material getas [17]

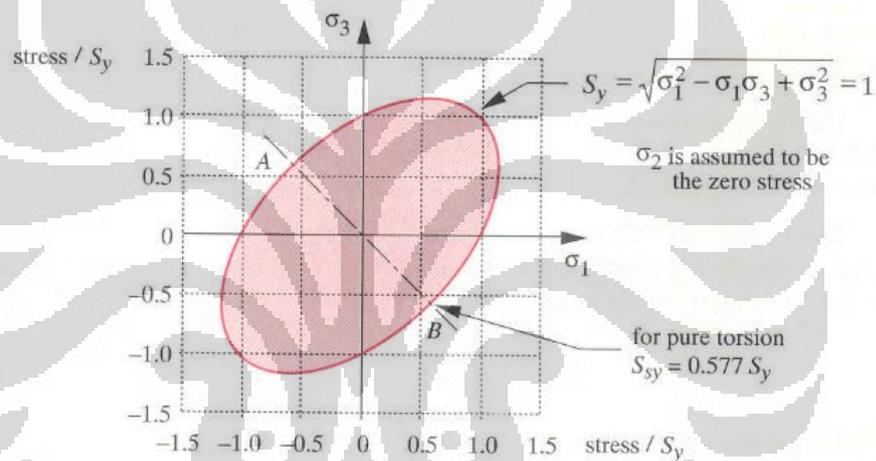
Analisis menunjukkan bahwa untuk material ulet, kegagalan lebih ditentukan oleh kekuatan geser, sedangkan untuk material getas, kegagalan lebih ditentukan oleh kekuatan tarik. Hal ini mengindikasikan bahwa perlu dikembangkan teori atau kriterial kegagalan yang berbeda antara material ulet dan material getas.

2.5.1 Teori Kegagalan untuk Material Ulet

Material ulet akan patah jika tegangan akibat beban statik diatas kekuatan tarik *ultimatenya*. Lebih jauh, kegagalan pada komponen mesin terjadi bila tegangan akibat beban statik diatas kekuatan *yieldnya*.

a. Teori Energi Distorsi Maksimum (TEDM)

Teori ini diperkenalkan oleh Huber (1904) kemudian disempurnakan oleh Von Misses dan Hencky. Teori ini menyatakan bahwa “ *Kegagalan diprediksi terjadi pada keadaan tegangan multiaksial bilamana energi distorsi per unit volume sama atau lebih besar dari energi per unit volume pada saat terjadinya kegagalan dalam pengujian tegangan uniaksial sederhana terhadap spesimen dari material yang sama.*” [17].



Gambar 2.18 Grafik representasi TEDM dalam keadaan tegangan 2 dimensi [17]

Tegangan efektif Von Misses (σ') didefinisikan sebagai tegangan tarik uniaksial yang dapat menghasilkan energi distorsi yang sama dengan yang dihasilkan oleh kombinasi tegangan yang bekerja.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3}$$

atau :

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2}{2} + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (2.18)$$

untuk kasus dua dimensi ($\sigma_2 = 0$)

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2}$$

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (2.19)$$

$$\text{Kegagalan akan terjadi bila : } \sigma' \geq \frac{S_y}{n_s} \quad (2.20)$$

Untuk geseran murni $\sigma_1 = T = \sigma_3$ dan $\sigma_2 = 0$

$$S_y^2 = \sigma_1^2 + \sigma_1\sigma_1 + \sigma_1^2 = 3\sigma_1^2 = 3\tau_{\max}^2 \quad (2.21)$$

$$\sigma_1 = \frac{S_y}{\sqrt{3}} = 0,577S_y = \tau_{\max} \quad (2.22)$$

Dari persamaan diatas didefinisikan kekuatan *yield* terhadap geser (S_{ys}) dari material ulet adalah fraksi dari kekuatan *yield* yang didapat dari uji tarik (S_y)

$$S_{ys} = 0,577S_y \quad (2.23)$$

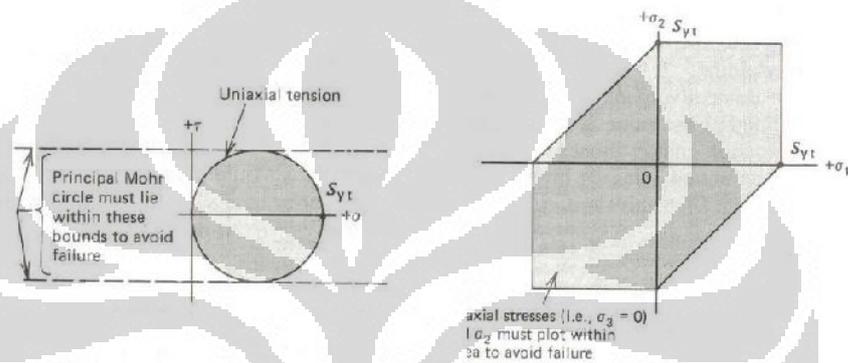
b. Teori Tegangan Geser Maksimum (TTGM)

Ide tentang tegangan geser yang berperan dalam menimbulkan kegagalan pertama kali diperkenalkan oleh ilmuwan Perancis, Coulomb (1376-1806). Formula kriteria tegangan geser maksimum dipublikasikan oleh Tresca (1864) dan Guest (1900) membuktikan lewat eksperimen. Sehingga teori ini disebut teori Tresca atau Guest Law. Teori ini menyatakan bahwa *“Kegagalan diprediksi terjadi pada keadaan tegangan multiaksial jika nilai tegangan geser maksimum sama atau lebih besar dibandingkan tegangan geser maksimum pada saat terjadinya kegagalan dalam pengujian tegangan uniaksial sederhana yang menggunakan spesimen dengan material yang sama.”*[17]

Secara sederhana, kegagalan terjadi apabila :

$$\begin{aligned}
 |\sigma_1 - \sigma_2| &\geq \left| \frac{S_u}{n_s} \right| \\
 |\sigma_2 - \sigma_3| &\geq \left| \frac{S_u}{n_s} \right| \\
 |\sigma_3 - \sigma_1| &\geq \left| \frac{S_u}{n_s} \right|
 \end{aligned}
 \tag{2.24}$$

Dimana S_u adalah kekuatan material pada saat uji tarik. Jadi kegagalan akan terjadi jika salah satu persamaan diatas terpenuhi. Dalam bentuk grafik, teori tegangan geser maksimum ditunjukkan pada Gambar 2.19



Gambar 2.19 Grafik representasi TTGM [17]

2.5.2 Teori Kegagalan untuk Material Getas

Kegagalan material yang bersifat getas akibat beban mekanis umumnya dalam bentuk patah atau retak.

a. Teori Tegangan Normal Maksimum (TTNM)

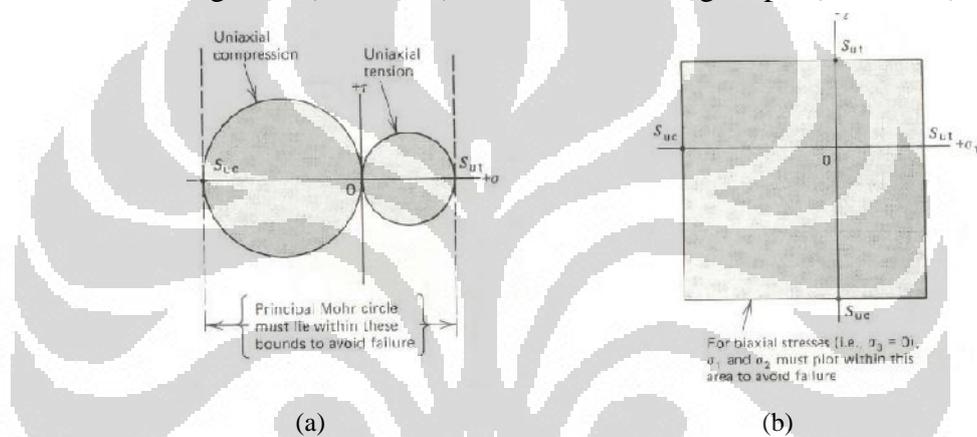
Teori ini paling baik diterapkan pada material getas yang berserat dan kaca. Teori ini menyatakan bahwa “Kegagalan diprediksi terjadi pada keadaan tegangan multiaksial jika tegangan utama maksimum sama atau lebih besar dibandingkan tegangan normal maksimum pada saat terjadinya kegagalan dalam pengujian tegangan uniaksial sederhana yang menggunakan spesimen dengan material yang sama.” [17]

Secara sederhana kegagalan terjadi apabila :

$$\begin{aligned}\sigma_1 &\geq S_{ut}/n_s \\ \sigma_3 &\leq S_{uc}/n_s\end{aligned}\quad (2.25)$$

Dimana σ_1 σ_2 σ_3 = tegangan normal utama
 S_{ut} = kekuatan *ultimate* material terhadap tarik
 S_{uc} = kekuatan *ultimate* material terhadap tekan

Gambar 2.20 menunjukkan batasan kriteria tegangan normal maksimum. Kegagalan akan diprediksikan terjadi jika kondisi tegangan berada diluar batas lingkaran (Gambar a) dan diluar batas segiempat (Gambar b)



Gambar 2.20 Grafik representasi TTNM [17]

b. Internal Friction Theory (IFT)

TTNM paling tepat digunakan pada material getas berserat dan kaca dimana struktur mikro terorientasi pada arah tegangan normal maksimum sebelum terjadinya patah. Banyak material getas seperti keramik dan logam cor yang tidak memiliki kemampuan tersebut sehingga tidak tepat mengaplikasikan TTNM.

Pada material getas seperti keramik dan logam cor, kekuatan terhadap tekan lebih besar dari kekuatan tarik, sehingga digunakan perluasan terhadap IFT.

Secara matematis dituliskan sebagai :

$$\begin{aligned}
 &\text{jika } \sigma_1 > 0 \text{ dan } \sigma_3 < 0 && \frac{\sigma_1}{S_{ut}} + \frac{\sigma_3}{S_{uc}} = \frac{1}{n_s} \\
 &\text{jika } \sigma_3 > 0 && \sigma_1 = \frac{S_{ut}}{n_s} \\
 &\text{jika } \sigma_1 < 0 && \sigma_3 = \frac{S_{uc}}{n_s}
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

Dimana σ_1 σ_2 σ_3 = tegangan normal utama

S_{ut} = kekuatan ultimate material terhadap tarik

S_{uc} = kekuatan ultimate material terhadap tekan

c. Modified Mohr Rheory (MMT)

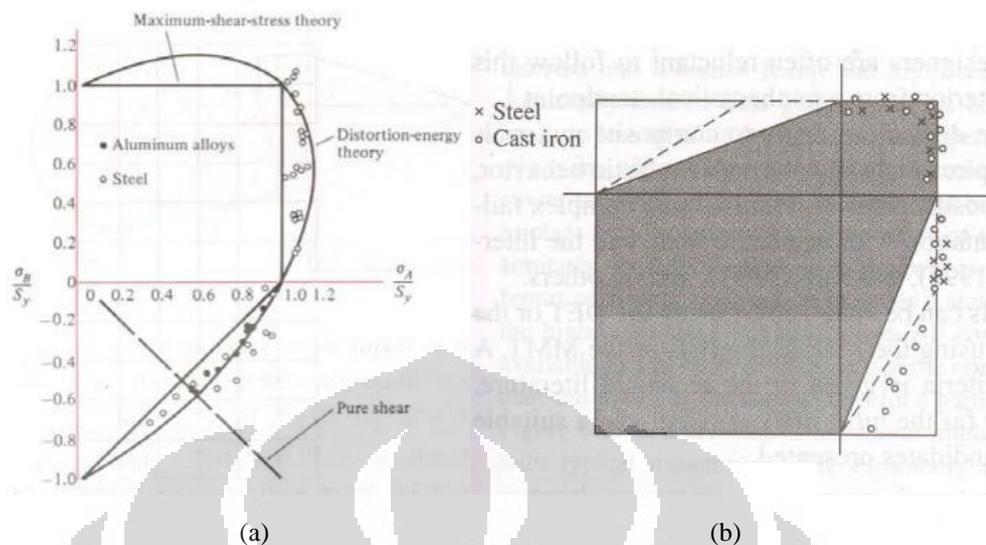
Tidak seperti IFT yang memiliki basis matematis, MMT dikembangkan dengan tujuan sesuai dengan data pengujian. MMT sangat baik dalam memprediksi sifat material getas, terutama pada kuadran IV.

MMT dapat dituliskan sebagai :

$$\begin{aligned}
 &\text{jika } \sigma_1 > 0 \text{ dan } \sigma_3 < -S_{ut} \\
 &\text{jika } \sigma_1 > 0 \text{ dan } \sigma_3 < -S_{ut} && \sigma_1 - \frac{S_{uc}\sigma_3}{S_{uc} - S_{ut}} = \frac{S_{uc}S_{ut}}{nS_{ut} - S_{ut}} \\
 &\text{jika } \sigma_3 > -S_{ut} && \sigma_1 = \frac{S_{ut}}{n_s} \\
 &\text{jika } \sigma_1 < 0 && \sigma_3 = \frac{S_{uc}}{n_s}
 \end{aligned} \tag{2.27}$$

2.5.3 Pemilihan Kriteria Kegagalan

Untuk material ulet, kriterial kegagalan TEDM lebih akurat dibandingkan TTGM (ditunjukkan oleh data pengujian terhadap material ulet pada Gambar 2.21). Oleh karena itu tegangan Von Misses cenderung digunakan pada analisis tegangan untuk kepentingan komersial serta kode elemen hingga untuk mendapatkan profil tegangan. Namun TTGM sering digunakan karena lebih konservatif (memprediksi kegagalan pada beban yang lebih rendah dibandingkan TEDM) dan secara matematis lebih mudah.



Gambar 2.21 Bukti eksperimental kriteria-kriteria kegagalan (a) Luluh pada material ulet (b) Patah pada material getas [17].

Tidak seperti material ulet, sifat material getas seperti keramik dan logam cor lebih bervariasi. Spesimen uji tidak mengalami kegagalan pada tegangan yang sama sehingga sulit menentukan kekuatan minimumnya secara pasti. Gambar 2.21 menunjukkan MMT lebih sesuai terhadap data pengujian material getas. Namun perbedaan ketiga kriteria kegagalan yang digunakan pada material getas (TTNM, IFT, dan MMT) tidak signifikan, sehingga tidak dapat disimpulkan teori mana yang lebih baik.

2.5.4 Faktor Keamanan [18]

Faktor keamanan pada awalnya didefinisikan sebagai suatu bilangan pembagi kekuatan *ultimate* material untuk menentukan tegangan kerja atau tegangan desain. Dalam dunia modern faktor keamanan umumnya antara 1,2 – 3.

Dalam “*modern engineering practice*” faktor keamanan dihitung terhadap “*significant strength of material*”, jadi tidak harus terhadap *ultimate* atau *tensile strength*. Dengan demikian faktor keamanan didefinisikan sebagai :

$$N = \frac{\text{significant strength of the material}}{\text{working stress}} \quad (2.28)$$

Penentuan nilai numerik faktor keamanan sangat tergantung pada berbagai parameter dan pengalaman. Parameter-parameter utama yang harus diperhatikan adalah jenis material, tipe dan mekanisme aplikasi beban, *state of stress*, jenis komponen dll. Berdasarkan berbagai pengalaman dan parameter-parameter tersebut, telah dikembangkan kode yang memuat cara perhitungan dan penentuan faktor keamanan untuk berbagai aplikasi khusus. Angka numerik faktor keamanan yang disarankan sesuai dengan beberapa parameter dan tingkat ketidakpastian.

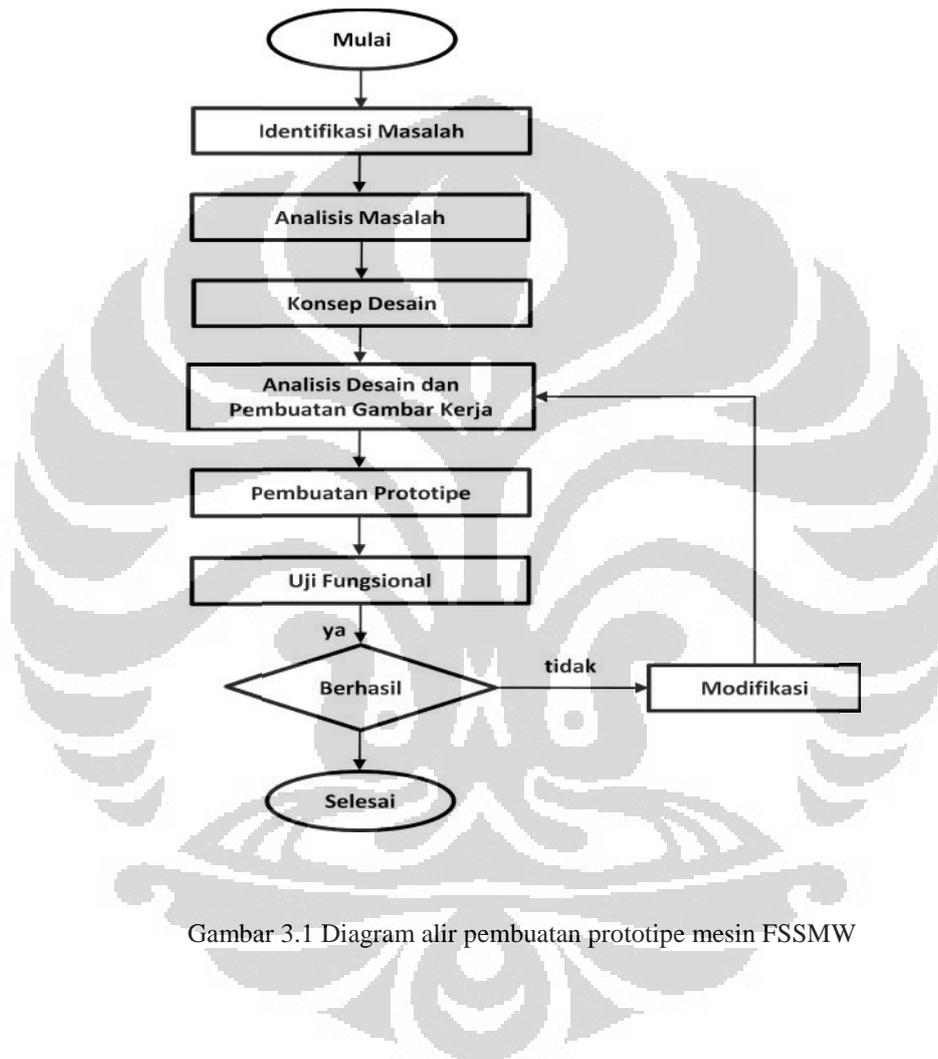
Tabel 2.4 Faktor Keamanan yang disarankan dalam perancangan [18]

No	Faktor keamanan yang disarankan	Parameter dan tingkat ketidakpastian
1	N = 1,25 - 1,5	Data Material yang sangat akurat dan handal, jenis pembebanan yang pasti, metode perhitungan tegangan yang akurat
2	N = 1,5 - 2	Data Material yang cukup baik, kondisi lingkungan yang stabil, dan beban serta tegangan yang terjadi dapat dihitung dengan baik
3	N = 2,0 - 2,5	Average material, komponen dioperasikan pada lingkungan normal, beban dan tegangan dapat dihitung dengan material
4	N = 2,5 - 3,0	Untuk material yang datanya kurang baik, atau material getas dengan pembebanan, dan lingkungan rata-rata
5	N = 3,0 - 4,0	Untuk Material yang belum teruji, dengan pembebanan, dan lingkungan rata-rata. Angka ini juga disarankan untuk material yang teruji dengan baik, tetapi kondisi lingkungan dan pembebanan tidak dapat ditentukan dengan pasti
6	Beban berulang (bolak-balik) : angka-angka yang disarankan diatas dapat digunakan tetapi dengan endurance limit sebagai significant strength.	
7	Beban impact : angka-angka yang disarankan diatas dapat digunakan tetapi faktor impact harus dimasukkan.	
8	Material getas : angka-angka yang disarankan diatas dikalikan dua untuk material getas, dimana faktor keamanan dihitung terhadap ultimate strength	

BAB 3 PEMBUATAN MESIN

3.1 DIAGRAM ALIR PEMBUATAN MESIN

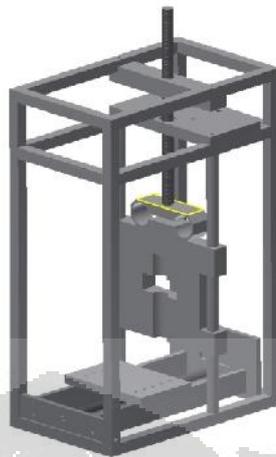
Langkah-langkah utama dari pembuatan mesin FSSMW dapat dilihat pada diagram alir dibawah ini.



Gambar 3.1 Diagram alir pembuatan prototipe mesin FSSMW

3.2 KONSEP DESAIN

Konsep desain adalah gambaran secara kasar apa yang akan dirancang. Konsep desain yang dilakukan dalam pembuatan Mesin FSSMW ini awalnya berdasarkan desain yang telah dirancang sebelumnya, dimana dalam perancangannya yang telah didesain belum diikutsertakan proses *stress analisis*.

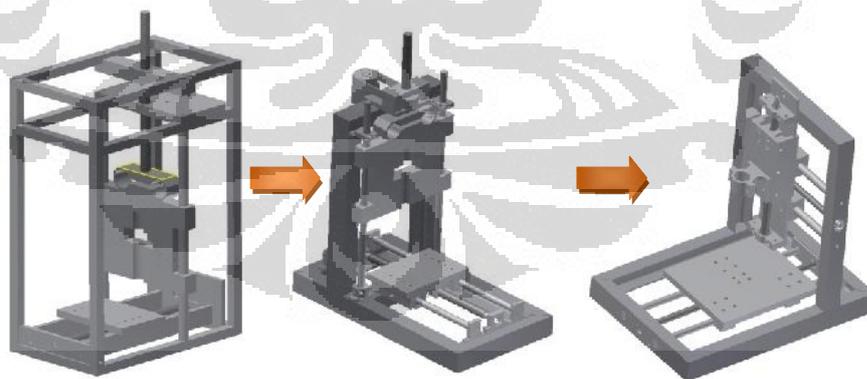


Gambar 3.2 Konsep desain awal

3.3 DETAIL DESAIN

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

1. Pemilihan material dan profil untuk rangka konstruksi.
2. Proses *stress analysis* untuk sumbu x, y dan z.
3. Pembuatan gambar teknik yang siap untuk dimanufaktur.



Gambar 3.3 Pengembangan dari konsep desain menjadi detail desain

Penentuan tahap tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya adalah deformasi dan struktur geometri dari komponen. Oleh karena itu tahapan dari detail desain ini semua komponen didesain semudah mungkin untuk diproses manufaktur.

3.4 ESTIMASI PERHITUNGAN MEKANIKA

Perhitungan perkiraan mekanika ini bertujuan untuk menghitung kekuatan bahan dan motor terhadap beban yang digunakan pada prototipe mesin FSSMW. Adapun langkah – langkah perhitungannya sebagai berikut :

- a. Menghitung resultan gaya pada setiap penampang sumbu.
- b. Menghitung torsi motor yang digunakan untuk memutar *ballscrew*.

Pada proses ini, hal terpenting yang harus diketahui terlebih dahulu adalah mengenai gaya yang timbul karena beban statik maupun dinamik. Simulasi pembebanan pada pembuatan prototipe mesin FSSMW ini difokuskan pada pembebanan statik, dimana gaya yang timbul diakibatkan oleh *body load* dan gaya dari tekanan tool (*Axial Force*) pada proses FSSMW ini diasumsikan sebesar 500N.

Komponen-komponen yang dihitung mekanikanya, yakni :

a. *Linear Shaft*

Pada perhitungan kali ini yang dilakukan adalah untuk mencari besarnya diameter minimal *shaft* pada sumbu Y dan X. *Linear shaft* merupakan tempat yang paling kritis dimana beban pada mesin ditumpu, baik itu beban pada area kerja (sumbu Y) maupun beban pada *spindle* (sumbu X).

Proses perhitungan *massa* dilakukan dengan bantuan *software* desain, dengan memasukkan jenis material ke dalam *properties* desain. Adapun material yang digunakan dalam pembuatan prototipe ini sebagian besar dari *Mild Steel* (MS).

Untuk dapat menghitung diameter minimal dari *linear shaft*, hal yang pertama kali dilakukan adalah menentukan materialnya. Material yang digunakan kali ini menggunakan *standar part* dari JIS S55C, dengan *mechanical properties* seperti terlihat pada tabel berikut ini :

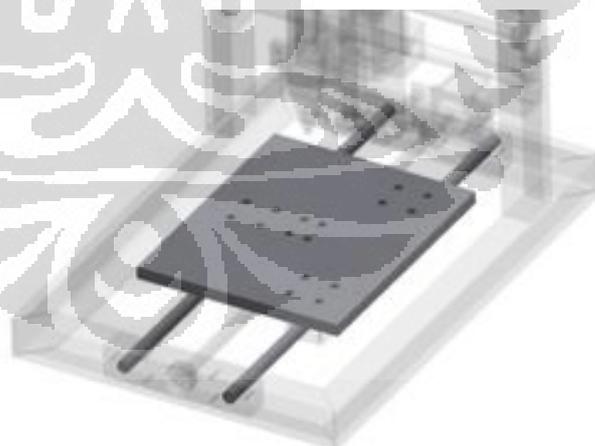
Tabel 3.1 : Mechanical properties Linear Shaft S55C [19]

Chemical composition % of the ladle analysis of grade JIS S55C and Standards

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	7.85 g/cc	0.284 lb/in ³	AISI 1055
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	229 - 285	229 - 285	
Hardness, Rockwell C	20.5 - 29.9	20.5 - 29.9	
Tensile Strength, Ultimate	785 MPa	114000 psi	
Tensile Strength, Yield	588 MPa	85300 psi	
Elongation at Break	14.0 %	14.0 %	
Reduction of Area	35.0 %	35.0 %	
Modulus of Elasticity	205 GPa	29700 ksi	Typical steel
Poissons Ratio	0.290	0.290	Typical steel
Machinability	55 %	55 %	Based on AISI 1212 steel as 100% machinability
Shear Modulus	80.0 GPa	11600 ksi	Typical steel
Impact	6.00	6.00	kg(f)/cm ²
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.0000163 ohm cm @Temperature 0.000 °C	0.0000163 ohm cm @Temperature 32.0 °F	condition of specimen unknown
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	11.0 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 100 °C	6.11 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 212 °F	
	12.4 µm/m-°C @Temperature 0.000 - 300 °C	6.89 µin/in-°F @Temperature 32.0 - 572 °F	
	13.9 µm/m-°C @Temperature 0.000 - 500 °C	7.72 µin/in-°F @Temperature 32.0 - 932 °F	
Specific Heat Capacity	0.400 J/g-°C @Temperature 50.0 - 100 °C	0.110 BTU/lb-°F @Temperature 122 - 212 (AISI 1045) annealed °F	
Thermal Conductivity	49.8 W/m-K	346 BTU-in/hr-ft ² -°F	Typical steel

Untuk lebih jelasnya mengenai beban masing-masing sumbu dapat dilihat dibawah ini :

1. Sumbu Y



Gambar 3.4 Simulasi pembebanan sumbu Y

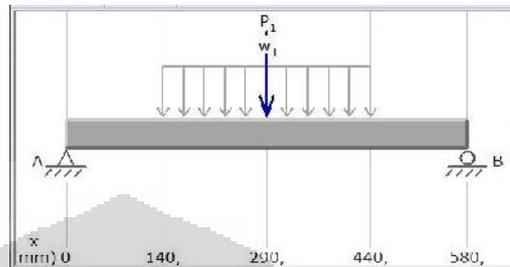
Berat total pada sumbu Y = 8,6 kg

Asumsi error 10%, berat sumbu Y = 9,46 kg (10kg)

$$P_1 = 500 \text{ N}$$

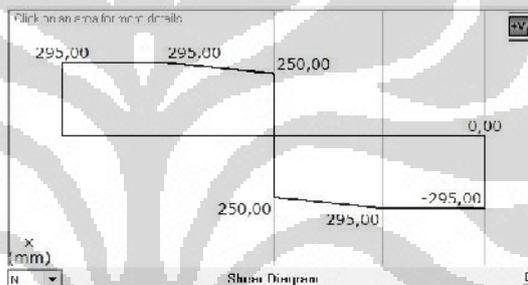
$$W_1 = 10 \text{ kg} \times 10 \text{ m/s}^2 = 100 \text{ N/300 mm} = 0,33 \text{ N/mm}$$

Free Body Diagram



Gambar 3.5 Free body diagram sumbu Y

Shear diagram

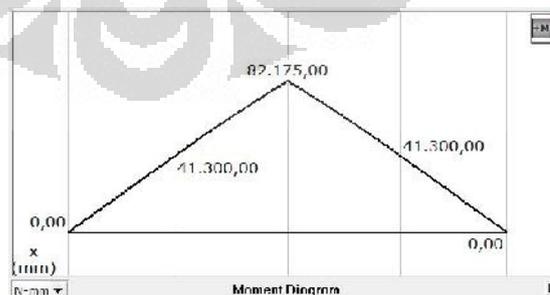


Gambar 3.6 Shear diagram sumbu Y

Dari gambar shear diagram diatas, dapat dilihat bahwa :

$$F_A = F_B = 295 \text{ N.}$$

Moment diagram



Gambar 3.7 Moment diagram sumbu Y

Momen maksimum pada sumbu-Y = 82.175 Nmm

Dari tabel linear shaft S55C, didapat $\sigma_{bmax} = 588 \text{ N/mm}^2$

Maka,

$$\sigma_{b \text{ ijin}} = \frac{\sigma_{bmax}}{Sf} \quad (3.4)$$

$Sf = 1,5$ (data material cukup, lingkungan stabil)

$$\sigma_{b \text{ ijin}} \approx 392 \text{ N/mm}^2$$

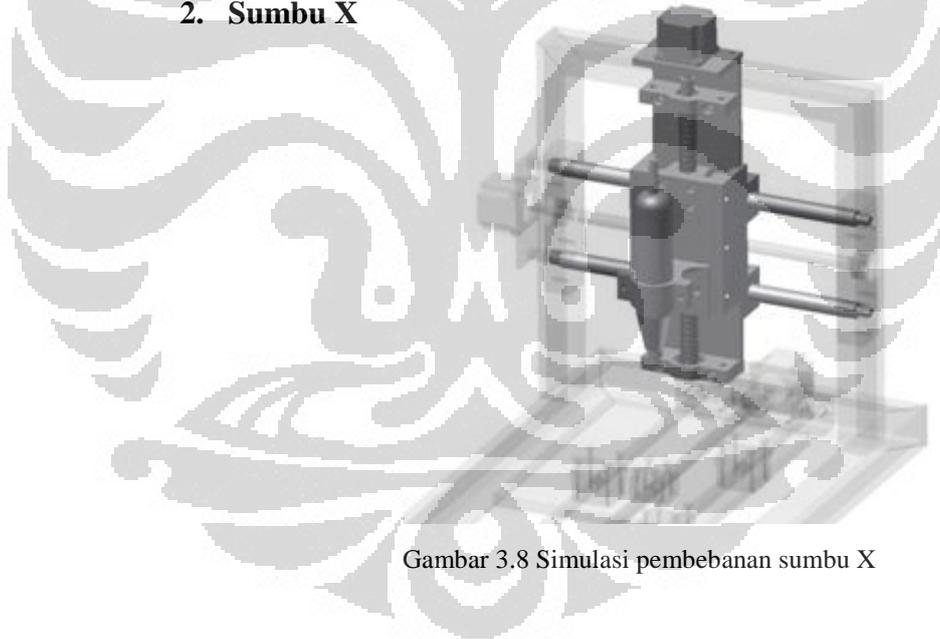
$$\sigma_{b \text{ ijin}} = \frac{Mb \times d/2}{I} \quad (3.5)$$

$$392 = \frac{82175 \times d/2}{\frac{\pi}{64} d^4}$$

$$d = 12,87 \text{ mm}$$

Diameter minimal *linear shaft* sumbu-Y > 12,87 mm

2. Sumbu X



Gambar 3.8 Simulasi pembebanan sumbu X

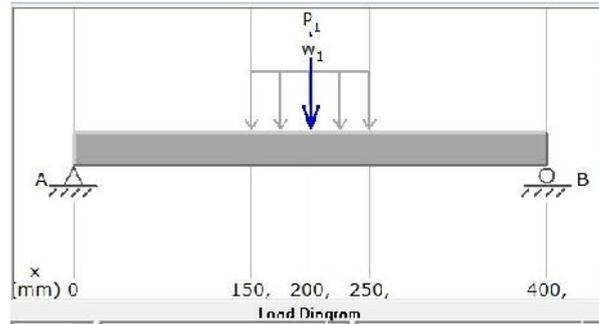
Berat total pada sumbu X = 17,5 kg

Asumsi error 10%, berat sumbu X = 19,25 kg (20kg)

$P_1 = 500 \text{ N}$

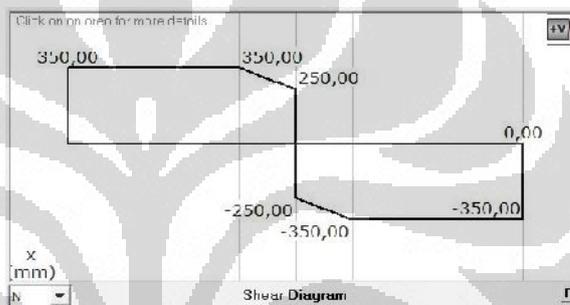
$W_2 = 20 \text{ kg} \times 10 \text{ m/s}^2 = 200\text{N}/100\text{mm} = 2 \text{ N/mm}$

Free Body Diagram



Gambar 3.9 Free body diagram sumbu X

Shear diagram

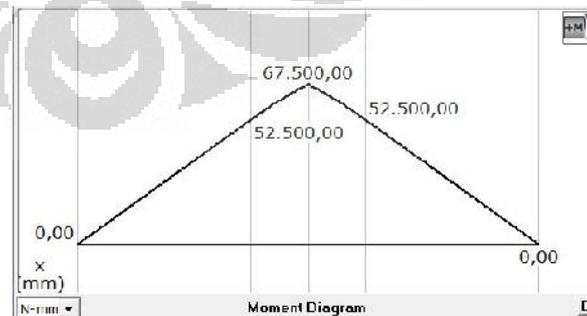


Gambar 3.10 Shear diagram sumbu X

Dari gambar shear diagram diatas, dapat dilihat bahwa :

$$F_A = F_B = 350 \text{ N.}$$

Moment diagram



Gambar 3.11 Moment diagram sumbu X

Momen maksimum = 67.500 Nmm

Dari tabel linear shaft S55C, didapat $\sigma_{bmax} = 588 \text{ N/mm}^2$

Maka,

$$\sigma_{b \text{ ijin}} = \frac{\sigma_{bmax}}{Sf} \quad (3.7)$$

$Sf = 1,5$ (data material cukup, lingkungan stabil)

$$\sigma_{b \text{ ijin}} \approx 392 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b \text{ ijin}} = \frac{Mb \times d/2}{I} \quad (3.8)$$

$$392 = \frac{67500 \times d/2}{\frac{\pi}{64} d^4}$$

$$d = 12,06 \text{ mm}$$

Diameter minimal *linear shaft* sumbu-X > 12,06 mm

Dari hasil perhitungan diatas dan memanfaatkan komponen yang sudah tersedia sebelumnya, maka diameter yang digunakan dalam pembuatan prototipe Mesin FSSMW untuk linear shaft sumbu-Y dan sumbu-X adalah sama, yakni menggunakan diameter 16 mm.

b. Bearing

Dari hasil perhitungan beban pada *linear shaft* didapat :

1. Beban *bearing* sumbu Y = 295 N = 0,29 KN
2. Beban *bearing* sumbu X = 350 N = 0,35 KN

Berdasarkan pada jumlah beban yang diterima oleh bearing tersebut serta memanfaatkan komponen yang sudah tersedia, maka *bearing* yang digunakan adalah *bearing* dengan kode 6202 dan spesifikasi sebagai berikut :

Tabel 3.2 : Spesifikasi Bearing 6202 [20]

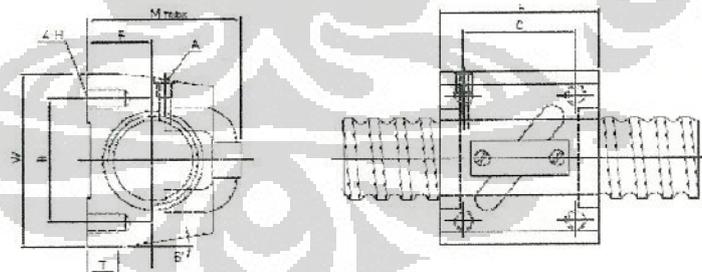
d	Boundary dimensions			Basic load ratings				Limiting speeds		
	mm			dynamic	static	dynamic	static	grease ZZ LLB	rpm	
	D	B	n_1 min ¹⁾	Cr	Cor	Cr	Cor		LLH	LLU
15	24	5	0.3	2.08	1.26	212	128	26 000	—	17 000
	28	7	0.3	3.65	2.00	375	204	24 000	—	16 000
	32	9	0.3	5.60	2.84	570	289	22 000	18 000	15 000
	35	11	0.6	7.75	3.60	790	365	19 000	18 000	15 000
	42	13	1	11.4	5.45	1 170	555	17 000	15 000	12 000

c. Torsi untuk menggerakkan beban pada *Ballscrew*

Sebelum menghitung torsi, yang nantinya akan digunakan untuk pemilihan *motor stepper*, hal yang harus dilakukan adalah menentukan dahulu type *ballscrew* yang akan digunakan.

Pemilihan *ballscrew* ini dengan pendekatan dimensi dengan *linear shaft* dan memanfaatkan ketersediaan komponen yang ada. *Ballscrew* yang digunakan dalam pembuatan mesin FSSMW ini adalah produk dari *Hiwin* dan spesifikasi dari *ballscrew* dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 3.3 : Data teknis Ballscrew dan Nut [21]



Model	Size		Ball Dia.	Circular	Dynamic Load 1×10^6 revs C (kgf)	Static Load Co. (kgf)	W	F	L	D	C	T	M (mm)
	Nominal Dia.	Lead											
14.4B1	14	4	2.381	2.5x1	376	632	24	13	35	24	22	4	20
14.4C1				2.5x1	498	943	24	13	35	24	22	4	20
14.5B1				2.5x1	626	1045	24	13	35	24	22	4	21
16.5B1	16	5	3.175	2.5x1	679	1226	42	16	36	32	22	21.5	22.5
20.5B1				2.5x1	945	1636	68	17	35	35	22	9	28
20.10D1	20	10	4.725	2.5x1	1280	2314	78	18	58	35	35	9	44

1. Torsi ballscrew pada sumbu Y

Ballscrew yang digunakan pada sumbu Y adalah type 16 5B1 dengan diameter 16 mm dan *pitch* 5 mm.

$$\text{Dik: } FY = 500 \text{ N} = 112,4 \text{ lb}$$

$$L = 5 \text{ mm} = 0,197 \text{ in (pitch)}$$

Torsi:

$$\begin{aligned} Tu &= \frac{FL}{2\pi e} = 0,177FL & (3.9) \\ &= 0,177 \cdot (112,4 \text{ lb}) \cdot (0,197 \text{ in}) \\ &= 3,92 \text{ lb-in} = 0,44 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Torsi balik:

$$\begin{aligned} Tb &= \frac{FL e}{2\pi} = 0,143FL & (3.10) \\ &= 0,143 \cdot (112,4 \text{ lb}) \cdot (0,197 \text{ in}) \\ &= 3,16 \text{ lb-in} = 0,35 \text{ Nm} \end{aligned}$$

2. Torsi ballscrew pada sumbu X

Ballscrew yang digunakan pada sumbu X adalah type 16 5B1 dengan diameter 16 mm dan *pitch* 5 mm.

$$\text{Dik: } FX = 192,5 \text{ N} = 43,28 \text{ lb}$$

$$L = 5 \text{ mm} = 0,197 \text{ in (pitch)}$$

Torsi:

$$\begin{aligned} Tu &= \frac{FL}{2\pi e} = 0,177FL & (3.11) \\ &= 0,177 \cdot (43,28 \text{ lb}) \cdot (0,197 \text{ in}) \\ &= 1,51 \text{ lb-in} = 0,17 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Torsi balik:

$$Tb = \frac{FL e}{2\pi} = 0,143FL \quad (3.12)$$

$$= 0.143. (43,28lb). (0.197in)$$

$$= 1,22 \text{ lb} - \text{in} = 0,14 \text{ Nm}$$

3. Torsi ballscrew pada sumbu Z

Ballscrew yang digunakan pada sumbu Z adalah type 20 10B1 dengan diameter 20 mm dan *pitch* 10 mm.

Dik:

$$FZ = 500 \text{ N} = 112,4 \text{ lb}$$

$$L = 10 \text{ mm} = 0,393 \text{ in (pitch)}$$

Torsi:

$$Tu = \frac{FL}{2\pi e} = 0,177FL \quad (3.13)$$

$$= 0,177. (112,4 \text{ lb}). (0,393 \text{ in})$$

$$= 7,81 \text{ lb} - \text{in} = 0,88 \text{ Nm}$$

Torsi balik:

$$Tb = \frac{FLe}{2\pi} = 0,143 FL \quad (3.14)$$

$$= 0,143. (22,48 \text{ lb}). (0,393 \text{ in})$$

Maka torsi yang dibutuhkan pada masing-masing sumbu adalah

Torsi:

Sumbu Y = 0,44 Nm

Sumbu X = 0,17 Nm

Sumbu Z = 0,88 Nm

Torsi Balik :

Sumbu Y = 0,35 Nm

Sumbu X = 0,14 Nm

Sumbu Z = 0,71 Nm

Berdasarkan pada hasil perhitungan, sumbu-Z mempunyai torsi paling besar yakni 0,88 Nm. Maka *actuator* yang akan digunakan pada prototipe ini harus mempunyai torsi $> 0,88$ Nm.

Tabel 3.4 : Spesifikasi Motor Stepper [22]

	N	A	Ohm	V	mH	Shaft	Kg	mm
23LC041-025-8W-F6-0.5	0.5	1.25	0.76	0.94	0.75	F6	0.47	41
23LC041-025-8W-F6.F6-0.5	0.5	1.25	0.76	0.94	0.75	F6 S6	0.48	41
23LC041-025-8W-F8-0.5	0.5	1.25	0.76	0.94	0.75	F8	0.47	41
23LC041-025-8W-F8.F8-0.5	0.5	1.25	0.76	0.94	0.75	F8 S8	0.48	41
23LC051-025-8W-F6.35-1.0	1	1.25	0.9	1.1	1.5	F6.35	0.63	51
23LC051-025-8W-F8-1.0	1	1.25	0.9	1.1	1.5	F8	0.63	51
23LC051-025-8W-F8.F8-1.0	1	1.25	0.9	1.1	1.5	F 8 F 8	0.64	51
23LC051-025-8W-F10-1.0	1	1.25	0.9	1.1	1.5	F10	0.63	51
23LC064-025-8W-F10-1.5	1.5	1.25	1.2	1.5	2.1	F10	0.89	64
23LC064-025-8W-F10.F10-1.5	1.5	1.25	1.2	1.5	2.1	F10 F10	0.89	64
23SM100-030-8W-F10-2.0	2	1.5	1.4	2.1	3	F10	1.5	100
23SM100-030-8W-F10.F10-2.0	2	1.5	1.4	2.1	3	F10 F10	1.5	100
23SM112-030-8W-F10-2.5	2.5	1.5	1.5	2.3	3.8	F10	1.7	112
23SM112-030-8W-F10.F10-2.5	2.5	1.5	1.5	2.3	3.8	F10 F10	1.7	112

Dari tabel spesifikasi *motor stepper* tersebut, bisa dilihat kebutuhan *motor stepper* untuk masing-masing sumbu adalah *motor stepper* Type 23LC051-025-8W-F8-1.

3.5 STRESS ANALISIS

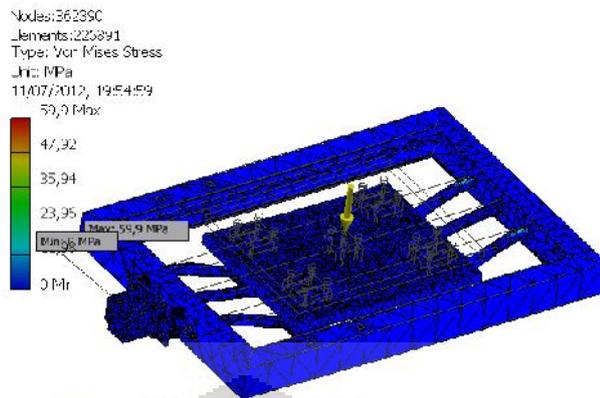
Setelah membahas simulasi pembebanan dan perhitungan mekanika, pada Subbab ini akan difokuskan mengenai *stress analysis* linear shaft pada sumbu-y dan sumbu-x. Gaya dari luar yang diterima oleh kedua sumbu tersebut sebesar 500 N ditambah dengan berat dari masing-masing beban yang ditumpu. Berikut ini tabel properties material S55C yang digunakan pada stress analisis.

Tabel 3.5 Properties material shaft S55C

General	Mass Density	7,85 g/cm ³
	Yield Strength	588 MPa
	Ultimate Tensile Strength	785 MPa
Stress	Young's Modulus	210 GPa
	Poisson's Ratio	0,3 ul
	Shear Modulus	80,7692 GPa
Stress Thermal	Expansion Coefficient	0,000012 ul/c
	Thermal Conductivity	56 W/(m K)
	Specific Heat	460 J/(kg c)
Part Name(s)	shaft dia16x580.ipt shaft dia16x580.ipt	

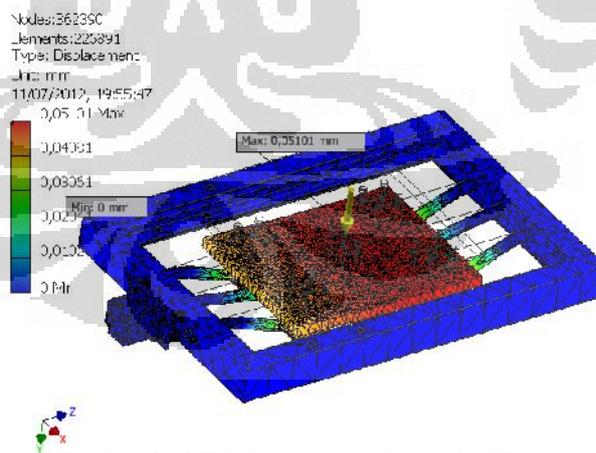
Keluaran yang diambil dari simulasi ini adalah sebaran dan besar tegangan yang dihasilkan, dari sebaran dan besar tegangan tersebut, struktur dianalisis kekuatannya dari segi material, apakah masih dalam batas aman kriteria *yield* atau tidak. *Linear shaft* pada kedua sumbu ini menggunakan material dari JIS S55C dengan sifat-sifat fisik seperti pada Tabel 3.5 dan akan dianalisis menggunakan kriteria kegagalan yang sesuai dengan jenis material yang ulet, yaitu menggunakan Teori Kegagalan Von Mises (Teori Energi Distorsi Maksimum) [17].

1. Sumbu Y



Gambar 3.12 Sebaran tegangan Von Mises pada sumbu Y

Pada Gambar 3.12 menunjukkan seluruh tegangan Von Mises yang terjadi pada sumbu-Y saat dikenakan beban dari luar sebesar 500 N. Bagian yang mendapatkan tegangan paling besar terjadi pada bagian ujung sebelah kanan dari *linear shaft*, yakni sebesar 59,9 Mpa. Tegangan ini disebabkan oleh beban merata pada meja yang ditumpu oleh *linear shaft* dan beban dari luar sebesar 500 N yang diterima oleh meja.



Gambar 3.13 Displacement pada sumbu Y

Dari hasil stress analisis dapat dilihat bahwa besarnya defleksi maksimal pada sumbu Y adalah 0,05 mm dan terjadi dimana gaya maksimum diberikan di posisi tersebut.

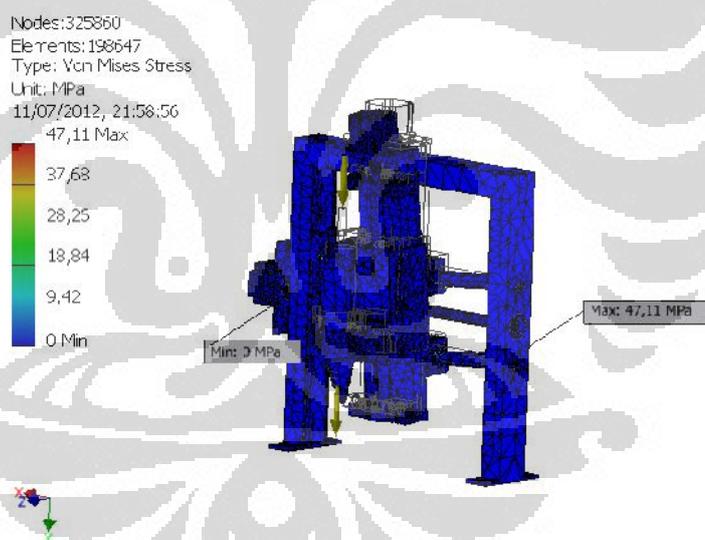
Nilai ini masih dalam batas toleransi yang diisyaratkan, yakni sebesar 0,1 mm.

Secara umum hasil stress analisis pada sumbu-Y ditunjukkan pada tabel 3.6 dibawah ini :

Tabel 3.6 Hasil stress analisis sumbu-Y

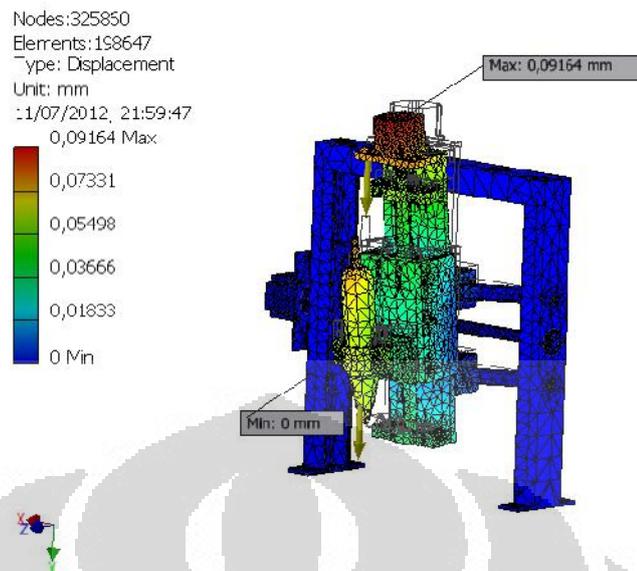
Name	Minimum	Maximum
Volume	3149520 mm ³	
Mass	24,7518 kg	
Von Mises Stress	0,0000323349 MPa	59,9029 MPa
1st Principal Stress	-15,0861 MPa	74,1591 MPa
3rd Principal Stress	-77,8961 MPa	18,9338 MPa
Displacement	0 mm	0,0510132 mm
Safety Factor	3,45559 ul	15 ul

2. Sumbu X



Gambar 3.14 Sebaran tegangan Von Mises pada sumbu X

Pada Gambar 3.14 menunjukkan seluruh tegangan Von Mises yang terjadi pada sumbu-X saat dikenakan beban dari luar sebesar 500 N. Bagian yang mendapatkan tegangan paling besar terjadi pada bagian ujung sebelah kanan bagian bawah dari *linear shaft*, yakni sebesar 47,1 Mpa. Tegangan ini disebabkan oleh beban akibat *body load* yang ditumpu oleh shaft dan akibat beban dari luar sebesar 500 N.



Gambar 3.15 Displacement pada sumbu X

Dari hasil stress analisis dapat dilihat bahwa besarnya defleksi maksimal pada sumbu Y adalah 0,09 mm dan terjadi tepat diujung bagian atas dari motor stepper sumbu Z. Nilai ini mendekati batas toleransi yang diisyaratkan yakni sebesar 0,1 mm.

Secara umum hasil stress analisis pada sumbu-X ditunjukkan pada tabel 3.7 dibawah ini :

Tabel 3.7 Hasil stress analisis sumbu-X

Name	Minimum	Maximum
Volume	3490040 mm ³	
Mass	26,0668 kg	
Von Mises Stress	0,0000131794 MPa	47,1052 MPa
1st Principal Stress	-5,32614 MPa	56,6878 MPa
3rd Principal Stress	-41,2581 MPa	11,3291 MPa
Displacement	0 mm	0,0916396 mm
Safety Factor	4,39442 ul	15 ul

Dari hasil stress analisis sumbu-Y dan sumbu-X diatas tegangan yang terjadi pada masing-masing sumbu dapat dirangkum menjadi tabel seperti dibawah ini :

Tabel 3.8 Tegangan yang terjadi pada sumbu-Y dan sumbu-X

	Sumbu Y	Sumbu X
Material	S55C	
Tegangan Yield	588 Mpa	
Tegangan Von Mises	59,9 MPa	47,1 MPa
Tegangan Utama	74,15 Mpa	56,68 Mpa
Defleksi Maksimum	0,05 mm	0,09 mm
Faktor Keamanan	3,4	4,3

Dari simulasi yang dilakukan diketahui sebaran dan besar tegangan yang terjadi pada desain prototipe mesin FSSMW dengan pembebanan statis. Masing-masing tegangan yang terjadi, baik pada sumbu-Y maupun sumbu-X masih berada pada batas kekuatan material sehingga mesin ini sudah memenuhi persyaratan kinematika dan fungsional dan dianggap mampu menerima pembebanan yang akan diterima saat beroperasi [17].

Demikian pula dari hasil simulasi, besarnya defleksi maksimum pada linear shaft yang digunakan menunjukkan dalam batas toleransi yang diisyaratkan, yakni sebesar 0,1 mm.

Nilai faktor keamanan yang digunakan pada analisis ini adalah 1,5 - 2 untuk struktur yang telah diketahui dengan baik material dan pembebanannya. Faktor Keamanan untuk tiap material pada masing-masing sumbu dianggap sangat memenuhi dengan nilai keamanan terkecil pada sumbu-Y yaitu sebesar 3,4 [18].

3.6 MANUFAKTUR

Setelah proses simulasi pembebanan dan stress analisis, perhitungan mekanika komponen serta pembuatan gambar teknik telah dilakukan, maka langkah selanjutnya adalah proses manufaktur.

Tahapan pada proses manufaktur ini meliputi pemilihan :

1. Actuator

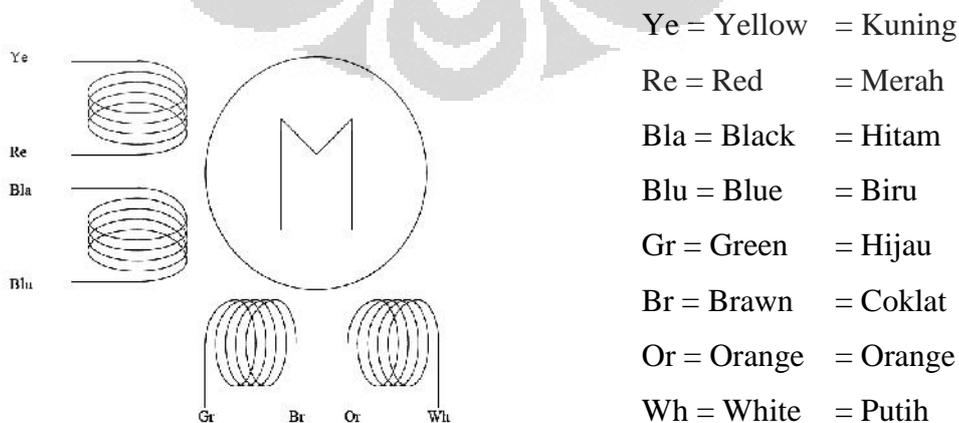
Perhitungan torsi pada *ballscrew*, menunjukkan bahwa sumbu X mempunyai torsi yang paling besar, yaitu 0,17 Nm sehingga kebutuhan *motor stepper* untuk masing-masing sumbu dibuat sama untuk memudahkan dalam penyediaan barang dan pembuatan komponen yang berhubungan dengan *motor stepper*.

Motor stepper yang digunakan adalah :



Type: 23LC051-025-8W-F8-1
 Voltage: 0.94 Vdc / Phase
 Current: 1.25 Amp/Phase
 Number Phase: 2
 Step Angel: 1.8 Degree
 Torque: 1 Nm

Gambar 3.16 Motor stepper 23LC051-025-8W-F8-1 [22]



Gambar 3.17 Konfigurasi pengkabelan Motor Stepper [22]

Bipolair Parallel: Motor Driver

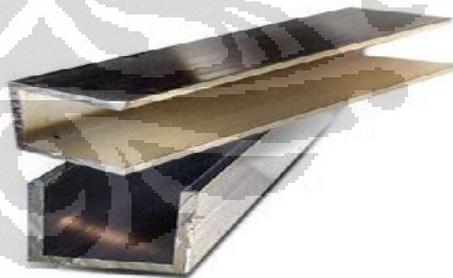
Ye + Bl	A+
Re + Blu	A
Gr+ Or	B+
Br + Wh	B
Maksimum Torsi = 0.5 Nm	
Maksimum Arus = 2 * Arus / <i>coil</i>	
<i>Self Induction = Induction / coil</i>	

Unipolair: Motor Driver

Ye	A+
Re + Bl	+ V
Br + Or	+V
Wh	B
Blu	A
Gr	B+

Bipolair Serieel: Motor Driver

Ye	A+
Re + Bl	
Blu	A
Gr	B+
Br + Or	
Wh	B
Maksimum Torsi = 0.5 Nm	
Maksimum Arus = Arus / <i>coil</i>	
<i>Self Induction = 4* Induction / coil</i>	

2. Rangka kontruksi

Gambar 3.18 Besi profil kanal U

Besi profil kanal U digunakan sebagai bahan pembuatan rangka mekanik *prototype* mesin FSSMW. Dipilihnya besi profil kanal ini karena baja ini mempunyai daya tarik yang tinggi (400-900 Mpa), kemampuan untuk melakukan deformasi cukup baik, dan

ketersediaan di pasaran cukup banyak. Untuk penyambungan besi profil kanal ini digunakan pengelasan pada setiap titik sambungan.

Tabel 3.9 Ukuran Besi profil kanal U

Dimensi Aksis	Panjang	Lebar
Aksis Y	580mm	400mm
Aksis X	450mm	400mm

3. *Spindle Motor*



Gambar 3.19 Mini Grinder

Motor *spindle* merupakan penggerak utama mesin yang digunakan untuk memotong dan memakan benda kerja. Pada *prototype* mesin ini menggunakan *mini grinder* sebagai motor *spindle*-nya dengan spesifikasi :

Tabel 3.10 Spesifikasi Mini grinder

Voltase	220V ~ 50 Hz
Kecepatan putar	10.000 – 35.000 /min
Jangkauan <i>clamping</i>	3,2 mm
Berat	0,61 Kg
Daya	135 watt
<i>Vibration aw</i>	3,5 m/s ²

4. Standard Part

Standard part yang digunakan dalam pembuatan *prototype* ini antara lain adalah *ballscrew*, *linear shaft*, *bearing*, *bushing single closed* dan *hexagon socket head cap screw* (Baut L).

Berikut ini daftar komponen standar yang dipakai dalam pembuatan *prototype* mesin FSSMW :

Tabel 3.11 Standard part prototype mesin FSSMW

No	Standard Part	Type	Picture	Quantity
1	Ballscrew	Hiwin 16 5B1		2 pcs
		Hiwin 20 5B1		1 psc
2	Linear Shaft	S 55 C Ø 16 x 420		2 pcs
		S 55 C Ø 16 x 600		2 pcs
3	Bearing	6202 ZZ		6 pcs
4	Bushing Closed Single	Ø 16 x 50		4 pcs
5	Hexagon socket head cap screw (Baut L)	M 5 x 20		24 pcs
		M 6 x 50		16 pcs
		M 6 x 70		12 pcs
		M 6 x 30		36 pcs
		M 10 x 40		6 pcs

Disamping pemilihan komponen seperti yang dijelaskan sebelumnya kegiatan pembangunan sistem kontrol sederhana untuk menggerakkan kedua sumbu pada prototipe ini (sumbu Y dan sumbu Z) juga termasuk dalam tahapan proses manufaktur.



Gambar 3.20 Rangkaian elektikal penggerak sumbu mesin.

Komponen elektrik yang digunakan untuk menggerakkan *motor stepper* antara lain adalah mikrokontroler, *driver stepper*, dan *power supply*.

Ketiga komponen tersebut dirangkai sehingga bisa menggerakkan motor stepper. Rangkaian pada komponen elektrik ditunjukkan pada Gambar 3.16

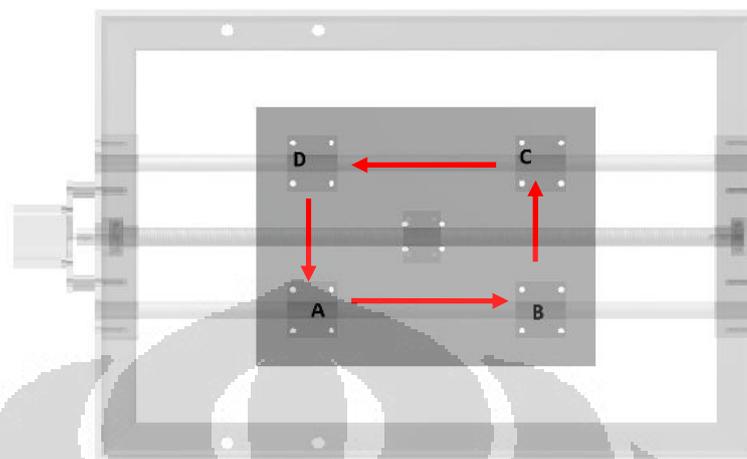
3.7 PENGUJIAN MESIN

Dalam sebuah pembuatan diperlukan adanya pengujian. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa prototipe mesin FSSMW dapat bergerak dan berfungsi sesuai dengan kebutuhan. Pengujian yang dilakukan salah satunya adalah pengujian kesejajaran meja kerja (*table*).



Gambar 3.21 Pengujian kesejajaran *table*

Pada pengujian kepresisian kesejajaran menggunakan *dial indicator* yang ditempel pada sumbu Z. Kemudian *dial* digerakan sesuai dengan gambar 3.18



Gambar 3.22 Arah pergerakan dial indicator

Tabel 3.12 Hasil pengujian kesejajaran

Posisi pergerakan Dial	Ketidaksejajaran		
	UJI 1	UJI 2	UJI 3
A ke B	0.02 mm	0.03 mm	0.03 mm
B ke C	0.03 mm	0.02 mm	0.02 mm
C ke D	0.01 mm	0.02 mm	0.01 mm
D ke A	0.02 mm	0.02 mm	0.03 mm

Dari hasil pengujian tersebut terlihat bahwa kesejajaran meja maksimal sebesar 0,03 mm. Untuk proses pengelasan metode FSSMW ketidaksejajaran sebesar 0,03 mm ini masih dibatas toleransi yang diijinkan, mengingat ketelitian mesin ini sebesar 0,1 mm.

3.8 SPESIFIKASI MESIN

Untuk mempermudah dalam pengoperasian, berikut ini adalah penjelasan tentang spesifikasi prototipe mesin FSSMW yang dibuat :



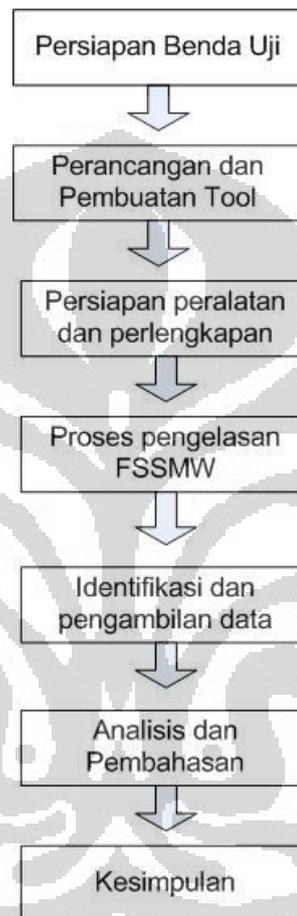
Gambar 3.23 Prototipe mesin FSSMW

Tabel 3.13 Spesifikasi prototipe mesin FSSMW

<i>Travel</i>		
	<i>Max.Travel Aksis X</i>	170 mm
	<i>Max.Travel Aksis Y</i>	200 mm
	<i>Max.Travel Aksis Z</i>	120 mm
<i>Dimensi</i>		
	Panjang Mesin	580 mm
	Lebar Mesin	400 mm
	Tinggi Mesin	430 mm
<i>Spindle</i>		
	Clamping range	3.2 mm
	<i>Speed</i>	10000-35000 min ⁻¹
<i>Table</i>		
	Panjang Meja Kerja	300 mm
	Lebar Meja Kerja	250 mm
<i>Benda kerja</i>		
	Plat tipis Aluminium	Al. < 1 mm

BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

Dalam melakukan pengujian ini ada beberapa langkah yang dilakukan, dan dituangkan dalam diagram alir dibawah ini :



Gambar 4.1. Diagram alir percobaan FSSMW

4.1 BENDA UJI

Benda uji pengelasan (*speciment*) yang akan digunakan adalah Aluminium A1050-H16 dengan ketebalan 400 μm . Dalam dunia industri material tersebut banyak digunakan dalam bidang perlengkapan pabrik kimia, industri pengemasan makanan, lampu reflektor, selubung kabel, dll.

Berikut ini adalah sifat dari AA 1050 [23]

Tabel 4.1 : Chemical Composition AA 1050

Elemen	% Present
Cu	0 - 0,05
Mg	0 - 0,05
Si	0 - 0,25
Fe	0 - 0,4
Mn	0 - 0,05
Zn	0 - 0,07
Ti	0 - 0,05
Al	Balance

Tabel 4.2 : Mechanical properties AA 1050

Temper	H12	H14	H16	H18	0
Proof Stress 0,2% (MPa)	85	105	120	140	35
Tensile Strength (MPa)	100	115	130	150	80
Shear Strength (MPa)	60	70	80	85	50
Elongation A5 (%)	12	10	7	6	42
Hardness Vickers (HV)	30	36	-	44	20

Tabel 4.3 : Physical properties AA 1050

Property	Value
Density	2,71 kg/cm ³
Melting Point	650°C
Modulus of Elasticity	71 GPa
Electrical Resistivity	0,0282x10 ⁻⁶ Ω.m
Thermal Conductivity	222 W/m.K
Thermal Expansion	24x10 ⁻⁶ /K

Tabel 4.4 : Fabrication response for AA 1050

Process	Rating
Workability - Cold	Excellent
Machinability	Poor
Weldability - Gas	Excellent
Weldability - Arc	Excellent
Weldability - Resistance	Excellent
Brazability	Excellent
Solderability	Excellent

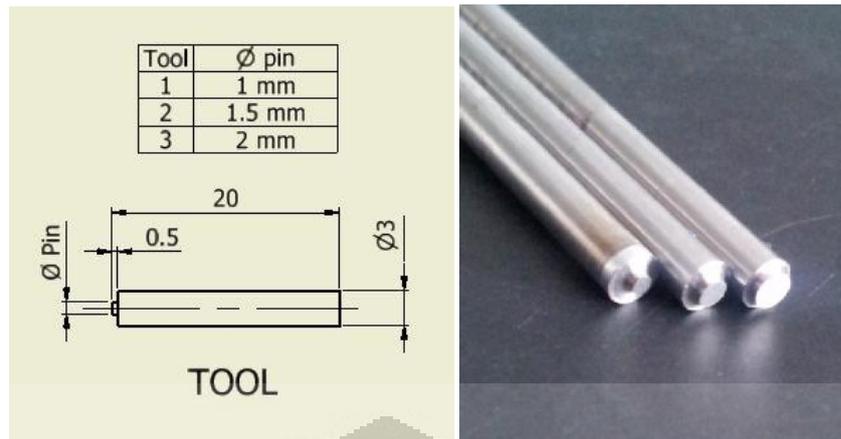
Material lembaran plat AA 1050 dipotong dengan ukuran 50 mmx100 mm seperti pada Gambar 4.2



Gambar 4.2 Material AA1050-H16 untuk uji metode FSSMW

4.2 TOOL GEOMETRY

Tool merupakan bagian utama dari proses FSSMW. Ada tiga desain *tool* yang dibuat untuk percobaan kali ini, secara umum bentuk dan ukuran *shoulder* sama, perbedaannya terletak pada diameter pada *pin*-nya. Untuk lebih jelasnya bisa dilihat pada Gambar 4.3



Gambar 4.3 Variasi Tool Geometry

Tool menggunakan *toolbit* diameter 3 mm dari material *High Speed Steel* (HSS) dan dibentuk dengan proses penggerindaan untuk membuat diameter *pin*.

4.3 PERSIAPAN PERALATAN

Dalam percobaan kali ini putaran *spindle* mesin menggunakan *mini grinder* dengan spesifikasi sama dengan yang digunakan pada prototipe mesin FSSMW yang dibuat pada Bab 3.

Mini grinder tersebut dipasang pada *spindle* mesin *Milling CNC* Makino KE55. Cara pemasangan pada mesin *Milling CNC* dengan membuat *attachment* seperti pada Gambar 4.4



Gambar 4.4 *Attachment* mini grinder ke spindle mesin milling CNC

Untuk menghitung secara akurat kecepatan putaran *spindle* dari *mini grinder* tersebut menggunakan alat Vibrotest 60, seperti terlihat pada Gambar 4.5



Gambar 4.5 Vibrotest 60

4.4 PROSES *FRICTION STIR SPOT MICRO WELDING*

Setelah benda uji, tool pengelasan dan mesin siap maka langkah selanjutnya adalah proses pengujian. Langkah proses pengelasan FSSMW adalah:

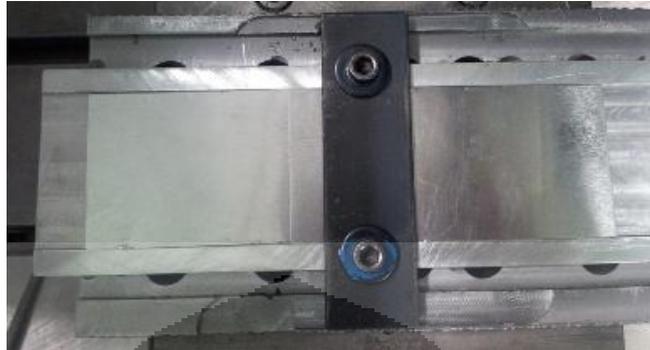
1. Pasang *tool* pada *mini grinder*, kemudian pasang *mini grinder* pada *spindle* mesin *milling* dengan *attachment* yang telah dibuat.



Gambar 4.6 Mini grinder terpasang pada mesin CNC.

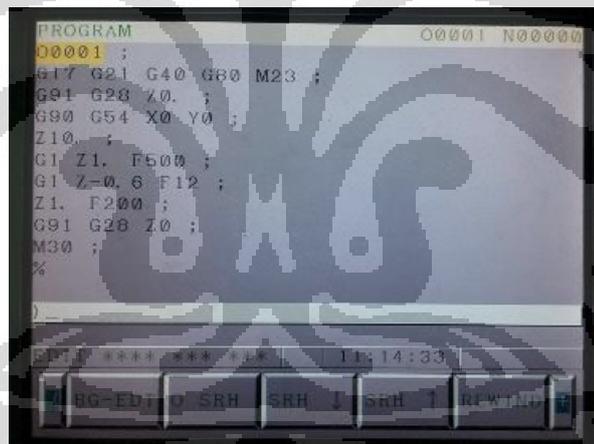
2. Setting kecepatan putaran *spindle* pada *mini grinder* sesuai dengan yang diinginkan (15000 rpm, 20000 rpm, dan 25000 rpm) cek dengan menggunakan Vibrotest 60.

- Cekam benda uji pada *jig* yang telah dibuat, *jig* kemudian dicekam ke ragum rata.



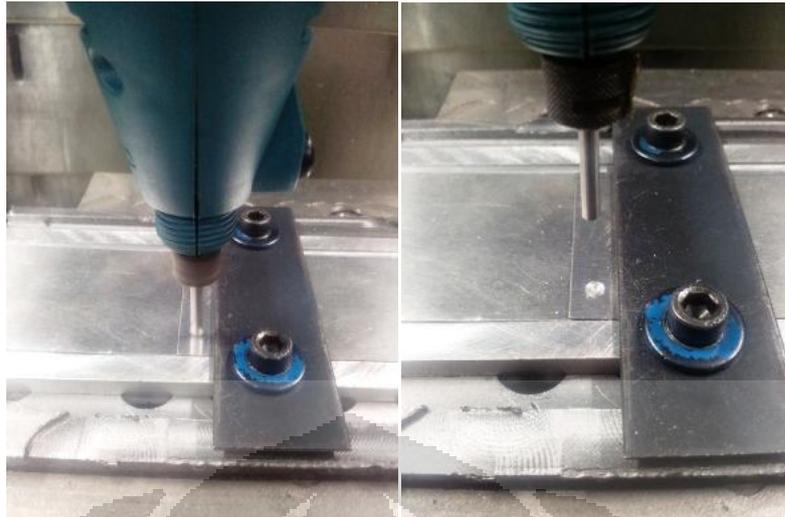
Gambar 4.7 Benda uji dicekam dengan *jig*

- Buat program pemakanan kebawah pada mesin Milling CNC dengan kedalaman 600 μm dan kecepatan tempuh bervariasi (12 mm/menit, 18 mm/menit dan 24 mm/menit).



Gambar 4.8 Program CNC untuk proses FSSMW

- Putar *mini grinder* dengan rpm yang telah ditentukan, jalankan program pada mesin CNC, masukkan kedalam benda uji dengan kedalaman 600 μm .



Gambar 4.9 Proses sebelum dan setelah FSSMW

6. Matikan *spindle* putaran pada *mini grinder*, lepas benda uji dan berikan *marking* nomer pada benda uji.



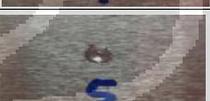
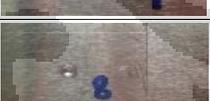
Gambar 4.10 *Marking* nomer pada spesimen

4.5 PENGAMBILAN DATA DAN ANALISIS

4.5.1 Analisis Visual (*Non Destructif Test*)

Setelah proses FSSMW selesai yang dilakukan dengan berbagai variasi parameternya, maka hal selanjutnya yang dilakukan adalah analisis visual. Berikut adalah hasil yang didapatkan dari pengamatan visual :

Tabel 4.5 : Pengamatan Visual Hasil Pengelasan FSSMW

No. Spesimen	à Pin (mm)	Rpm	travel feed (mm/menit)	Pengamatan Visual	Keterangan
1	1	15000	12		halus
2	1	15000	18		halus
3	1	15000	24		halus
4	1	20000	12		halus
5	1	20000	18		halus
6	1	20000	24		halus
7	1	25000	12		halus
8	1	25000	18		halus
9	1	25000	24		halus
10	1,5	25000	12		kasar
11	1,5	25000	18		halus
12	1,5	25000	24		halus
13	1,5	25000	12		kasar
14	1,5	25000	18		kasar
15	1,5	25000	24		kasar

16	1,5	25000	12		kasar
17	1,5	25000	18		kasar
18	1,5	25000	24		halus
19	2	25000	12		kasar
20	2	25000	18		kasar
21	2	25000	24		kasar
22	2	25000	12		kasar
23	2	25000	18		kasar
24	2	25000	24		kasar
25	2	25000	12		kasar
26	2	25000	18		kasar
27	2	25000	24		kasar

Jika dibuat matriknya, maka akan ditunjukkan seperti tabel dibawah ini :

Tabel 4.6 : Matrik Visual Hasil Pengelasan FSSMW

No. Spesimen	Diameter pin (mm)	Rpm	Travel feed (mm/menit)	Surface	
				Halus	Kasar
1	1	15000	12	●	
2			18	●	
3			24	●	
4		20000	12	●	
5			18	●	
6			24	●	
7		25000	12	●	
8			18	●	
9			24	●	
10	1,5	15000	12		●
11			18	●	
12			24	●	
13		20000	12		●
14			18		●
15			24		●
16		25000	12		●
17			18		●
18			24	●	
19	2	15000	12		●
20			18		●
21			24		●
22	20000	12		●	
23		18		●	
24		24		●	
25	25000	12		●	
26		18		●	
27		24		●	

Dari data tersebut bisa dilihat bahwa percobaan pengelasan yang menghasilkan permukaan sambungan (*weld joint surface*) yang halus

menggunakan tool dengan diameter pin 1 mm (*tool 1*). Sedangkan tool dengan diameter pin 2 mm (*tool 3*) tidak menghasilkan permukaan sambungan yang halus. Oleh karena itu variasi dari parameter kecepatan putar dan kecepatan tempuh (*travel feed*) sama sekali tidak mempengaruhi kekasaran dari permukaan pengelasan, karena faktor yang mempengaruhi kekasaran permukaan adalah dari perbedaan diameter *pinnya*. Kesimpulan sementara yang bisa diambil bahwa semakin kecil diameter pin, akan menghasilkan kekasaran permukaan sambungan yang halus.

4.5.2 Uji Tarik (*Destruktif Test*)

Setelah proses pengamatan visual selesai, maka hal selanjutnya yang dilakukan adalah pengujian kekuatan tarik (*tensile strength*) pada spesimen tersebut. Mesin yang digunakan adalah Mesin Uji Tarik dengan *Brand* Galdabini dan beban maksimal yang dapat diuji adalah 2500N.



Gambar 4.11 Mesin Uji Tarik Galdabini

Data yang diambil oleh mesin ini yang kemudian diolah menjadi data-data sifat mekanik adalah:

1. *Force* (beban), data ini diperoleh dari pembacaan *load cell* pada mesin.
2. *Elongation* (regangan), diperoleh dari pembacaan extensometer.
3. *Displacement*, diperoleh dari putaran motor servo yang menggerakkan mesin.

Data yang dihasilkan dari mesin ini merupakan data digital yang diproses dengan komputer, oleh karena itu grafik *Stress-Strain* dapat langsung diperoleh.

Parameter yang digunakan dalam pengujian tarik kali ini adalah sebagai berikut :

- Load Cell : 2500 N
- Test Speed : 5 mm/min
- Sample Length : 150 mm
- Sample Width : 25 mm
- Sample Type : RECTANGULAR
- Pre-Tension : OFF

Berikut ini adalah hasil yang diperoleh :

Tabel 4.7 : Hasil Uji Tarik FSSMW pada Material AA 1050

No. Spesimen	Diameter pin (mm)	Spindle speed (rpm)	Travel feed (mm/menit)	Stress @ Peak N/mm ²	
1	1	15000	12	26,25	
2			18	42,25	
3			24	42,50	
4		20000	12	27,00	
5			18	9,75	
6			24	10,17	
7		25000	12	18,67	
8			18	5,58	
9			24	59,50	
10		1,5	15000	12	60,92
11				18	26,58
12				24	28,00
13	20000		12	55,42	
14			18	7,92	
15			24	29,33	
16	2	25000	12	24,17	
17			18	13,50	
18			24	13,83	
19		15000	12	25,00	
20			18	13,50	
21			24	19,42	
22		20000	12	80,25	
23	18		44,00		

24		24	51,00
25	25000	12	92,17
26		18	38,58
27		24	45,92

4.6 Response surface methodology (RSM)

Metode permukaan respon (*Response Surface Methodology*) adalah suatu kumpulan dari teknik-teknik statistika dan matematika yang berguna untuk menganalisis permasalahan tentang beberapa variabel bebas yang mempengaruhi variabel tak bebas dari respon, serta bertujuan mengoptimumkan respon. Dengan demikian, metodologi permukaan respon dapat dipergunakan untuk mencari suatu fungsi pendekatan yang cocok untuk meramalkan respon yang akan datang dan menentukan nilai-nilai variabel bebas yang mengoptimumkan respon yang telah dipelajari [24].

Pada metodologi permukaan respon, variabel bebas didefinisikan sebagai X_1, X_2, \dots, X_K dan diasumsikan sebagai variabel kontinyu, sedangkan respon didefinisikan sebagai variabel tak bebas Y yang merupakan variabel acak [24].

Pada hasil analisis uji tarik kali ini, variabel bebas didefinisikan sebagai :

A = diameter pin, B = putaran spindle, C = kecepatan tempuh, sedangkan responnya (Y) adalah hasil dari uji tariknya.

Untuk lebih jelasnya bisa dilihat pada tabel 4.8

Tabel 4.8 : Notasi dan level variabel bebas

No	Parameter	Satuan	Notasi	Level		
				-1	0	1
1	Diameter pin	mm	A	1	1,5	2
2	Putaran spindle	rpm	B	15000	20000	25000
3	Kecepatan tempuh	mm/menit	C	12	18	24

Setelah menentukan notasi dan variabel bebas, langkah selanjutnya adalah membuat desain matriks dari hasil percobaan, yang nantinya dari matriks ini akan didapatkan sebuah persamaan umum untuk mengoptimalkan respon yang telah didapat.

Tabel 4.9 : Desain matriks dari hasil percobaan

No	Coded value			Original value			Tensile Stress
	A	B	C	Pin dia.	Spindle speed	Travel speed	N/mm ²
1	-1	-1	-1	1	15000	12	26,25
2	-1	-1	0	1	15000	18	42,25
3	-1	-1	1	1	15000	24	42,50
4	-1	0	-1	1	20000	12	27,00
5	-1	0	0	1	20000	18	9,75
6	-1	0	1	1	20000	24	10,17
7	-1	1	-1	1	25000	12	18,67
8	-1	1	0	1	25000	18	5,58
9	-1	1	1	1	25000	24	59,50
10	0	-1	-1	1,5	15000	12	60,92
11	0	-1	0	1,5	15000	18	26,58
12	0	-1	1	1,5	15000	24	28,00
13	0	0	-1	1,5	20000	12	55,42
14	0	0	0	1,5	20000	18	7,92
15	0	0	1	1,5	20000	24	29,33
16	0	1	-1	1,5	25000	12	24,17
17	0	1	0	1,5	25000	18	13,50
18	0	1	1	1,5	25000	24	13,83
19	1	-1	-1	2	15000	12	25,00
20	1	-1	0	2	15000	18	13,50
21	1	-1	1	2	15000	24	19,42
22	1	0	-1	2	20000	12	80,25
23	1	0	0	2	20000	18	44,00
24	1	0	1	2	20000	24	51,00
25	1	1	-1	2	25000	12	92,17
26	1	1	0	2	25000	18	38,58
27	1	1	1	2	25000	24	45,92

Hasil uji tarik dari FSSMW (Y) adalah fungsi dari variasi parameter diameter *pin tool* (A), putaran *spindle* (B), dan kecepatan tempuh (C), dan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$Y = f(A, B, C) \quad (4.1)$$

Persamaan umum *second-order polynomial (regression)* yang digunakan untuk mewakili respon Y sebagai berikut [22] :

$$Y = k_0 + \sum_{i=1}^n k_i . x_i + \sum_{i=1}^n k_{ii} . x_i^2 + \sum_{i=1}^n k_{ij} . x_i . x_j \quad (4.2)$$

Sehingga didapat persamaan dari ketiga faktor parameter yang digunakan dalam pengelasan FSSMW adalah :

$$Y = k_0 + k_1A + k_2B + k_3C + k_4AB + k_5AC + k_6BC + k_7A^2 + k_8B^2 + k_9C^2 \quad (4.3)$$

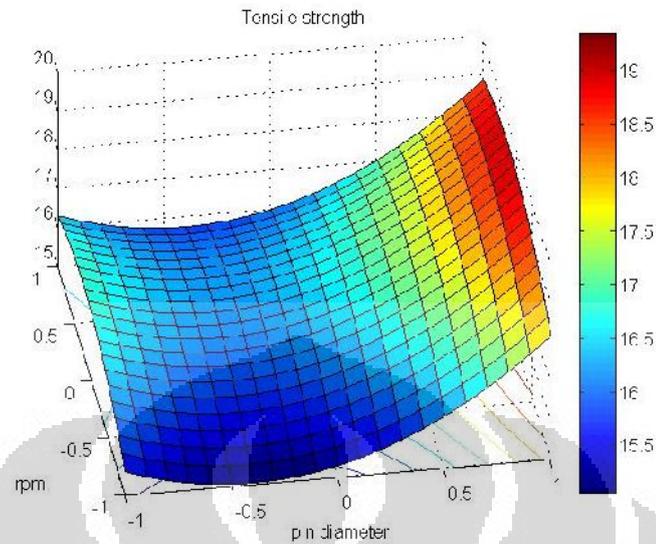
Dimana k_0 : rata-rata dari respon sedangkan k_1, k_2, \dots, k_9 adalah koefisien regresi.

Nilai dari k_0, k_1, \dots, k_9 dapat dicari dengan bantuan *software* Matlab sehingga didapat :

$$Y = 3,8511 + 1,2801A + 0,3431B - 1,0257C + 1,6333AB - 0,3219AC - 0,6472BC + 1,5853A^2 - 0,7818B^2 - 0,5654C^2 \quad (4.4)$$

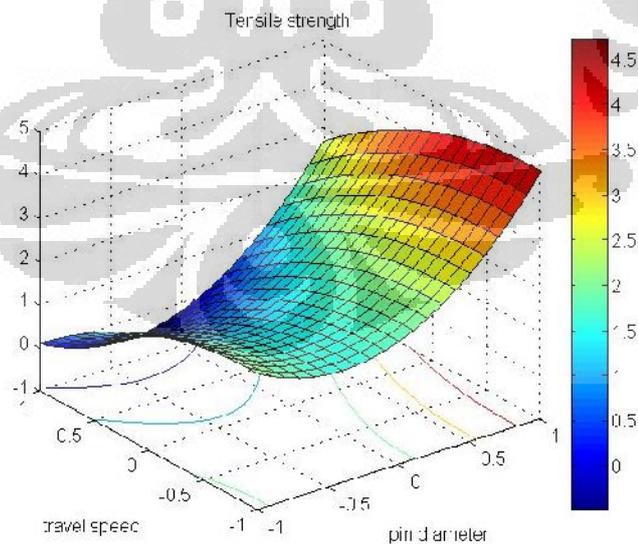
Dari persamaan diatas dan dengan bantuan *software* Matlab, maka metode RSM ini akan menghasilkan grafik sehingga bisa mengetahui parameter mana yang dapat menghasilkan kekuatan tarik paling optimal serta bisa meramalkan respon yang akan datang dan menentukan nilai-nilai variabel bebas yang mengoptimumkan respon yang telah didapat.

Berikut adalah grafik hasil analisis RSM dengan menggunakan Matlab :



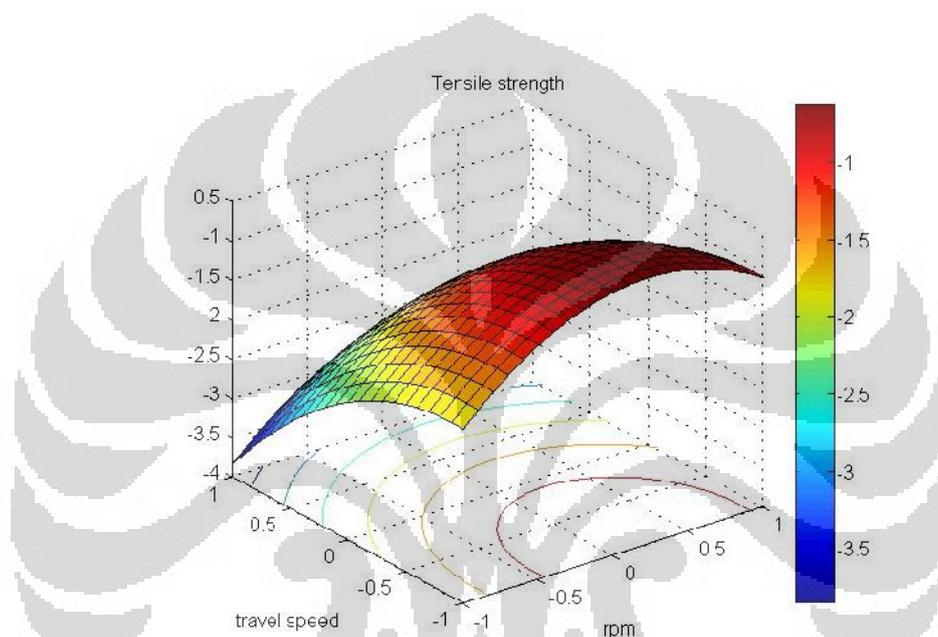
Gambar 4.12 Grafik hubungan antara diameter *pin* dan rpm terhadap kekuatan tarik.

Gambar 4.12 menunjukkan grafik bahwa semakin besar diameter *pin tool* dan semakin tinggi putaran *spindle* akan menghasilkan kekuatan tarik yang semakin tinggi karena semakin besar *pin tool* akan membuat *contact area* dengan material semakin besar serta kecepatan putar yang tinggi akan menghasilkan temperatur yang tinggi dengan tingkat pendinginan yang lambat [7] [8].



Gambar 4.13 Grafik hubungan antara diameter *pin* dan *travel speed* terhadap kekuatan tarik.

Gambar 4.13 menunjukkan grafik bahwa semakin besar diameter *pin* dan semakin lambat *travel feed* akan mengakibatkan semakin besar kekuatannya karena semakin besar *pin tool* akan membuat *contact area* dengan material semakin besar serta semakin lambat *travel speed* membuat *contact area* antara *pin tool* dengan material semakin lama sehingga menghasilkan temperatur yang tinggi dengan tingkat pendinginan yang lambat [7] [8].



Gambar 4.14 Grafik hubungan antara rpm dan *travel speed* terhadap kekuatan tarik.

Gambar 4.14 menunjukkan grafik bahwa semakin lambat kecepatan tempuh dan tingginya putaran spindle akan menghasilkan kekuatan tarik yang tinggi, karena dengan lambatnya kecepatan tempuh mengakibatkan *contact* antara *pin tool* dengan material semakin lama yang mengakibatkan temperatur tinggi dengan kecepatan pendinginan lambat [7] [8].

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

1. Dari hasil pembuatan prototipe mesin FSSMW dapat disimpulkan sebagai berikut :

Prototipe mesin FSSMW dapat digerakkan dengan menggunakan *microcontroller* sederhana untuk sumbu-Y dan sumbu-Z.

2. Dari hasil pengamatan visual dan pengujian tarik material plat Aluminium AA1050-H16 ketebalan 400 μm dengan metode FSSMW yang menggunakan mesin *Milling CNC* dan *mini grinder* sebagai *spindle* putaran disimpulkan sebagai berikut :

- a. Semakin kecil diameter *pin tool* akan semakin halus kualitas permukaan hasil pengelasan, tetapi kekuatan tariknya rendah, demikian juga sebaliknya semakin besar diameter *pin tool* akan semakin kasar kualitas permukaan hasil pengelasan, tetapi kekuatan tariknya tinggi.
- b. Semakin pelan *travel feed* yang digunakan dan semakin tinggi kecepatan putaran *spindle* akan meningkatkan kekuatan tariknya, tetapi tidak mempengaruhi kekasaran permukaan hasil pengelasan.

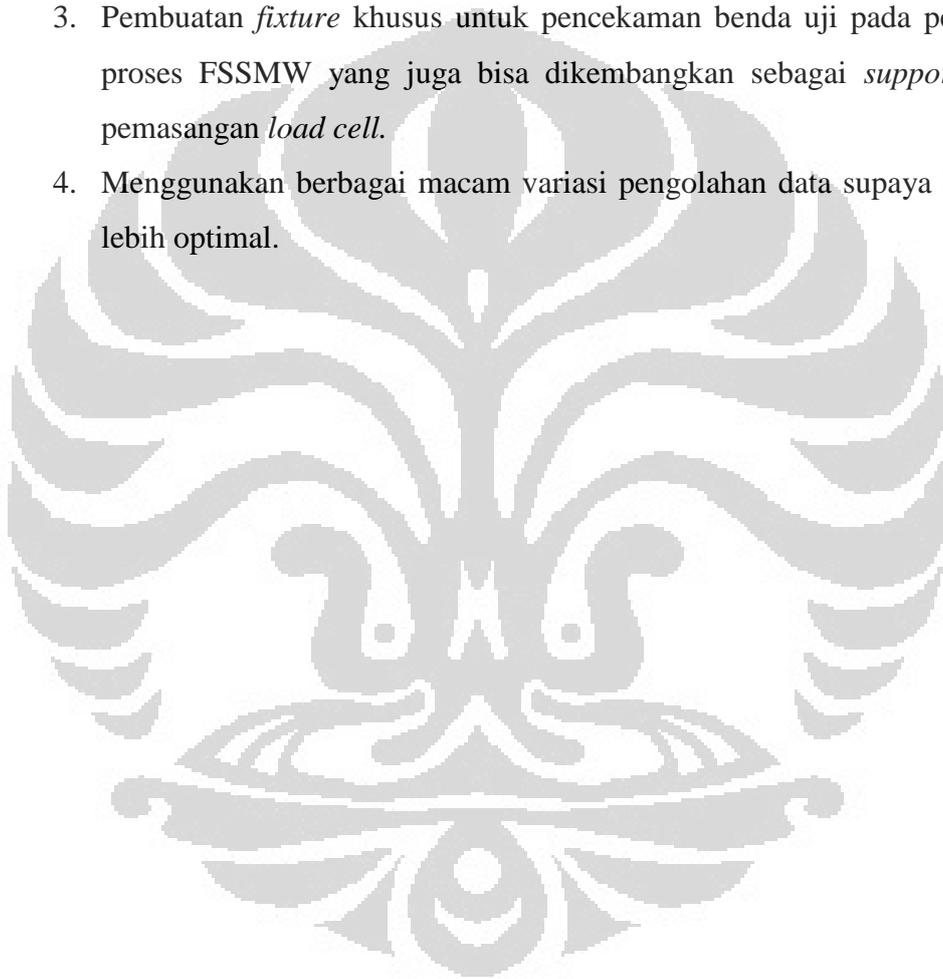
5.2 SARAN PENELITIAN LEBIH LANJUT

Pada pembuatan prototipe mesin FSSMW :

1. Untuk kelanjutan penelitian disarankan penggantian *spindle* agar dapat melakukan penetrasi penekanan dengan kuat.
2. Menambah gerakan untuk sumbu X.
3. Penambahan *counterweight* pada sumbu Z supaya gerakan sumbu Z lebih terkontrol.
4. Pembuatan *control* untuk masing-masing sumbu, supaya bisa digerakkan secara otomatis.

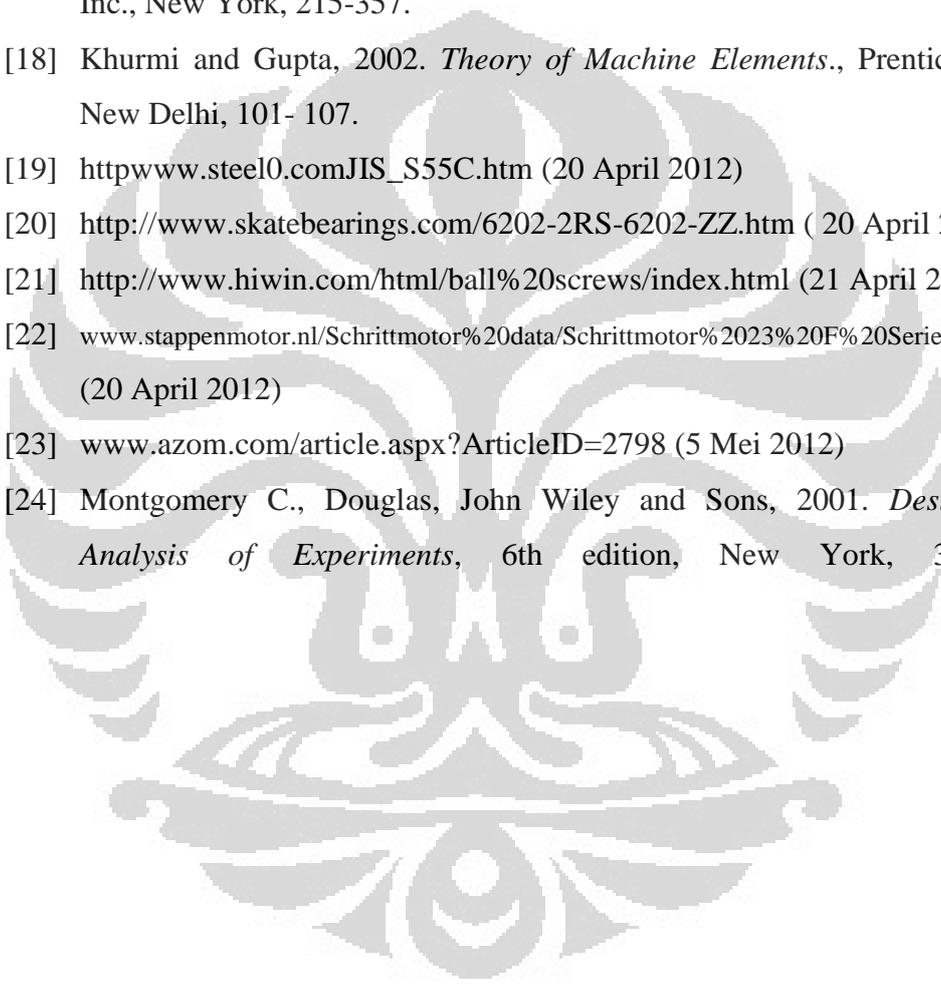
Pada pengamatan visual dan pengujian tarik material AA1050-H16 :

1. Penelitian difokuskan pada salah satu parameter (*tool geometry*, kecepatan putar, kecepatan tempuh) dengan jumlah benda uji yang cukup banyak untuk mengetahui variasi hasil pengelasan yang lebih luas.
2. Pengujian yang dilakukan bisa lebih bervariasi (pengujian X-ray, uji kekerasan dan struktur makro) supaya parameter yang didapatkan lebih beragam.
3. Pembuatan *fixture* khusus untuk pencekaman benda uji pada pengujian proses FSSMW yang juga bisa dikembangkan sebagai *support* untuk pemasangan *load cell*.
4. Menggunakan berbagai macam variasi pengolahan data supaya hasilnya lebih optimal.



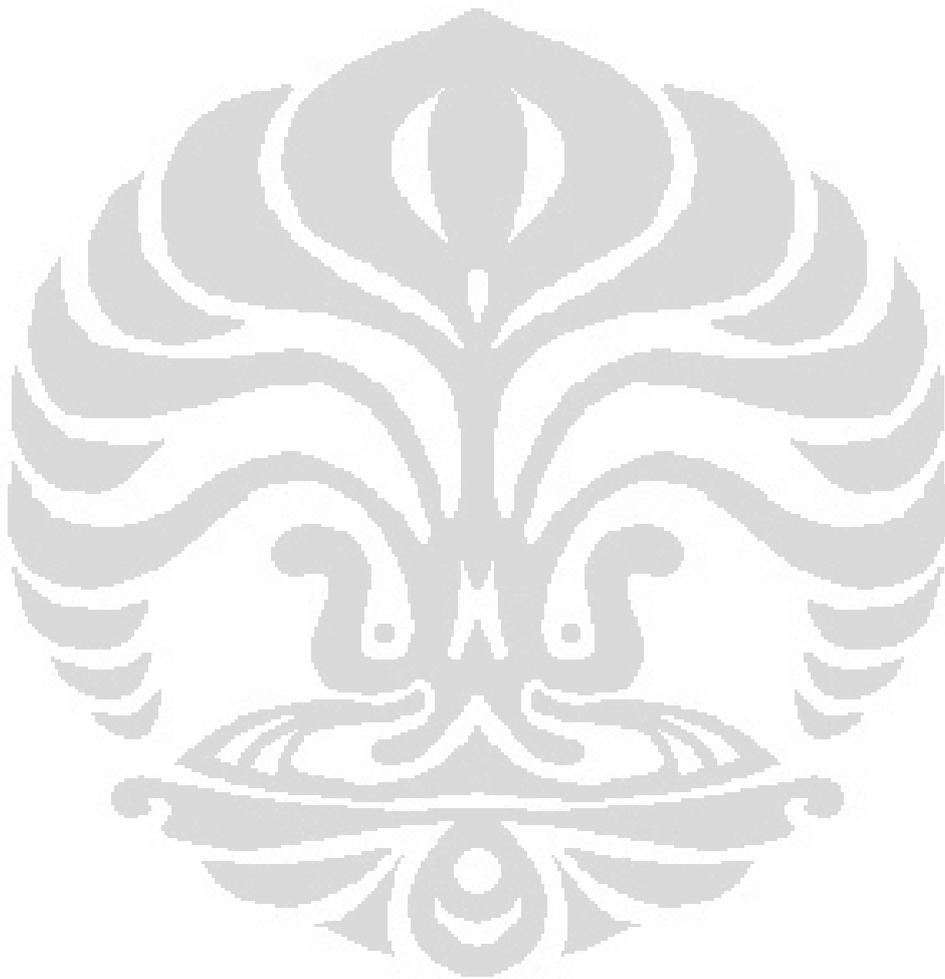
DAFTAR REFERENSI

- [1] Thomas, WM; Nicholas, ED; Needham, JC; Murch, MG; Temple-Smith, P; Dawes, CJ, 1991, *Friction-stir butt welding*, GB Patent No. 9125978.8, International patent application No. PCT/GB92/02203.
- [2] Hsu, T.-R., 2002. *MEMS & Microsystems: Design and Manufacture, 1st edition*. Mc-Graw-Hill Education, Boston.
- [3] Shelley, T., 2007. *It's bond – ultra-thin bond. Eureka – the Magazine for Engineering Design* 27 (6), 22–122.
- [4] Nagasaka, Y., Nisihara, T., 2003. *Development of Micro-FSW*. In: Proceedings of the 2003 Japan Society of Mechanical Engineers Materials and Processing Conference, Tokyo, October 17–18, pp. 327–328.
- [5] Scialpi, A., De Filippis, L.A.C., Cuomo, P., Di Summa, P., 2008a. *Micro friction stir welding of 2024-6082 aluminium alloys*. *Welding International* 22 (1), 16–22.
- [6] Wang, D.-A., Lee, S.-C., 2007, *Microstructures and failure mechanisms of friction stir spot welds of aluminum 6061-T6 sheets*. *Journal of Materials Processing Technology* 186 (1–3), 291–297.
- [7] ORNL International Research, *Development of Friction Stir Spot Welding Process*, 2004.
- [8] ASM International, 2007, *Friction Stir Welding and Processing*, American Society of Material, Ohio.
- [9] Rowe, C E D; Thomas, Wayne, 2006, *Advances in Tooling Materials for Friction Stir Welding*, TWI & Cedar Metal, Cambridge.
- [10] I. J. Polmear, 1995, *Light Alloys*, Arnold
- [11] Arifin, Bustanul; Suharno, Bambang; Harjanto, Sri, *Karakter Alumunium Casting*, Departemen Teknik Metalurgi, Universitas Indonesia, Depok.
- [12] www.gwp-ag.com (5 Mei 2012)
- [13] Bernard J. Hamrock, Bo Jacobson, Steven R. Schmid, 1999, *Fundamental of Machine Element*, Singapore : Mc Graw-Hill, 5-9
- [14] Alain, 2009, *Stepper Motor Basic*. Publisher : Industrial Circuit Application Note, 1-2

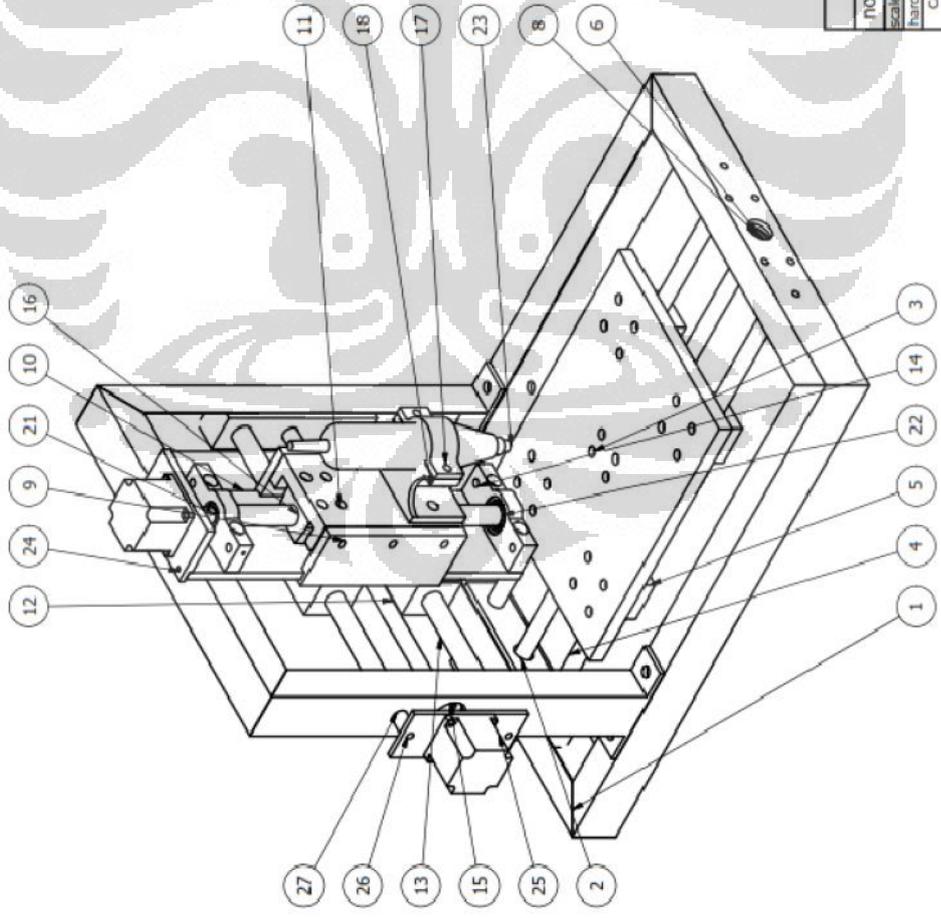
- 
- [15] Robert L Mott, P.E., *Elemen-Elemen Mesin dalam Perancangan Mekanis edition 2*, 2003, diterjemahkan oleh : Ir. Rines M.T dkk – Ed.1, ANDI, Yogyakarta, 5-9.
- [16] Sularso, 1994, *Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin*. Prandya Paramita, Bandung, 12-15.
- [17] George E. Dieter, 1988. *Mechanical Metallurgy. 3rd ed.*, Mc.Graw-Hill Inc., New York, 215-357.
- [18] Khurmi and Gupta, 2002. *Theory of Machine Elements.*, Prentice Hall., New Delhi, 101- 107.
- [19] http://www.steel0.com/JIS_S55C.htm (20 April 2012)
- [20] <http://www.skatebearings.com/6202-2RS-6202-ZZ.htm> (20 April 2012)
- [21] <http://www.hiwin.com/html/ball%20screws/index.html> (21 April 2012)
- [22] www.stappenmotor.nl/Schrittmotor%20data/Schrittmotor%2023%20F%20Serie.pdf (20 April 2012)
- [23] www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2798 (5 Mei 2012)
- [24] Montgomery C., Douglas, John Wiley and Sons, 2001. *Design and Analysis of Experiments*, 6th edition, New York, 356-402.

LAMPIRAN

GAMBAR TEKNIK PROTOTIPE MESIN FSSMW



FILE	1:1	1:2	1:5	1:10	1:20	1:50	1:100	1:200	1:500	1:1000	1:2000	1:5000	1:10000	1:20000	1:50000	1:100000	1:200000	1:500000	1:1000000
PRINT	1:1	1:2	1:5	1:10	1:20	1:50	1:100	1:200	1:500	1:1000	1:2000	1:5000	1:10000	1:20000	1:50000	1:100000	1:200000	1:500000	1:1000000



ITEM	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY
1	Main Frame	U-Shape	4060,000 mm
2	block	Mild Steel	4
3	moving base	Mild Steel	1
4	shaft dia16x580	Standard Part	2
5	linear bearing	Standard Part	4
6	DIN 628 SKF - SKF 7202 BE	Single row angular contact ball bearings SKF	4
7	female screw	Standard Part	2
8	Screw Y Axis	Standard Part	1
9	Rail Z	Mild Steel	2
10	base plate Z axis	Mild Steel	1
11	stand holder	Mild Steel	1
12	pillow block	Mild Steel	2
13	shaft dia 16x400	Standard Part	2
14	screw holder z axis	Mild Steel	2
15	screw Y axis	Standard Part	1
16	screw female Zaxis	Standard Part	1
17	clamping grind	Mild Steel	1
18	stand baby grind	Mild Steel	1
19	ganjel	Mild Steel	1
21	Screw Z Axis	Standard Part	1
22	DIN 625 SKF - SKF 6202-RS1	Deep groove ball bearings single row with RS1 seal SKF	2
23	baby grind	Standard Part	1
24	stand motor Z	Mild Steel	1
25	motor stepper	Standard Part	3
26	plate1	Mild Steel	2
27	bushing	Mild Steel	6
28	stopper	Mild Steel	2

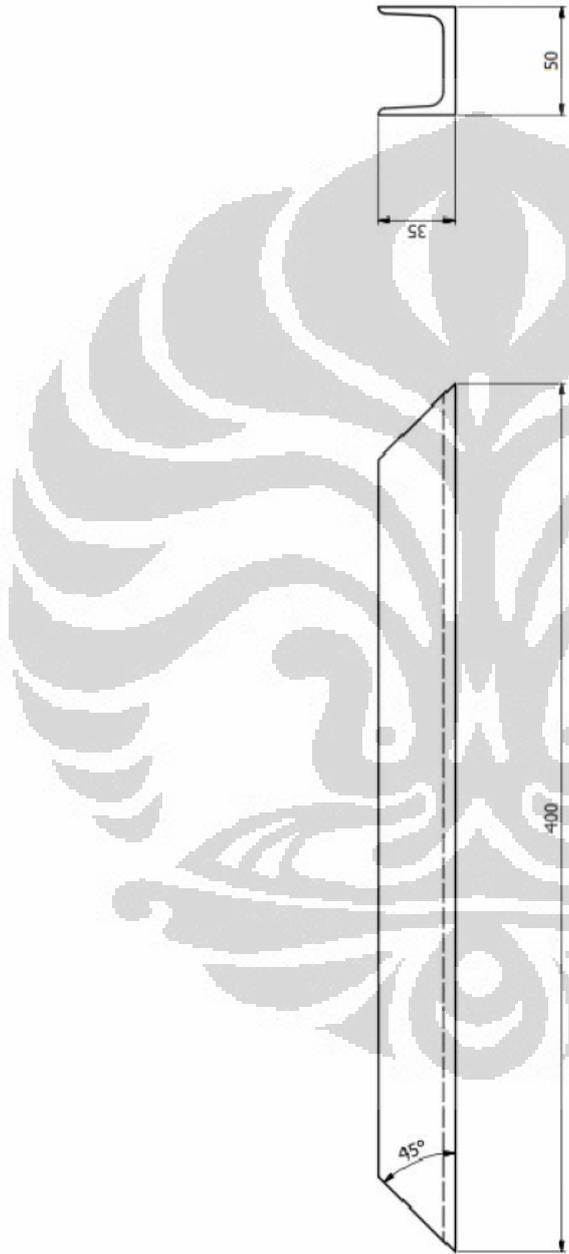
no	description	material	dimension	qty	remark
1	Tol R7 M F	Approve			
2	HRc Format A3	Check			
3	CAD system	proj			
4	Inventor	Aris Sunar B	Axis Sunar B	Title	
5		Design	Drawing		
6		Team FSSW	Albertus Aan	No order :	
7				Dwg nr	12-UJ-FSSW-GA-01
8				Origin :	
9				File name :	



Universitas Indonesia

Friction Stir Spot Welding Machine

File	03-1	03-4	03-5	03-6	03-7	03-8	03-9	03-10	03-11	03-12	03-13	03-14	03-15	03-16	03-17	03-18	03-19	03-20	03-21	03-22	03-23	03-24	03-25	03-26	03-27	03-28	03-29	03-30	03-31	03-32	03-33	03-34	03-35	03-36	03-37	03-38	03-39	03-40	03-41	03-42	03-43	03-44	03-45	03-46	03-47	03-48	03-49	03-50	03-51	03-52	03-53	03-54	03-55	03-56	03-57	03-58	03-59	03-60	03-61	03-62	03-63	03-64	03-65	03-66	03-67	03-68	03-69	03-70	03-71	03-72	03-73	03-74	03-75	03-76	03-77	03-78	03-79	03-80	03-81	03-82	03-83	03-84	03-85	03-86	03-87	03-88	03-89	03-90	03-91	03-92	03-93	03-94	03-95	03-96	03-97	03-98	03-99	03-100
------	------	------	------	------	------	------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------



1.4	Clear U 400	UNP 35 x 50	400 x 50 x 35	1	-
no	description	material	dimension	qty	remark
scale: 1:2	Tol R/M/F	Approve			
hard: HRC	Format A3	Check			
CAD system	proj				
Inventor		Ario Sunar B	Ario Sunar B		
/5		Design	Design		
/4					
/3					
/2					
/1		Team FSSW	Albertus Aan		
no	revisi	date	sign		

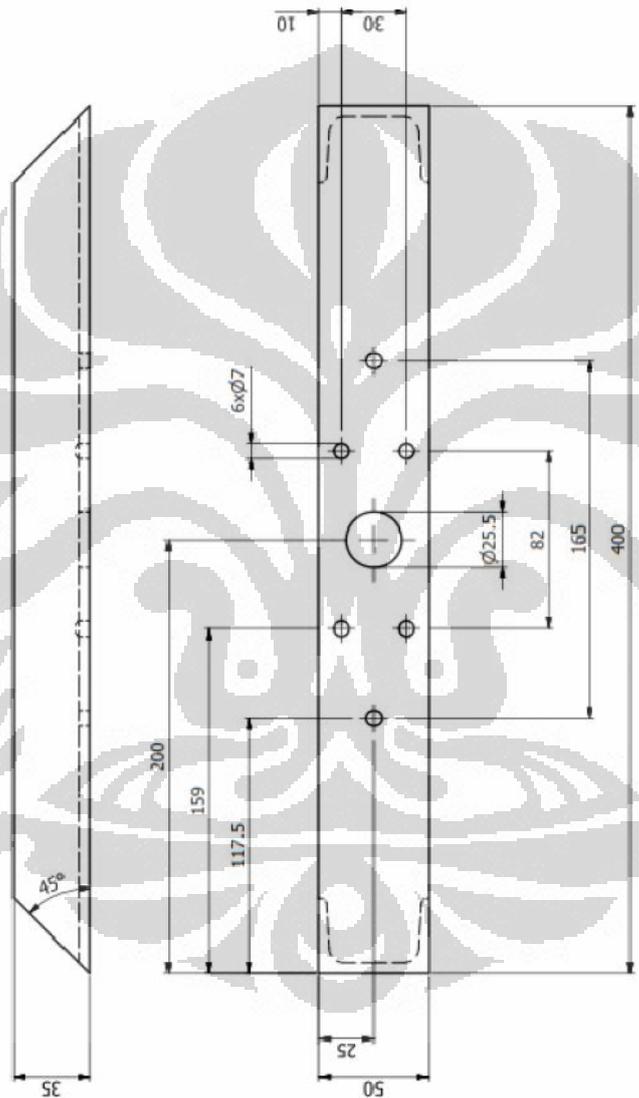
Universitas Indonesia

Clear U 400

Friction Stir Spot Welding Machine

Assy nr
12-UI-FSSW-SA-002
Dwg nr
12-UI-FSSW-PRT-0006
No order :
Origin :

0.5.2	0.2.1	0.0.26	0.0.25	0.0.24	0.0.23	0.0.22	0.0.21	0.0.20	0.0.19	0.0.18	0.0.17	0.0.16	0.0.15	0.0.14	0.0.13	0.0.12	0.0.11	0.0.10	0.0.09	0.0.08	0.0.07	0.0.06	0.0.05	0.0.04	0.0.03	0.0.02	0.0.01
0.5.2	0.2.1	0.0.26	0.0.25	0.0.24	0.0.23	0.0.22	0.0.21	0.0.20	0.0.19	0.0.18	0.0.17	0.0.16	0.0.15	0.0.14	0.0.13	0.0.12	0.0.11	0.0.10	0.0.09	0.0.08	0.0.07	0.0.06	0.0.05	0.0.04	0.0.03	0.0.02	0.0.01



1.5	Front U 400	UNP 35 x 50	400 x 50 x 35	1	-
no	description	material	dimension	qty	remark
scale: 1:2	Tol R/N/F	Check	Approve		
hard:	Hrc	Format	A3		
CAD system	[Prt]				
Inventor	Arto Sunar B	Arto Sunar B	Arto Sunar B	Title	
3		Design	Design	Front U 400	
4			Drawing	Friction Str Spot Welding Machine	
5				Dwg nr	
6				12-UI-FSSW-SA-002	
7				No order : 12-UI-FSSW-PRT-0007	
8				Origin :	
no	revisi	date	sign	File name :	



Universitas Indonesia

Front U 400

Friction Str Spot Welding Machine

Dwg nr

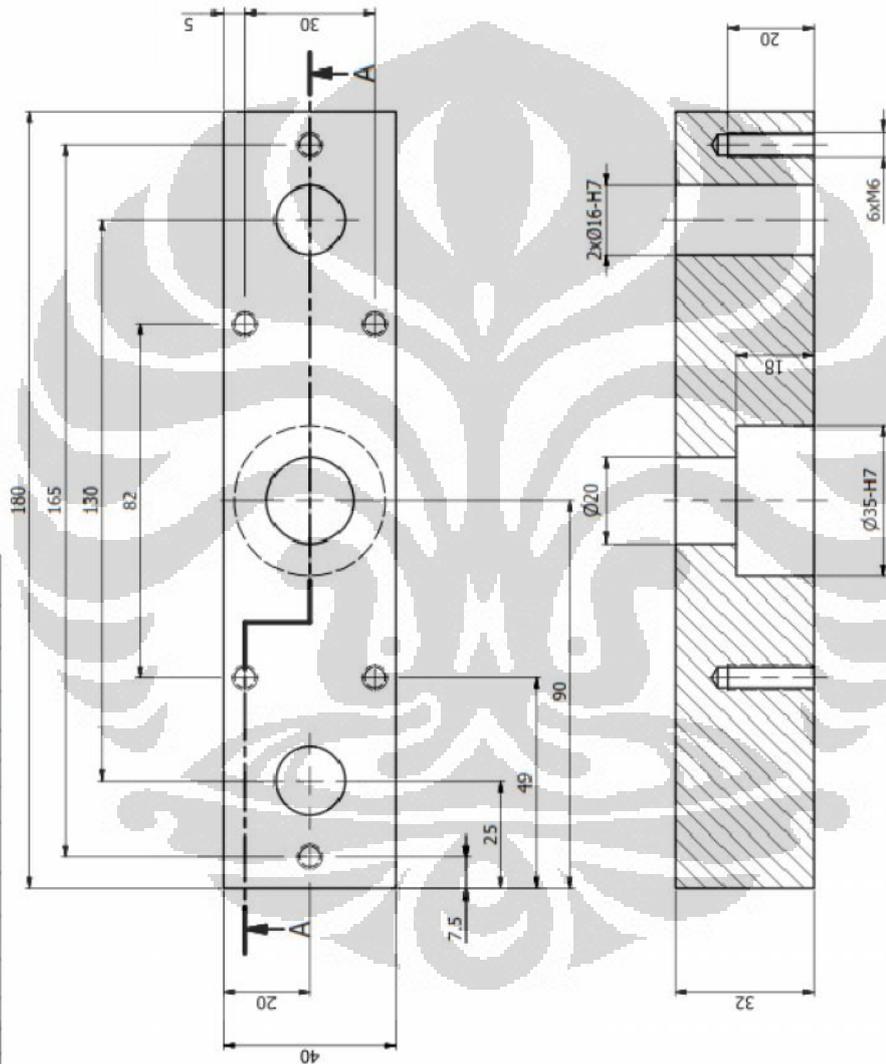
12-UI-FSSW-SA-002

No order : 12-UI-FSSW-PRT-0007

Origin :

File name :

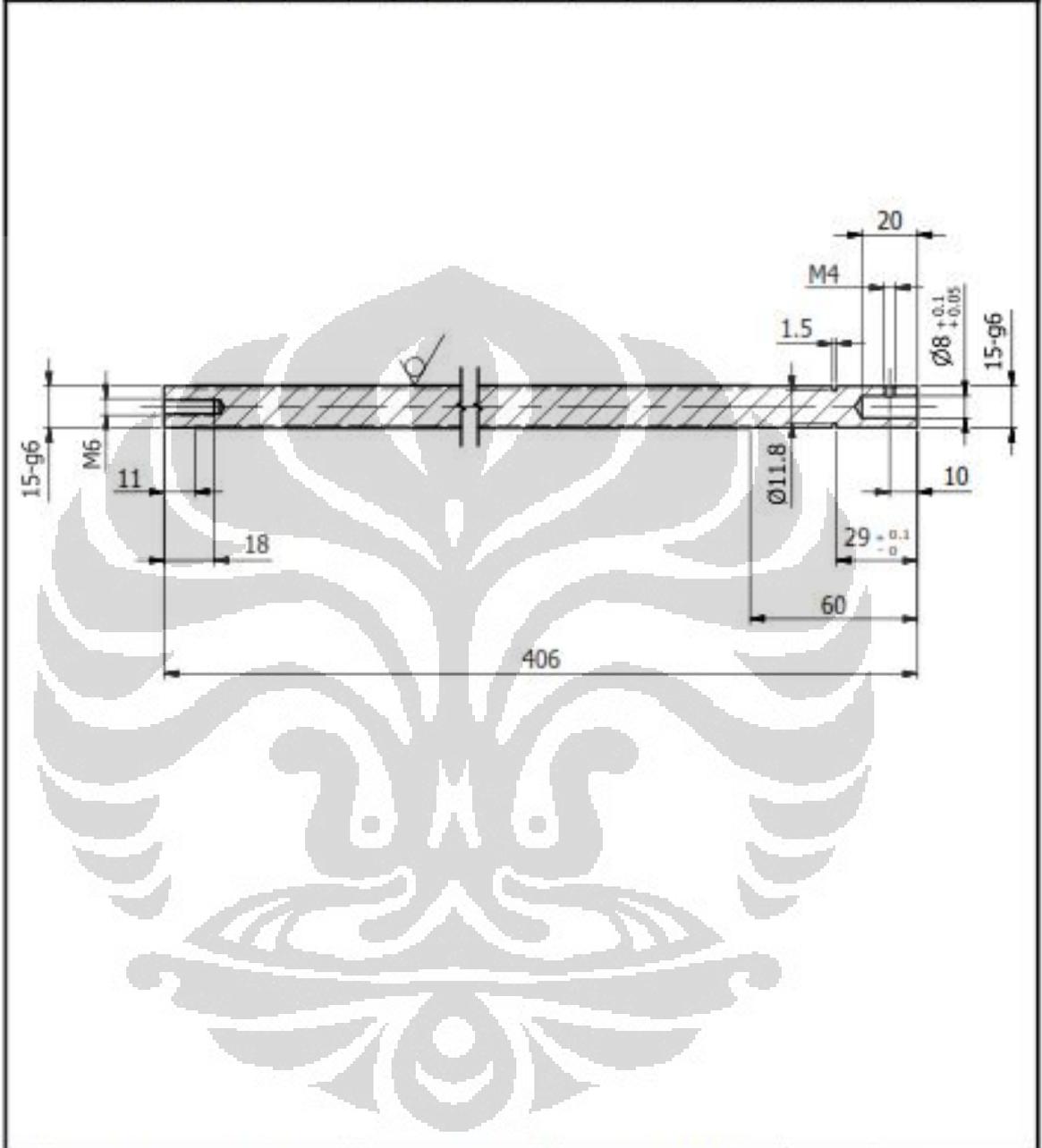
0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	12.5	16.0	20.0	25.0	31.5	40.0	50.0	63.0	80.0	100.0	125.0	160.0	200.0	250.0	315.0	400.0	500.0	630.0	800.0	1000.0
0.25	0.315	0.4	0.5	0.63	0.8	1.0	1.25	1.6	2.0	2.5	3.15	4.0	5.0	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0	20.0	25.0	31.5	40.0	50.0	63.0	80.0	100.0	125.0	160.0	200.0	250.0	315.0	400.0	500.0	630.0	800.0	1000.0



2	Block	Mild Steel	180 x 40 x 32	4	-
no	description	material	dimension	qty	remark
scale: 1:1	Tol R7/N7 F	Approve			
hand: HRC	Format A3	Check			
CAD system	proj	Ario Sunar B			
Inventor		Ario Sunar B			
1		Design			
2		Drawing			
3					
4					
5					
no	revis	date	sign		

Universitas Indonesia	
Block	
Assy nr	Friction Stir Spot Welding Machine
12-UJ-FSSW-GA-01	Dwg nr
12-UJ-FSSW-PRT-0008	No order :
	Origin :
	File name :

Fine	0,5-3	>3-6	>6-30	>30-120	>120-400	>400-1000	Medium	0,5-3	>3-6	>6-30	>30-120	>120-400	>400-1000	Rough	0,5-3	>3-6	>6-30	>30-120	>120-400	>400-1000
	±0,05	±0,05	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3		±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8		±0,15	±0,2	±0,5	±0,8	±1,2	±2

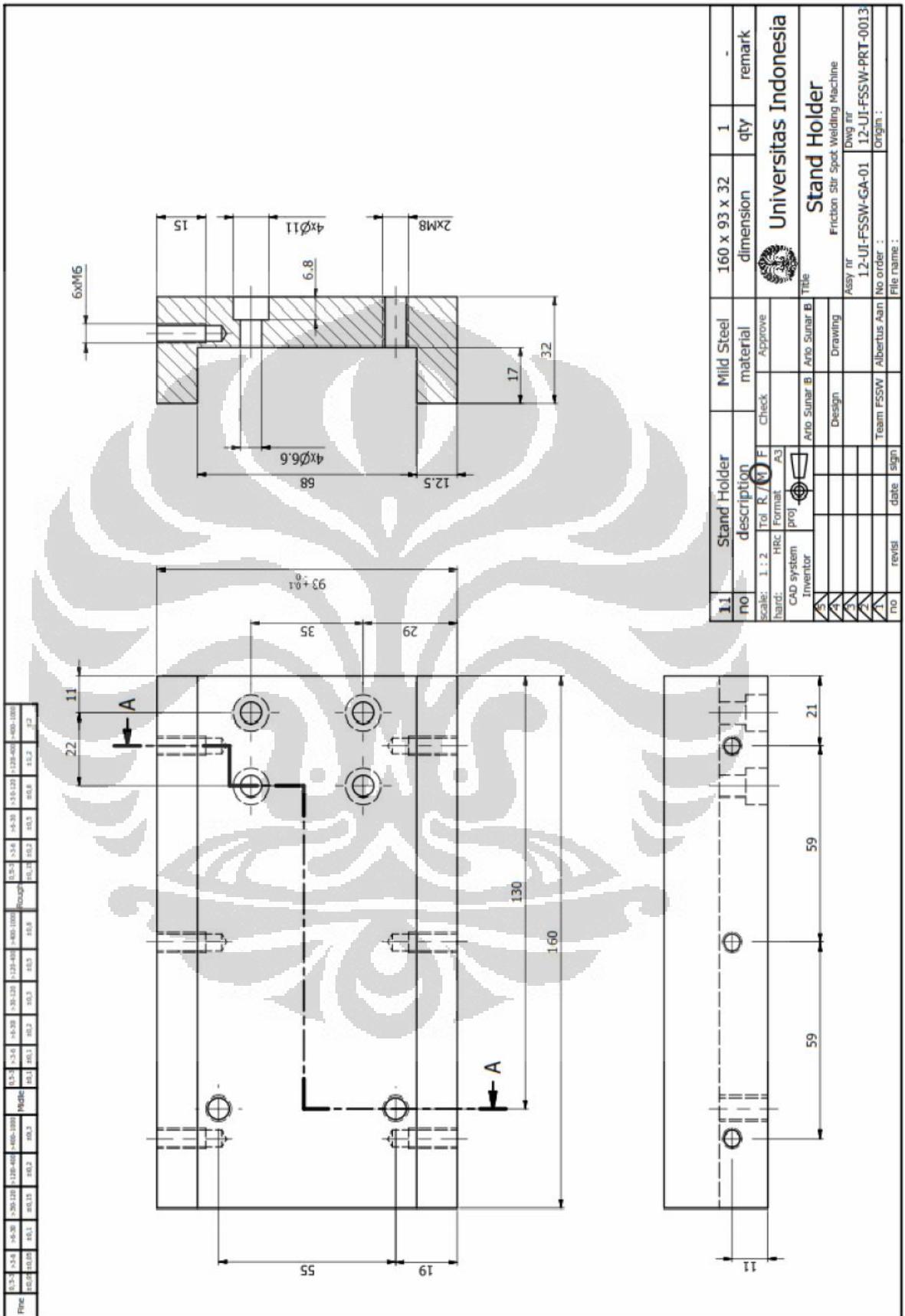


15	Screw Y Axis	Standard Part	Hiwin 16 5BI	1	-
no	description	material	dimension	qty	remark
scale:	1 : 2	Tol R / (M) F	Check	Approve	
hard:	HRC	Format A4			
CAD system	Inventor	proj	Ario Sunar B	Ario Sunar B	
5					
4			Design	Drawing	
3					
2					
1			Team FSSW	Albertus Aan	
no	revisi	date	sign	No order :	Origin :
				File name :	

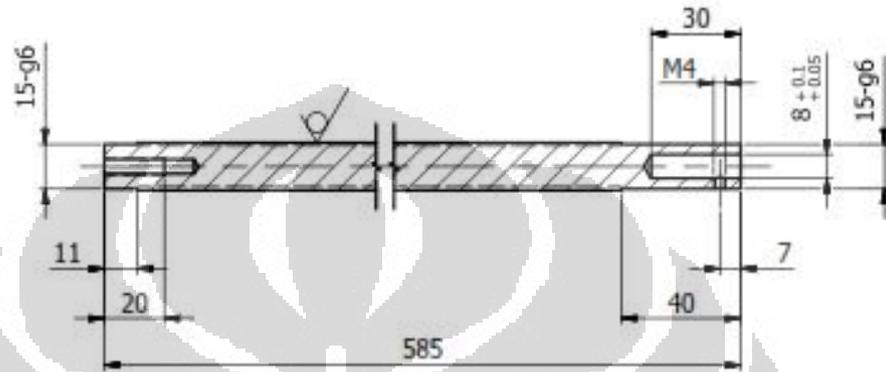


Universitas Indonesia
Screw Y Axis
 Friction Stir Spot Welding Machine

Assy nr 12-UI-FSSW-GA-01 Dwg nr 12-UI-FSSW-PRT-0016

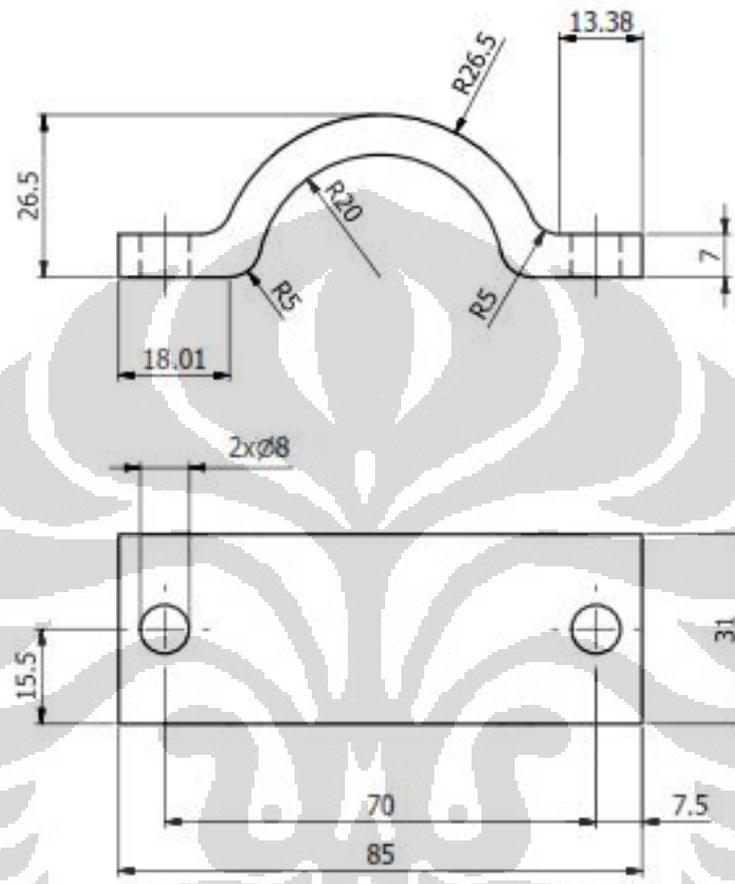


Fine	0,5-3	>3-6	>6-30	>30-120	>120-400	>400-1000	Medium	0,5-3	>3-6	>6-30	>30-120	>120-400	>400-1000	Rough	0,5-3	>3-6	>6-30	>30-120	>120-400	>400-1000
	±0,05	±0,08	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3		±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8		±0,1	±0,2	±0,3	±0,8	±1,2	±2



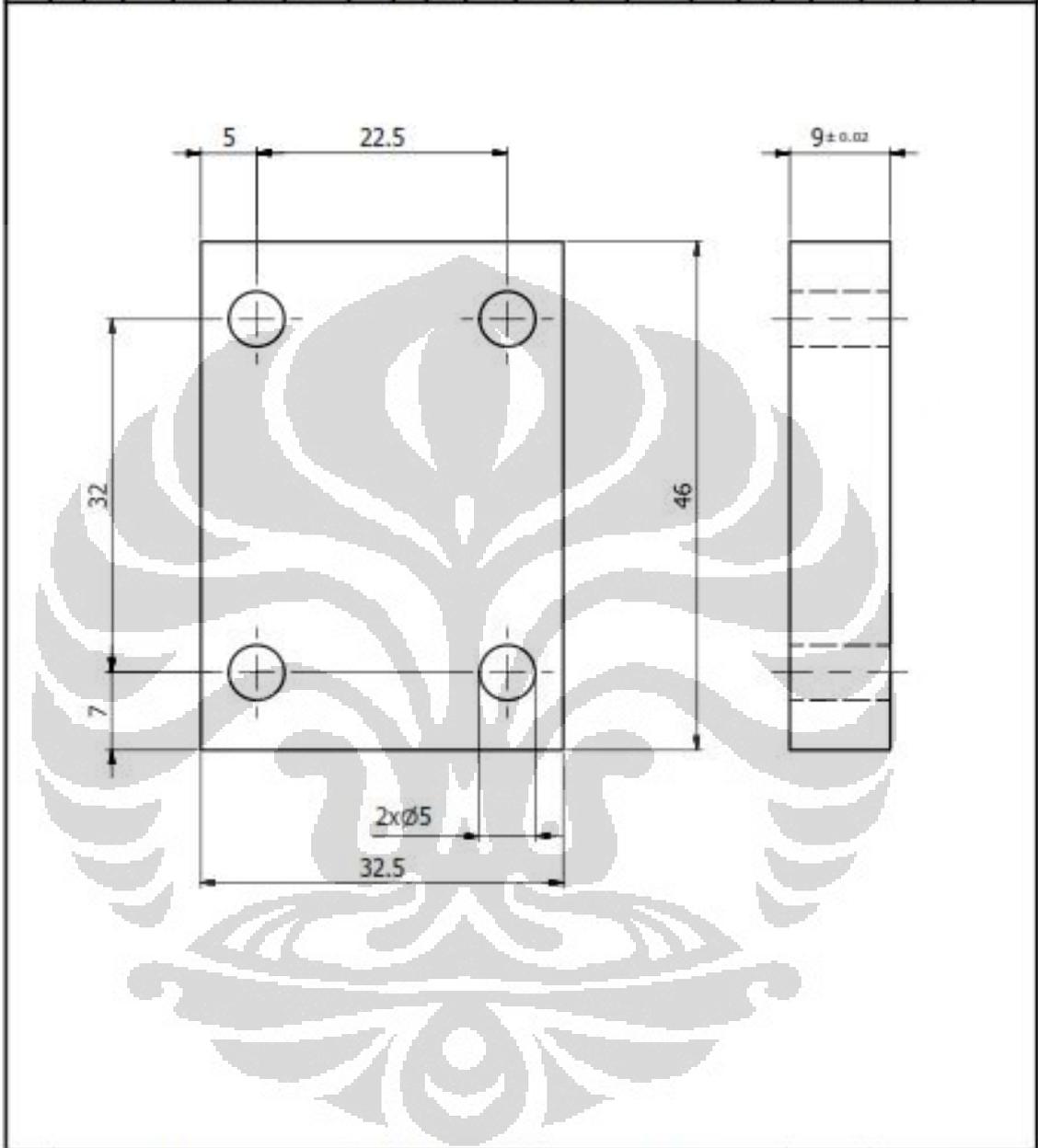
8	Screw Y Axis	Standard Part	Hiwin 16 5B1	1	-
no	description	material	dimension	qty	remark
scale: 1 : 2	Tol R/M/F	Check	Approve	 Universitas Indonesia Screw Y Axis Friction Stir Spot Welding Machine	
hard: HRC	Format A4				
CAD system Inventor	proj	Ario Sunar B	Ario Sunar B		
5					
4		Design	Drawing		
3				Assy nr 12-UI-FSSW-GA-01	Dwg nr 12-UI-FSSW-PRT-0010
2				No order :	Origin :
1		Team FSSW	Albertus Aan	File name :	
no	revisi	date	sign		

Finish	0,5-3				3-6				6-30				30-120				120-400				400-1000			
	±0,05	±0,05	±0,1	±0,15	±0,2	±0,2	±0,3	±0,3	±0,5	±0,5	±0,8	±0,8	±1,2	±1,2	±1,5	±1,5	±2	±2	±3	±3	±5	±5	±8	±8



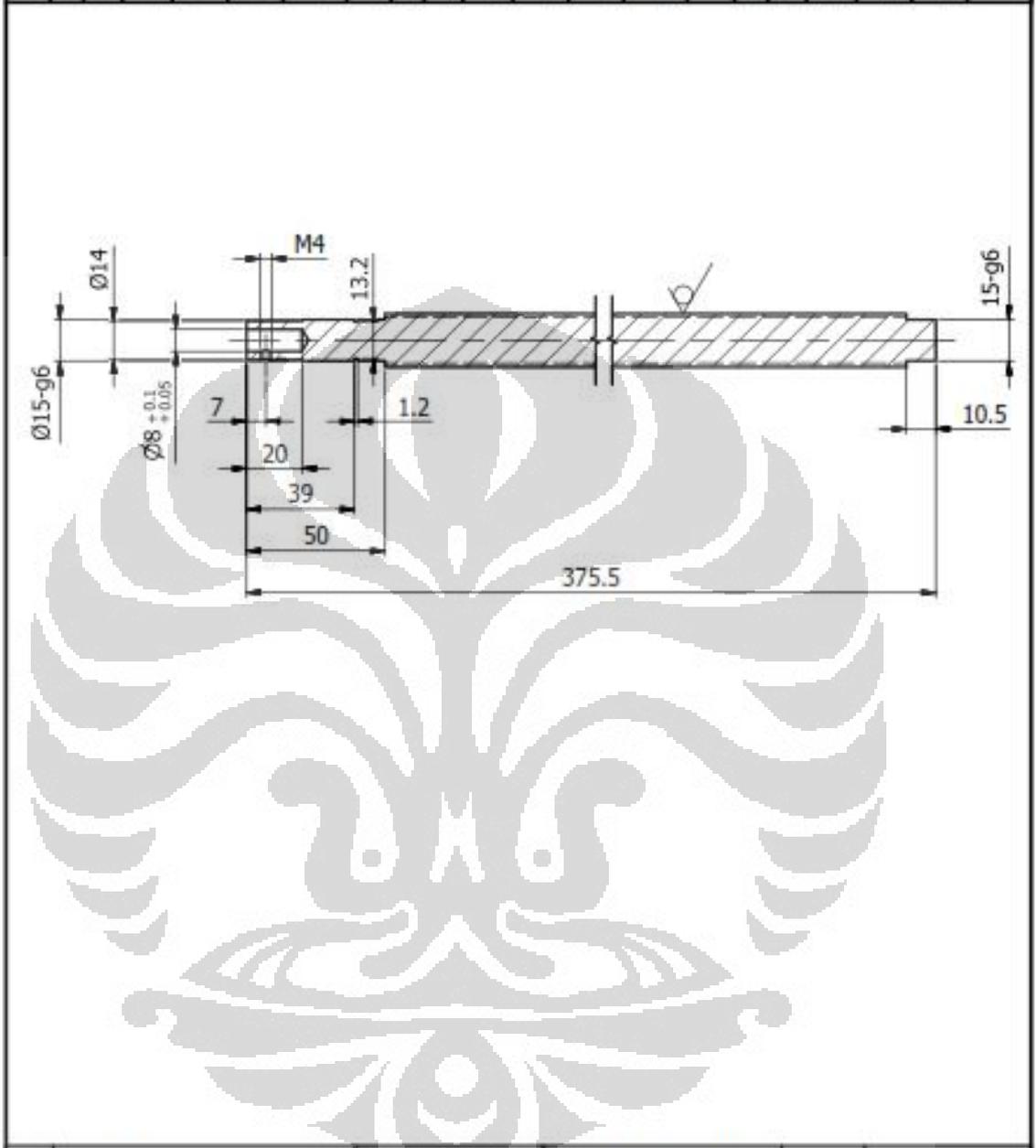
17	Clamping Grind		Mild Steel	85 x 31 x 26.5	1	-
no	description		material	dimension	qty	remark
scale:	2 : 1	Tol R / M F	Check	Approve	 Universitas Indonesia Clamping Grind Friction Stir Spot Welding Machine Assy nr 12-UI-FSSW-GA-01 Dwg nr 12-UI-FSSW-PRT-0017 No order : Origin : File name :	
hard:	HRC	Format A4				
CAD system	Inventor	proj	Ario Sunar B	Ario Sunar B		
5						
4			Design	Drawing		
3						
2						
1			Team FSSW	Albertus Aan		
no	revisi	date	sign			

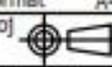
Fine	0,5-3	>3-6	>6-30	>30-120	>120-400	>400-1000	Medium	0,5-3	>3-6	>6-30	>30-120	>120-400	>400-1000	Rough	0,5-3	>3-6	>6-30	>30-120	>120-400	>400-1000
	±0,05	±0,05	±0,1	±0,15	±0,3	±0,3		±0,1	±0,1	±0,3	±0,3	±0,5	±0,5		±0,8	±0,15	±0,2	±0,5	±0,8	±1,2

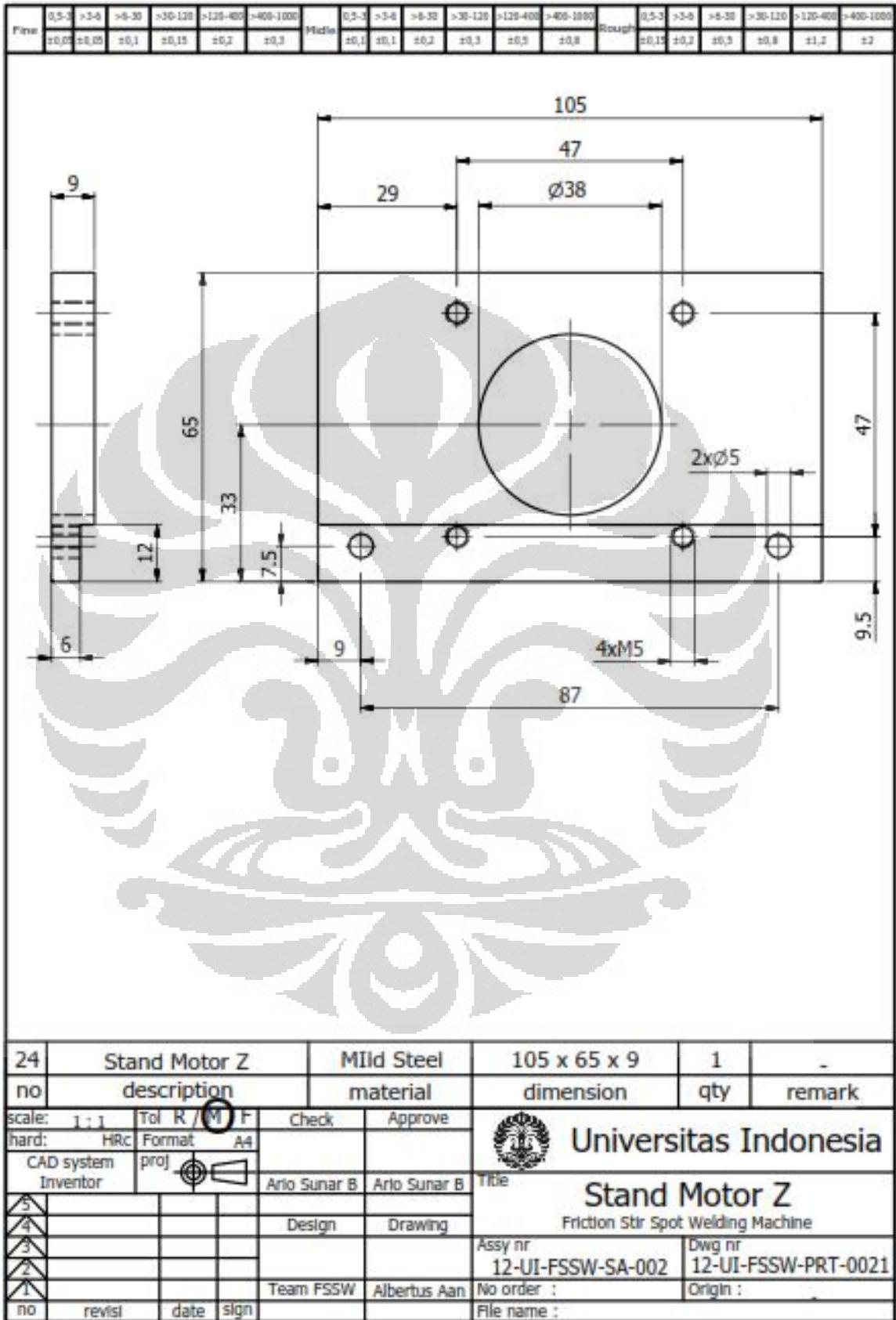


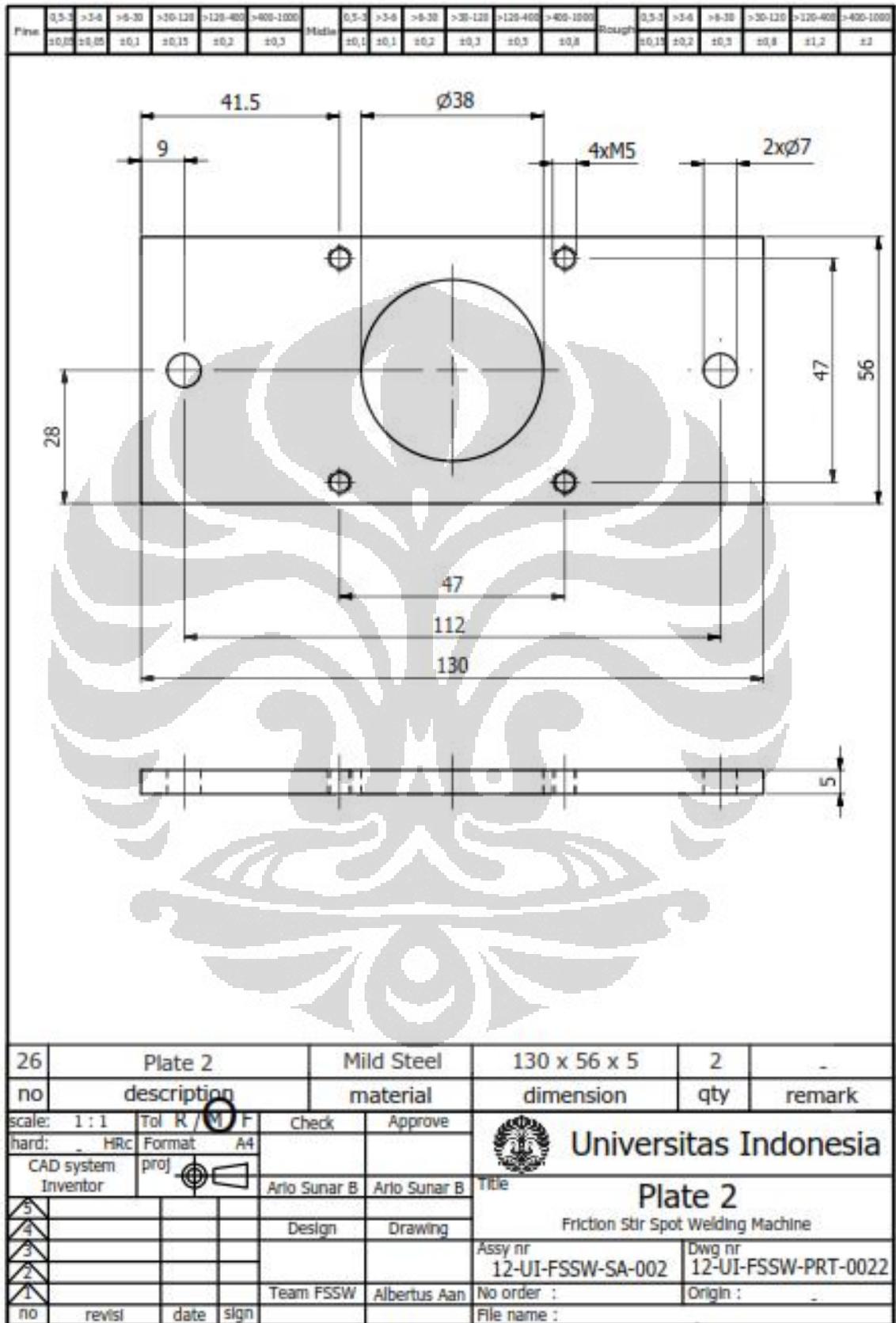
19	Support	Mild Steel	32.5 x 46 x 5	1	-
no	description	material	dimension	qty	remark
Scale:	2 : 1	Tol R/M/F	Check	Approve	 Universitas Indonesia Support Friction Stir Spot Welding Machine Assy nr 12-UI-FSSW-SA-002 Dwg nr 12-UI-FSSW-PRT-0019 No order : Origin : File name :
hard:	HRC	Format	A4		
CAD system	Inventor	proj		Ario Sunar B	
				Ario Sunar B	
5					
4				Design	Drawing
3					
2					
1				Team FSSW	Albertus Aan
no	revisi	date	sign		

Fine	0,5-3	>3-6	>6-30	>30-120	>120-400	>400-1000	Medium	0,5-3	>3-6	>6-30	>30-120	>120-400	>400-1000	Rough	0,5-3	>3-6	>6-30	>30-120	>120-400	>400-1000
	±0,05	±0,05	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3		±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8		±0,15	±0,2	±0,5	±0,8	±1,2	±2

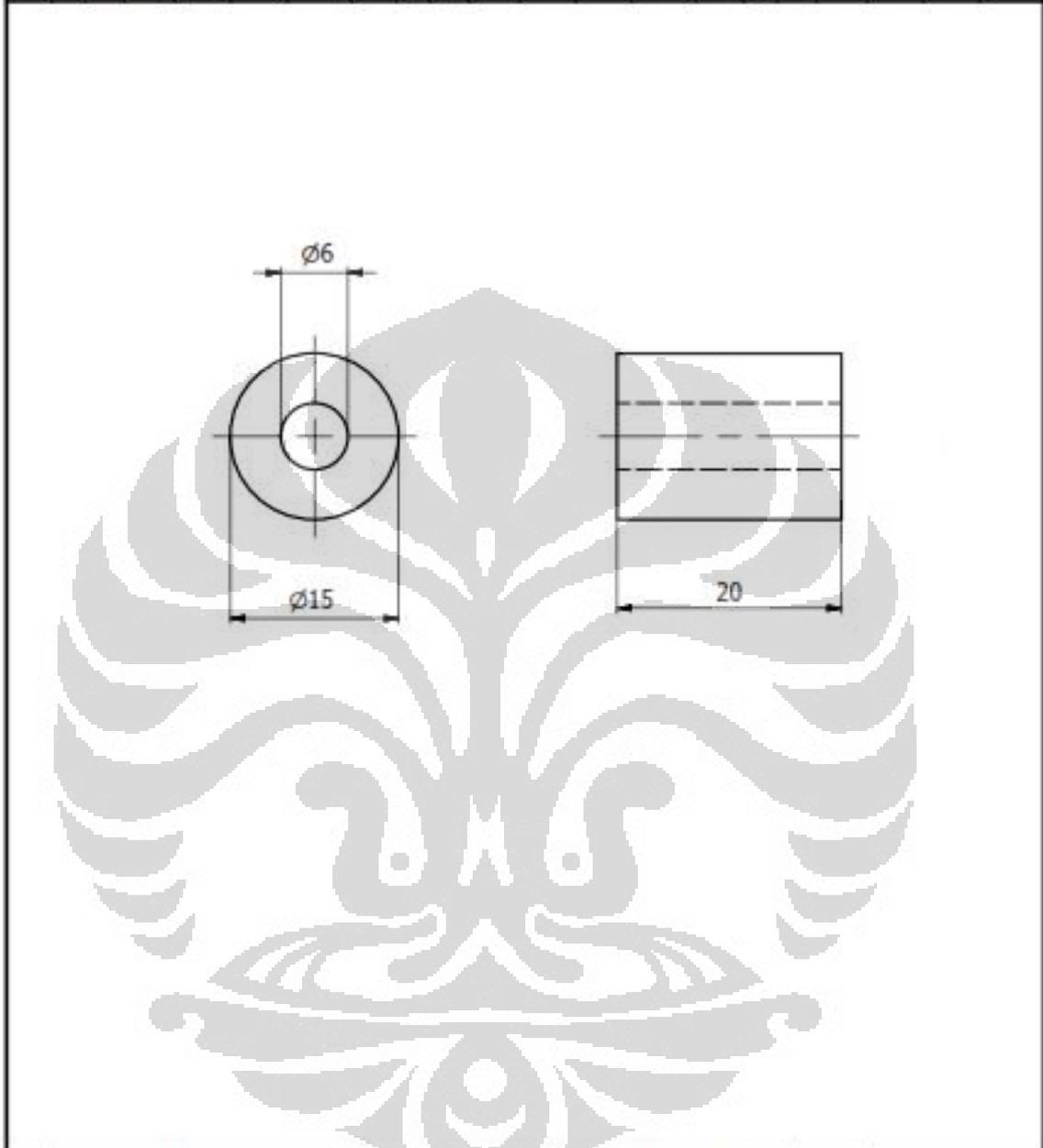


21	Screw Z Axis	Standard Part	Hiwin 20 5BI	1	-	
no	description	material	dimension	qty	remark	
scale:	1 : 2	Tol R / (M) F	Check	Approve	 Universitas Indonesia Screw Z Axis Friction Str Spot Welding Machine	
hard:	HRC	Format	A4			
CAD system	Inventor	proj		Ario Sunar B		Ario Sunar B
5						Assy nr
4						12-UI-FSSW-GA-01
3					Dwg nr	
2					12-UI-FSSW-PRT-0020	
1					No order :	
no	revisi	date	sign	Team FSSW	Albertus Aan	
					File name :	



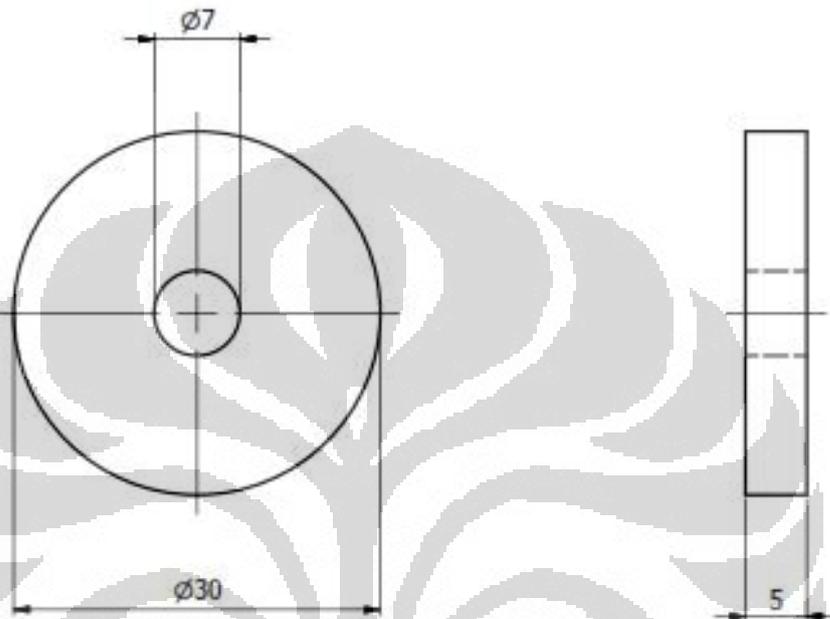


Finish	0,5-3	>3-6	>6-30	>30-120	>120-400	>400-1000	Middle	0,5-3	>3-6	>6-30	>30-120	>120-400	>400-1000	Rough	0,5-3	>3-6	>6-30	>30-120	>120-400	>400-1000
	±0,05	±0,05	±0,1	±0,25	±0,2	±0,3		±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,3	±0,8		±0,15	±0,2	±0,5	±0,8	±1,2	±2



27	Bushing	Mild Steel	Ø15 x 20	6	-
no	description	material	dimension	qty	remark
scale:	2 : 1	Tol R / M / F	Check	Approve	 Universitas Indonesia Bushing Friction Stir Spot Welding Machine
hard:	HRC	Format	A4		
CAD system	Inventor	proj		Arlo Sunar B Arlo Sunar B Title	
5					Assy nr
4			Design	Drawing	12-UI-FSSW-SA-002
3					Dwg nr
2					12-UI-FSSW-PRT-0023
1			Team FSSW	Albertus Aan	No order :
no	revisi	date	sign		Origin :
					File name :

Fine	0,5-3	>3-8	>8-30	>30-120	>120-400	>400-1000	Middle	0,5-3	>3-8	>8-30	>30-120	>120-400	>400-1000	Rough	0,5-3	>3-8	>8-30	>30-120	>120-400	>400-1000
	±0,05	±0,05	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3		±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8		±0,15	±0,2	±0,5	±0,8	±1,2	±2



28	Stopper	Mild Steel	Ø30 x 5	2	-
no	description	material	dimension	qty	remark
scale:	2 : 1	Tol R / (M) F	Check	Approve	 Universitas Indonesia Stopper Friction Stir Spot Welding Machine
hard:	HRC	Format A4			
CAD system	Inventor	proj	Ario Sunar B	Ario Sunar B	
5					Assy nr
4					12-UI-FSSW-SA-002
3					Dwg nr
2					12-UI-FSSW-PRT-0024
1			Team FSSW	Albertus Aan	No order :
no	revisi	date	sign		Origin :
					File name :