



UNIVERSITAS  
GADJAH MADA

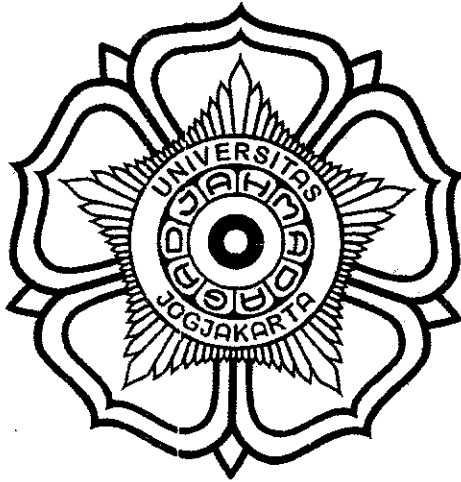
Redesign Industrial Robot Kawasaki FS30L For Polishing Application  
Farhan Shaumi Agustianto, Ir. Gregorius Harjanto  
Universitas Gadjah Mada, 2002 | Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

# SKRIPSI

1544

Nomor Persoalan : TKM 525T/II/2000/2001/XII/1/GH/05.07/2002

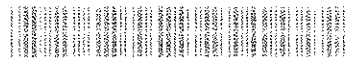
## REDESIGN INDUSTRIAL ROBOT KAWASAKI FS30L FOR POLISHING APPLICATION



Disusun Oleh :

**FARHAN SHAUMI AGUSTIANTO**

96 / 109084 / TK / 21035



TGA01861

**JURUSAN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS GADJAH MADA  
YOGYAKARTA**

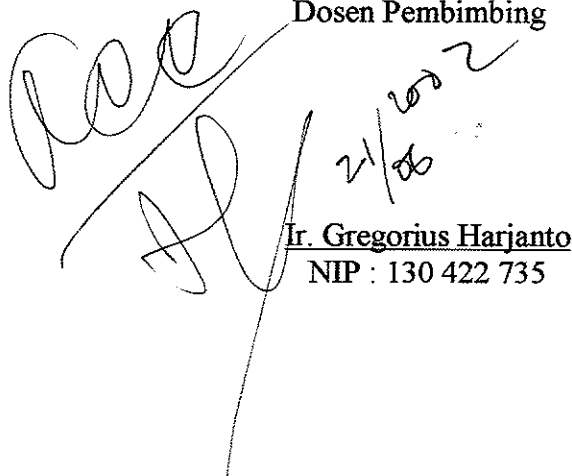
**2002**



Diajukan untuk memenuhi  
sebagian syarat guna memperoleh  
gelar Sarjana  
di Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknik  
Universitas Gadjah Mada

Telah disetujui untuk diuji

Dosen Pembimbing



21/02/02

Ir. Gregorius Harjanto

NIP : 130 422 735



" Kamu tidak dapat menuntut ilmu kecuali dengan dukungan enam perkara, yaitu cerdas, gemar belajar, sabar, tekun, dan bersungguh-sungguh, memiliki biaya, dibantu oleh guru, dan belajar dalam jangka waktu lama." (*Imam asy-Syafi'i*)

Kupersembahkan untuk :

- Allah SWT, Raja segala makhluk
- Nabi Muhammad SAW, Sang pembawa lentera Islam
- Bapak dan Ibu tercinta di Yogya yang selalu mendoakan dan kudoakan
- Bapak dan Ibu tercinta di Tulungagung, terima kasih buat doanya
- Galuh tersayang, makasih buat, keikhlasan, kesabaran, dan kesetiaan menemaniku
- Ayuk Farah dan Mas Furqon, thank's mentahannya
- Adek Fuad, banyak senyumlah untuk sedekah
- De' Esta dan de' Esti, thank's untuk kebaikannya
- Rendra, ojo tambah ireng yo
- Om Wid, kapan tanggal mainnya

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadirat Allah SWT, yang berkat rahmat dan hidayah-Nya penyusun dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Shalawat selalu tercurah bagi Nabi kita Muhammad saw, yang telah menjadi pemimpin terbesar bagi umatnya dan selalu menjadi contoh bagi pemimpin-pemimpin dunia.

Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akhir guna menyelesaikan program Strata-1 dan memperoleh gelar sarjana teknik di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.

Tugas akhir ini mengambil topik Robot Kawasaki FS30L dengan modifikasi pada end effector untuk aplikasi proses finishing khususnya proses polishing di industri otomotive. Penyusun mengambil topik ini sebagai lanjutan dari mata kuliah Robot Industri I dan II sebagai mata kuliah pilihan, sehingga Tugas Akhir ini lebih menekankan pada desain Kinematis dan Dinamis Robot dengan sedikit memaparkan proses polishing itu sendiri.

Pada kesempatan ini, penyusun ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu proses penyelesaian penyusunan Tugas Akhir ini, antara lain :

1. Bapak Dr. Ir. Indarto, DEA selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada.
2. Bapak Ir. G. Harjanto selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir.
3. Bapak Ir. Mudjijana, M.Eng selaku Dosen Wali.
4. Seluruh Dosen dan Staff Tata Usaha Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada.
5. Semua rekan-rekan mahasiswa yang telah memberikan informasi dan perhatiannya, terutama Sdr. Ali Ansori, Padmanaba Bayu, Wahyu Adi, Agung, Sarmin, Wahyu Kresna, Wisnu, Hajar, Aries dan semua rekan-rekan yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu



UNIVERSITAS  
GADJAH MADA

**Redesign Industrial Robot Kawasaki FS30L For Polishing Application**  
Farhan Shaumi Agustianto , Ir. Gregorius Harjanto  
Universitas Gadjah Mada, 2002 | Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

Akhir kata, semoga apa yang menjadi tujuan dan sasaran penyusunan Tugas Akhir ini dapat tercapai, sehingga dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membutuhkannya.

Yogyakarta, Juli 2002

Penyusun

Farhan Shaumi Agustianto

96/109084/TK/21035



## NASKAH SOAL TUGAS AKHIR

Kuliah : TKM 525T (ROBOT INDUSTRI)

Mahasiswa : FARHAN SHAUMI AGUSTIANTO

Nr Mahasiswa : 96/109084/TK/21035

r PERSOALAN : TKM 525T/II/2000/2001/XII/1/GH/05.07/2002

Rancang sebuah robot Industri Kawasaki FS30L dengan payload 30 kg untuk aplikasi pada proses Polishing, lengkap dengan gambar dan detail yang penting !

Yogyakarta, 5 Juli 2002.....

Dosen Pembimbing

## Intisari

Industri robot dewasa ini mengalami perkembangan yang sangat cepat seiring dengan kemajuan teknologi yang mendukungnya antara lain : komputerisasi, *software*, pengetahuan bahan, elektronik, mikroprosesor, dan sebagainya. Perkembangan ini dilatar belakangi oleh meningkatnya kebutuhan barang akibat pertumbuhan penduduk dunia dan gaya hidup modern yang menginginkan segala sesuatunya dapat dilakukan secara cepat. Robot industri merupakan salah satu mesin produksi yang mampu memenuhi kebutuhan tersebut meskipun di negara berkembang teknologi ini belum populer.

Robot Kawasaki seri FS30L merupakan robot 6 derajat kebebasan dengan spesifikasi untuk *material handling* dengan kelebihan tingkat kecepatan, *work envelope* yang luas, serta tingkat akurasi yang tinggi.

Untuk merancang ulang Robot Kawasaki FS30L yang diaplikasikan untuk proses *polishing* ditentukan terlebih dulu torsi yang terbesar yang dialami tiap *joint* menggunakan metode Newton Euler yang digunakan untuk merancang sistem transmisi. Tiap *joint* robot menggunakan minimum 3 tingkat kecepatan dengan sumber penggerak dari servomotor AC yang sudah ditentukan sebelumnya. Kekuatan struktur dan defleksi lengan dihitung pada saat manipulator berada pada posisi kritisnya.

Tujuan perancangan ulang Robot Kawasaki FS30L ini dimaksudkan guna membandingkan data-data pada katalog yang dikeluarkan oleh Kawasaki dengan perhitungan yang dilakukan penyusun. Dari perancangan yang dilakukan oleh penyusun diperoleh torsi yang lebih besar sehingga ukuran tiap *joint* menjadi lebih besar pula.

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	ii
<b>HALAMAN MOTTO DAN PERSEMBAHAN</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	iv
<b>NASKAH SOAL TUGAS AKHIR</b> .....	vi
<b>INTISARI</b> .....	vii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	viii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiv
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xv
<b>DAFTAR NOTASI</b> .....	xvi
<b>BAB I. PENDAHULUAN</b> .....	1
I.1. Definisi Robot .....	1
I.2. Klasifikasi Robot .....	3
I.3. Sejarah Perkembangan Robot Industri .....	17
I.4. Standarisasi Robot dan Industri otomatis .....	29
I.4.1. Robotics Industries Association R15 Standard Committee .....	29
I.4.2. Association A15 Standard Committee .....	32
I.5. Aplikasi Robot Finishing .....	35
I.5.1. Pengertian Polishing .....	37
I.5.2. Aplikasi di Industri .....	38
I.5.3. Peralatan dan kegunaannya .....	54
I.5.4. Kekasaran Permukaan dan Hasil Proses Polishing .....	61
<b>BAB II. ROBOT INDUSTRI KAWASAKI FS30L</b> .....	68
II.1. Diskripsi Robot Kawasaki .....	68
II.1.1. Sejarah Perusahaan .....	68
II.1.2. Visi dan Misi Perusahaan .....	70
II.2. Spesifikasi Robot Kawasaki FS30L .....	71
II.3. Kemampuan Operasi Robot Kawasaki FS30L .....	73
II.4. Aplikasi Robot Kawasaki FS30L untuk Proses Polishing .....	77



<b>BAB III</b>	80
<b>III.A. GRIPPER</b>	80
III.A.1. Definisi Gripper	81
III.A.2. Klasifikasi Gripper	81
III.A.2.1. Parallel Gripper	81
III.A.2.2. Angular Gripper	82
III.A.2.3. Toogle Gripper	82
III.A.2.4. 2 Jaw dan 3 Jaw Gripper	83
III.A.2.5. Internal dan External Gripping	84
III.A.3. Pemilihan Finger	85
III.A.4. Pemilihan Gripper untuk Proses Polishing	85
<b>III.B. KINEMATIKA DAN DINAMIKA     ROBOT KAWASAKI ZX 130S</b>	92
III.B.1. Posisi 1	94
III.B.2. Posisi 2	104
III.B.3. Posisi 3	114
III.B.4. Posisi 4	124
III.B.5. Posisi 5	134
III.B.6. Posisi 6	144
<b>III.C. MOTOR LISTRIK DAN KONTROLLER</b>	154
<b>III.D. PERHITUNGAN SISTEM TRANSMISI PADA TIAP JOINT</b>	161
III.D.1. Perancangan Transmisi Joint 1	161
III.D.2. Perhitungan Transmisi Joint 1,2	172
III.D.3. Perhitungan Transmisi Joint 3,4	179
III.D.4. Perancangan Transmisi Joint 5	187
III.D.5. Perancangan Transmisi Joint 6	197
<b>BAB IV. ANALISIS STRUKTUR ROBOT FS30L</b>	215
IV.1. Kekuatan Struktur Link-5	216
IV.2. Kekuatan Struktur Link-4	218
IV.3. Kekuatan Struktur Link-3	221
IV.4. Kekuatan Struktur Link-2	222
IV.5. Kekuatan Struktur Link-1	224
IV.6. Perhitungan Defleksi tiap Link	226



<b>BAB V. OPERASIONAL DAN PERAWATAN ROBOT FS30L</b> .....	229
V.1. Jadwal Pengecekan .....	229
V.1.1. Pengecekan Perhari .....	231
V.1.2. Pengecekan Tambahan per 5000 jam (satu tahun) .....	232
V.1.3. Pengecekan tambahan per 10.000 jam (2 tahun) .....	233
V.2. Pelumasan .....	234
V.2.1. Application Chart Pelumasan .....	235
V.2.2. Pengecekan Tegangan Timing Belt .....	236
V.2.3. Pengencangan Baut .....	236
V.3. Overhaul setelah 20.000 jam (4 tahun) waktu operasi .....	237
<b>BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	238

## **DAFTAR PUSTAKA**

## **LAMPIRAN**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar I.1. Revolute Robot.....	4
Gambar I.2. Polar Robot.....	5
Gambar I.3. Cylindrical Robot.....	5
Gambar I.4. Cartesian Robot, Sliding type.....	6
Gambar I.5. Cartesian Robot, Gantry type.....	6
Gambar I.6. Scara Robot.....	7
Gambar I.7. Operational Block Diagram of a-six axis Revolute Robot.....	10
Gambar I.8. Repeatability.....	14
Gambar I.9. Accuracy.....	14
Gambar I.10. Repeatability & Accuracy.....	15
Gambar I.11. CNC Polishing Center.....	36
Gambar I.12. Robotic Canopy Polishing.....	39
Gambar I.13. JS 10 Robot Polishing.....	40
Gambar I.14. Polishing Robot for Stainless steel Workpiece.....	40
Gambar I.15. Robotcell for Polishing Brass Lightshades.....	41
Gambar I.16. Abrasive Belt Polishing Robot.....	42
Gambar I.17. Carat Robotic for Buffing Wheel Polishing.....	42
Gambar I.18. Zeta two Robot for Polishing.....	43
Gambar I.19. Polishing Wheel (Bright Work, Inc).....	56
Gambar I.20. Air-flex Polishing Wheel.....	57
Gambar I.21. Stainless steel Compound.....	58
Gambar I.22. Standard Surface Finish Terminology and Symbol.....	61
Gambar I.23. Surface Roughness Measurement.....	62
Gambar I.24. Visualisasi Hasil Proses Polishing.....	67
Gambar II.1. Robot Kawasaki FS30L.....	75
Gambar II.2. Work Envelope Robot Kawasaki FS30L.....	76
Gambar II.3. Dimensi Material yang akan dipolish.....	77
Gambar II.4. Sketsa Proses Polishing menggunakan Robot Kawasaki FS30L.....	78



Gambar II.5. DAN Technology Robotized Systems for Stainless Steel.....	79
Gambar III.A.1. Cara Kerja Gripper Pengganti Tangan Manusia .....	80
Gambar III.A.2. Parallel Gripper .....	81
Gambar III.A.3. Angular Gripper .....	82
Gambar III.A.4. Toggle Gripper .....	82
Gambar III.A.5. 2 Jaw Gripper .....	83
Gambar III.A.6. 3 Jaw Gripper .....	83
Gambar III.A.7. External and Internal Gripper.....	84
Gambar III.A.8. Encompassing and Retention .....	85
Gambar III.A.9. 3-point Gripper HGD-50-A.....	90
Gambar III.B.1. Parameter Link dan Joint pada Robot .....	92
Gambar III.B.2. Model 3D Robot Kawasaki FS30L .....	93
Gambar III.B.3. Posisi 1 .....	94
Gambar III.B.4. Posisi 2 .....	104
Gambar III.B.5. Posisi 3 .....	114
Gambar III.B.6. Posisi 4 .....	124
Gambar III.B.7. Posisi 5 .....	134
Gambar III.B.8. Posisi 6 .....	144
Gambar III.C.1. C-Controller.....	155
Gambar III.C.2. Multi Function Panel.....	156
Gambar III.C.3. Small Sized Teach Pendant .....	157
Gambar III.C.4. AC- Servomotor .....	158
Gambar III.C.5. Brake Assembly .....	158
Gambar III.C.6. Circuit Block Diagram .....	159
Gambar III.C.7. Servo Amplifier Block Diagram .....	159
Gambar III.D.1. Sistem Transmisi Joint 1 .....	162
Gambar III.D.2. Sistem Transmisi Joint 2 .....	172
Gambar III.D.3. Sistem Transmisi Joint 3 .....	179
Gambar III.D.4. Sistem Transmisi Joint 4 .....	180
Gambar III.D.5. Sistem Transmisi Joint 5 .....	187



Gambar III.D.6. Sistem Transmisi Joint 6 .....	197
Gambar IV.1. Posisi Robot Untuk Momen Maksimum .....	216
Gambar IV.2. Penampang Link-5 .....	217
Gambar IV.3. Penampang Link-4(bagian I) .....	219
Gambar IV.4. Penampang Link-4(bagian II) .....	220
Gambar IV.5. Penampang Link-3 .....	221
Gambar IV.6. Penampang Link-2 .....	223
Gambar IV.7. Penampang Link-1 .....	225
Gambar V.1. Lubricant Application Chart .....	235
Gambar V.2. Belt Tension Spesification .....	236



## DAFTAR TABEL

Tabel I.1. Sejarah Perkembangan Organisasi Robot .....	17
Tabel I.2. Tipe Compound dan Kegunaannya .....	57
Tabel I.3. Penggunaan Compound dan Materialnya.....	59
Tabel I.4. Lay Symbols for Engineering Surfaces .....	64
Tabel I.5. Tingkat Kekasaran beberapa Komponen Engineering.....	65
Tabel I.6. Kisaran Tingkat kekasaran dari berbagai macam proses Manufaktur.....	66
Tabel II.1. Spesifikasi Robot Kawasaki FS30L.....	72
Tabel III.A.1. Spesifikasi 3-point Gripper HGD-50-A.....	90
Tabel III.C.1. FS30L-series Servomotors.....	154
Tabel III.C.2. Spesifikasi Encoder.....	160
Tabel III.D.1. Perhitungan Transmisi Joint 1,2 .....	173
Tabel III.D.2. Perhitungan Transmisi Joint 3,4 .....	180
Tabel III.D.3. Perhitungan Transmisi Joint 5 .....	192
Tabel III.D.4. Spesifikasi Bevel Gear pada Joint 6.....	207
Tabel III.D.5. Perhitungan Transmisi Joint 6 .....	210
Tabel V.1. Preventive Maintenance Schedule .....	230
Tabel V.2. Daily Maintenance Checks .....	231
Tabel V.3. 5,000 Hour Maintenance Checks .....	232
Tabel V.4. 10,000 Hour Maintenance Checks.....	233
Tabel V.5. FS30L Lubricants.....	234
Tabel V.6. Tightening Torque Values .....	237



## DAFTAR TABEL

Tabel 6.2 Harga Modul Standar (JIS B 1701-1973) .....	245
Tabel 5.1 Faktor Koreksi .....	245
Tabel 6.5 Faktor Bentuk Gigi .....	246
Tabel 6.6 Faktor Dinamis $f_v$ .....	246
Tabel 6.8 Faktor Tegangan Kontak pada Bahan Roda Gigi .....	246
Tabel 6.7 Tegangan Lentur yang Diijinkan $\sigma_a$ pada Bahan Roda Gigi .....	247
Tabel 1.1 Baja Karbon untuk Konstruksi Mesin dan Baja Batang yang dfinis dingin untuk Poros .....	249
Tabel 1.2 Baja Paduan untuk Poros .....	249
Tabel 1.8 Ukuran Pasak dan Alur Pasak .....	250
Tabel 6.16 TeganganLentur yang Diijinkan dan Tegangan Kontak yang Diijinkan (roda gigi kerucut).....	251
Tabel 6.17 Faktor Beban Lebih $K_o, C_o$ .....	251
Tabel 6.18 Faktor Pembagian Beban $K_m, C_m$ .....	252
Tabel 6.19 Koefisien Elastic $C_p$ ( $\sqrt{\text{kg/mm}}$ ).....	252
Tabel 6.20 Tegangan Lentur yang Diijinkan $\sigma_{ba}$ ( $\text{kg/mm}^2$ ).....	253
Tabel 6.21 Faktor Bentuk Roda Gigi Cacing $Y$ .....	253
Tabel 6.22 Faktor Tahan Aus $K_c$ .....	253
Tabel 6.23 Faktor Sudut Kisar $K_\gamma$ .....	253
Tabel 5.10 (a) Tipe, Ukuran dan Pemakaian Sabuk Gilir .....	255
Tabel 5.10 (b) Nomor Nominal, Jumlah Gigi, dan Panjang, untuk Sabuk Gilir Standar .....	256
Tabel 5.11 Faktor Koreksi yang Harus Ditambahkan untuk Meningkatkan putaran dan Persyaratan Kerja Luar Biasa.....	256
Tabel 5.12 Kapasitas Daya yang Ditransmisikan setiap Inch (25,4 mm) Lebar Sabuk Gilir, $P_o$ (kW).....	257
Tabel 5.13 Jumlah Gigi Puli Minimum yang Diijinkan .....	258
Tabel 5.14 Faktor Koreksi untuk Berbagai J.G.T.(Jumlah Gigi Terkait).....	258
Tabel 5.15 $\Delta C_i$ dan $\Delta C_t$ untuk Sabuk Gilir.....	259
Tabel 4.1 Sifat-sifat Bahan Bantalan Luncur.....	261
Tabel 2.25 Sifat-sifat Mekanik Paduan Al-Cu-Mg.....	262

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 6.24 Diagram Pemilihan Modul Roda Gigi Lurus (Lenturan).....	248
Gambar 6.26 Faktor Bentuk Roda Gigi untuk Roda Gigi Lurus .....	248
Gambar 6.36 Faktor Dinamis Roda Gigi Kerucut .....	251
Gambar 6.37 Roda Gigi Kerucut Lurus dengan Sudut Tekanan $20^\circ$ dan Sudut Poros $90^\circ$ .....	252
Gambar 6.33 Nama Bagian-bagian Roda Gigi Kerucut .....	254
Gambar 6.38 Roda Gigi Kerucut Lurus dengan Sudut Tekanan $20^\circ$ dan Sudut Poros $90^\circ$ .....	254
Gambar 5.15 Lebar Sabuk Gilir Standar.....	257
Gambar 5.13 Sabuk Gilir .....	258
Gambar 5.14 Diagram Pemilihan Sabuk Gilir.....	258



## Daftar Notasi

a	jarak sumbu poros (mm)
A	luas penampang ( $\text{mm}^2$ )
$\Delta C_l \Delta C_t$	daerah penyetelan (mm)
b	lebar roda gigi (mm)
$c_k$	kelonggaran puncak (mm)
$c_o$	kelonggaran belakang (mm)
c	jarak sumbu poros puli (mm)
C	beban nominal dinamis (N)
$C_p$	perbandingan jarak sumbu poros dengan jarak bagi
d	sudut kerucut jarak bagi ujung luar ( $^\circ$ )
$\delta$	sudut kerucut jarak bagi ( $^\circ$ )
$\delta_k$	sudut kerucut kepala ( $^\circ$ )
$\delta_f$	efisiensi
$d_B$	diameter naf puli kecil (mm)
$d_f$	diameter kaki (mm)
$d_k$	diameter lingkaran kepala (mm)
$d_o$	diameter lingkaran jarak bagi (mm)
$d_p$	diameter jarak bagi puli kecil (mm)
$d_s$	diameter minimum poros pejal (mm)
$D_B$	diameter naf uli besar (mm)
$D_p$	diameter jarak bagi puli besar (mm)
$f_v$	faktor dinamis
$f_w$	faktor lebar
$F_n$	berat roda gigi ke-n (kg)
$F_b = F'_b = F_{ab}$	beban lentur yang diijinkan ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )
$F_c$	faktor koreksi
$F_H = F_{ac} = F'_H$	beban permukaan yang diijinkan ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )
$F_{\min}$	beban terkecil yang diijinkan ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )
$F_H$	beban permukaan yang diijinkan ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )
$F_r$	gaya radial yang terjadi (N)
$F_t$	gaya tangensial (kg)
g	percepatan gravitasi ( $9,807 \text{ m/s}^2$ )
G	modulus geser ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )
$\gamma$	sudut kisar ( $^\circ$ )
$h_f$	tinggi kaki (mm)
$h_k$	tinggi kepala (mm)
H	kedalaman gigi penuh (mm)
HB	kekerasan <i>brinell</i>
HRC	kekerasan <i>rockwell</i>
i	rasio kecepatan
I	momen inersia ( $\text{mm}^4$ )
J	faktor geometri



$J_n$	momen girasi ( $\text{gram.cm}^2$ )
JGT	jumlah gigi terkait
$k_H$	faktor tegangan kontak
$K_v$	faktor dinamis
$K_o$	faktor beban lebih
$K_m$	faktor distribusi beban
$K_s$	faktor ukuran
$K_c$	faktor tahan aus
$K_\gamma$	faktor sudut kisar
$L_h$	umur nominal bantalan (jam)
$L_p$	panjang keliling sabuk gilir (mm)
m	modul
M	momen lengkung ( $\text{kg.mm}$ )
n	putaran (rpm)
p	jarak bagi penampang sabuk gilir (mm)
$P_m$	daya yang ditransmisikan (kW)
$P_d$	daya perancangan (kW)
$P_o$	daya yang ditransmisikan persatuan lebar (kW)
r	jari-jari jarak bagi roda gigi (mm)
R	sisi kerucut (mm)
$\sigma_T$	tegangan tarik ( $\text{kg/mm}^2$ )
$\sigma_B$	kekuatan tarik ( $\text{kg/mm}^2$ )
$\sigma_a$	tegangan lentur yang diijinkan ( $\text{kg/mm}^2$ )
$\sigma_b$	tegangan lentur ( $\text{kg/mm}^2$ )
s	tebal lingkaran gigi (mm)
$S_f$	angka keamanan
$\Sigma$	sudut poros ( $^\circ$ )
t	waktu (detik)
$T_d$	torsi untuk perencanaan (N.m)
$\tau_a$	tegangan geser ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )
$\tau_j$	torsi joint (N.m)
$\theta$	sudut kontak ( $^\circ$ )
$\theta_k$	sudut kepala ( $^\circ$ )
$\theta_f$	sudut kaki ( $^\circ$ )
v	kecepatan keliling (m/s)
$\omega$	kecepatan sudut (rad/s)
$W_b$	lebar sabuk gigi di pasaran (mm)
$W_w$	lebar gigi puli (mm)
x	faktor perubahan kepala
X	jarak dari puncak ke puncak gigi luar (mm)
Y	faktor bentuk gigi
z	jumlah gigi

## BAB I

### PENDAHULUAN

#### I.1. Definisi Robot

Berdasarkan fakta terdapat banyak definisi robot, bila kita bertanya kepada orang awam biasanya mereka akan menjawab bahwa robot adalah mesin yang mirip manusia yang banyak digambarkan di buku-buku komik maupun film-film. Belum ada suatu definisi yang dijadikan sebagai standar untuk internasional, namun demikian ada beberapa definisi yang dibuat oleh perkumpulan yang bergerak di bidang robot yang dapat kita jadikan acuan untuk memahami pengertian robot sekaligus mengetahui/membedakan antara robot dan yang bukan robot.

*British Robot Assosiation (BRA)* mendefinisikan robot sebagai<sup>1</sup> “*sebuah peralatan yang dapat diprogram ulang dan mempunyai minimal 4 derajat kebebasan untuk menggerakkan dan memindahkan barang, alat atau perkakas tertentu menurut gerakan yang terprogram untuk melaksanakan pekerjaan produksi tertentu*”. BRA membatasi definisi robot untuk minimum 4 derajat kebebasan gerak, sehingga jika suatu mesin yang mempunyai kurang dari 4 derajat kebebasan menurut pengertian ini bukanlah sebuah robot.

*Robotics Institute of America (RIA)* mendefinisikan robot sebagai<sup>1</sup> “*sebuah alat yang dapat diprogram ulang dengan multifungsi manipulator untuk menggerakkan material, barang, alat, atau peralatan khusus menurut gerakan yang diprogram guna melakukan bermacam-macam pekerjaan*”.

*Japan Industrial Robot Association (JIRA)* dan *Japanese Industrial Standards Committee* [1.1] di dalam daftar istilah-istilah untuk industri robot (JIS B 0134-1979) mendefinisikan<sup>1</sup> “*Manipulator adalah sebuah mesin yang mempunyai fungsi yang hampir sama dengan bagian atas tubuh manusia, dan menggerakkan suatu obyek dari suatu*

<sup>1</sup> *Engineering Foundations of Robotics* (Francis N. Nagy Phd.) Department of Electronic and Electrical Engineering University of Salford, United Kingdom (Andras Siegler Dr Eng) Computer and Automation institute Department of Robotics and Computer Vision Hungarian Academy of Sciences Budapest, Hungary.



tempat ke tempat yang lain dalam satu ruang (No.1101)\*...*Playback* robot adalah sebuah manipulator yang dapat melaksanakan suatu operasi dengan membaca informasi memori untuk urutan operasi, termasuk kedudukan dan sejenisnya yang dipelajari secara manual terlebih dahulu [No.1108]”.

Salah satu perbedaan pendekatan standarisasi antara Negara barat dengan Jepang adalah negara barat tidak mengklasifikasikan *fixed (dedicated) machines* sebagai robot meskipun kadangkala mesin tersebut cukup fleksibel. Sebagai contoh sebuah mesin pemotong otomatis beroperasi menurut urutan proses yang tidak dapat diubah tanpa mengindahkan bagaimana input yang diberikan, menurut standar Jepang mesin pemotong ini merupakan sebuah robot (istilah Jepang : *fixed sequence robot*, IIS B 0134-1979, No. 1104), contoh yang lain adalah *pick and place devices* yang mengangkat sebuah lembaran dari suatu posisi dan kemudian menurunkannya ke mesin pemotong. Meskipun menurut fakta mesin tersebut dapat *disetting* secara manual tetapi mesin tersebut cukup fleksibel, menurut standar barat mesin tersebut bukanlah sebuah robot, mesin tersebut dapat disebut sebuah robot jika penyetelan operasi dapat dilakukan menggunakan *software*. Menurut standar Jepang mesin *pick and place* tersebut merupakan sebuah robot.

Sebuah mesin CNC menurut standar Barat tidak cukup fleksibel untuk disebut sebagai robot dikarenakan mesin CNC hanya digunakan untuk melakukan pekerjaan yang tetap, namun di lain pihak menurut standar Jepang mesin tersebut bisa disebut sebagai sebuah robot.

*Computer Aided Manufacturers International (CAM-I)* USA mendefinisikan robot sebagai<sup>1</sup> “sebuah alat untuk menjalankan beberapa fungsi yang biasa dilakukan manusia atau terlihat beroperasi seperti memiliki kecerdasan manusia”.

Ada pendapat yang lain yang mendefinisikan robot sebagai<sup>1</sup> “sebuah mesin otomatis dengan derajat kepastian sendiri, yang didesain untuk berinteraksi secara aktif kepada lingkungannya”. Menurut definisi ini robot adalah sebuah mesin otomatis, istilah inilah yang dapat menimbulkan suatu kebingungan. Sebuah mesin, untuk dapat disebut sebagai robot harus dapat merespon sebuah rangsangan berdasarkan informasi yang diterima dari lingkungan, tidak peduli kemungkinan terbatasnya lingkungan tersebut.



Robot akan menterjemahkan respon secara buta atau menggunakan sensor aktif untuk membawa perubahan yang dibutuhkan lingkungannya.

Untuk membedakan secara lebih jelas lagi definisi robot, kita membagi robot berdasarkan fungsi operasi yang dijalankannya yakni ; “*sensing*” atau merasakan lingkungan dengan menggunakan sensor seperti; penglihatan, suara, sentuhan, jarak, dan sebagainya. “*making decision*” atau membuat keputusan berdasarkan informasi yang diterima dari sensor. Dan yang terakhir adalah “*deciding*” atau aksi yang dibutuhkan apabila sebuah keadaan terjadi atau tidak terjadi.

Dari beberapa definisi diatas terdapat pengertian bahwa robot merupakan sebuah mesin yang merupakan duplikasi atau mencontoh lengan manusia khususnya untuk robot sendi banyak. Pergelangan tangan manusia memiliki tiga buah sendi kecil sedangkan lengan manusia memiliki dua sendi besar yakni bahu dan siku. Untuk pergelangan tangan ketiga sendi tersebut adalah :

*Roll* dengan derajat gerakan  $180^\circ \leftrightarrow 0^\circ \leftrightarrow +90^\circ = 270^\circ$

*Pitch* dengan derajat gerakan  $-90^\circ \leftrightarrow 0^\circ \leftrightarrow +50^\circ = 140^\circ$

*Yaw* dengan derajat gerakan  $-45^\circ \leftrightarrow 0^\circ \leftrightarrow +15^\circ = 60^\circ$

Dengan derajat gerakan tersebut lengan manusia dapat melakukan gerakan yang kompleks, meskipun tidak ada robot yang menyamai lengan manusia, robot dapat melakukan banyak hal yang mengganti peran lengan manusia.

## I.2. Klasifikasi Robot

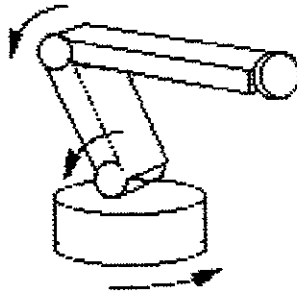
Robot dapat kita klasifikasikan berdasarkan :

1. Bentuk dan gerakan robot.
2. Lintasan berdasarkan kontrol gerakannya.
3. karakteristik pekerjaan dari robot tersebut.



### 1. *Revolute (jointed arm) Robot*

*Revolute Robot* merupakan jenis terbaik dalam meniru gerakan dari tangan manusia dan sering disebut dengan *Anthropomorphic Robot*. Dengan kelebihan tersebut robot jenis ini lebih mudah untuk menyesuaikan diri dalam pekerjaan yang biasa dilakukan oleh manusia dibandingkan dengan robot jenis lain. Contoh Robot Asea (Irb-6, Swedia), Unimation (Puma 550, 560, 760, US dan UK).



**Gambar I.1. Revolute Robot**

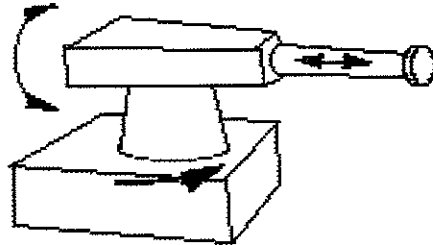
### 2. *Polar (spherical) Robot*

Robot jenis ini berputar dengan sumbu putar pada base, sumbu putar yang kedua adalah sumbu putar horizontal, kedua sumbu tersebut memungkinkan lengan robot berputar pada posisi vertikal. Lengan robot dapat melakukan gerakan melingkar yang membentuk sebuah bagian dari bola, sedangkan tiga derajat kebebasan yang dimiliki oleh robot jenis ini dikarenakan terdapat sebuah *prismatic joint* pada lengan yang dapat bergerak masuk dan keluar. Contoh robot

<sup>2</sup> *Engineering Foundations of Robotics* (Francis N. Nagy Phd.) Department of Electronic and Electrical Engineering University of Salford, United Kingdom (Andras Siegler Dr Eng) Computerr and Automation institute Department of Robotics and Computer Vision Hungarian Academy of Sciences Budapest, Hungary.



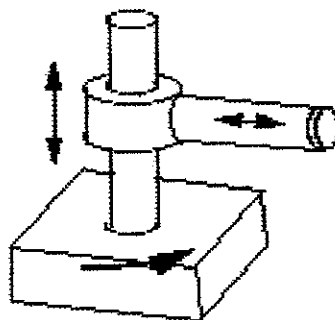
jenis ini antara lain Unimation (series 1000, 2000, 40000, US), Prab (model 4200 dan 5800, Norway), GEC (Little Giant, UK).



**Gambar I.2. Polar Robot**

### 3. *Cylindrical Robot*

Terdiri dari sebuah *base*, sebuah lengan horizontal dan sebuah *prismatic joint*. Semua bagian *base* dapat bergerak turun dan naik, lengan horizontal dapat berputar mengitari sumbu vertikal dan lengan horizontal dapat bergerak masuk dan keluar bersamaan dengan gerak naik atau turunnya *base*. Contoh dari robot silinder ini antara lain : Prab (model E, FA, FB, FC, dan model G series, Norway), Peterson (Wiper 2500, 3000, UK), Fanuc (M-M1, M-M2, M-M3, Japan).

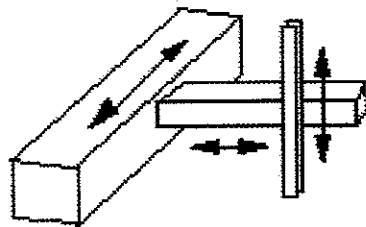


**Gambar I.3. Cylindrical Robot**



#### 4. *Cartesian (rectangular) Robot, sliding type*

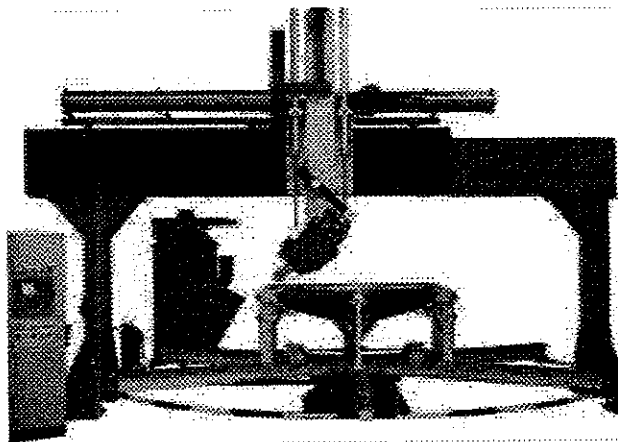
Pada robot jenis ini terdapat tiga sumbu lintasan, diwujudkan dalam gerak naik atau turun, gerak ke kiri atau ke kanan, dan gerak maju atau mundur yang kesemuanya merupakan gerak prismatik pada koordinat kartesian. Meskipun robot ini sangat presisi, robot ini tidak dianjurkan untuk beberapa aplikasi dikarenakan robot ini sulit untuk menyesuaikan diri untuk mengganti peran manusia. Contoh Robot kartesian ini adalah DEA Robot (Digital Electronic Automation SpA, model Pragma A 3000, Italy).



**Gambar I.4. Cartesian Robot, Sliding Type**

#### 5. *Cartesian (rectangular) Robot, Gantry type*

Mekanisme gerak dari robot ini hampir sama dengan tipe *sliding*, hanya yang menjadi perbedaan adalah adanya kerangka luncur yang menjadi lintasan gerak robot. Contoh dari robot jenis ini adalah IBM (7565, US).

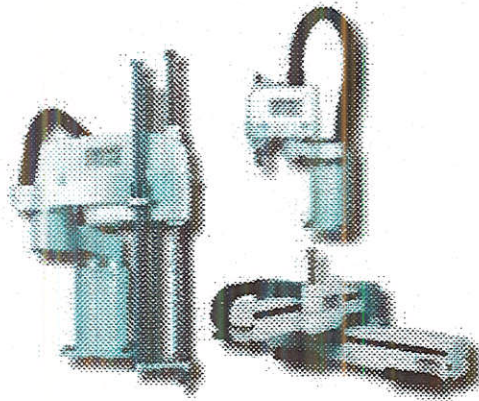


**Gambar I.5. Cartesian Robot, Gantry type**



## 6. SCARA type Robot

SCARA Robot merupakan gabungan dari tipe *revolute* dan *cyndrical*. Pada sambungan putar terdapat sumbu vertikal yang memungkinkan gerakan horizontal. Konfigurasi robot SCARA memiliki sumbu putar vertical utama untuk beban karena gravitasi. Gaya Coriolis dan Sentrifugal tidak membebani struktur seperti jika sumbu tersebut horizontal. Keuntungan ini sangat penting bagi operasional robot pada kecepatan dan ketelitian tinggi. Contoh Robot SCARA antara lain; IBM (7535 dan 7545, US), Meta Machine (adeptone, UK).



**Gambar I.6. Scara Robot**

Berdasarkan klasifikasi yang kedua, yakni lintasan dari kontrol geraknya, Robot terbagi menjadi dua yaitu :

1. *Point-to-Point (PTP) Control*
2. *Continuous Path (CP) control*

Dengan *Point-to-Point Control*, robot diprogram untuk berhenti pada setiap titik guna merencanakan langkah selanjutnya. Meskipun berdasarkan fakta bahwa gerakan robot tidak dikontrol antara *set points*, hal tersebut biasanya terjadi secara alami berdasarkan geometri kinematik dari robot. Untuk robot dengan *Continuous Control* dapat mengikuti semua perintah kontrol secara tepat. *Point-to-Point Control*



menunjukkan tingkat ketelitian dalam hal ketepatan dan *repeatability*, sedangkan *Continuous Path Control* menghasilkan gerak yang halus menurut lintasan yang pasti namun terdapat pengurangan kecepatan menurut hasil komputerisasi menggunakan metode interpolasi. Pengurangan kecepatan ini sekitar 15 – 25 %, yang menyebabkan ketidak ekonomisan proses kontrol, hal ini berakibat efisiensi akan turun jika dibandingkan dengan *Point-to-Point Control* untuk gerakan yang sama.

Berdasarkan karakteristik proses yang dilakukan robot dapat didefinisikan beberapa kriteria robot :

1. *Non-contact path following* – robot tidak langsung menyentuh objek, tetapi mengarahkan *tool* seperti *welding tool* atau *spray gun* dengan jarak tertentu dari *part*.
2. *Contact path following* – robot mengikuti permukaan *part* ketika melakukan operasi seperti *polishing*, atau *deburring*, sering digunakan sensor input seperti besaran gaya dan torsi untuk mengikuti bentuk permukaan *part*.
3. *Repetitive configuration moves* – robot bergerak berdasarkan urutan tertentu yang telah diatur oleh *teach pendant* dan melakukan operasi yang sama pada *part* yang ada, terkadang sensor seperti *vision camera* digunakan untuk mengatur gerak robot jika terdapat penyimpangan posisi *part* atau bentuk *part* yang tidak sama.
4. *Telerobotics* – kontrol terjadi karena hubungan dengan operator, lengan robot bergerak sesuai dengan gerak dengan operator.
5. *Target moves versus taught moves* – pada *target moves tool* robot diperintahkan untuk bergerak ke sebuah posisi tidak secara fisik diajarkan, tetapi diketahui posisi tersebut relatif terhadap *base* robot. Pada *taught move*, robot diperintahkan untuk bergerak ke suatu posisi yang telah diajarkan dan dicatat terlebih dahulu. *Target moves* memerlukan model matematik dari invers kinematik robot, sedangkan *taught moves* hanya membutuhkan sebuah



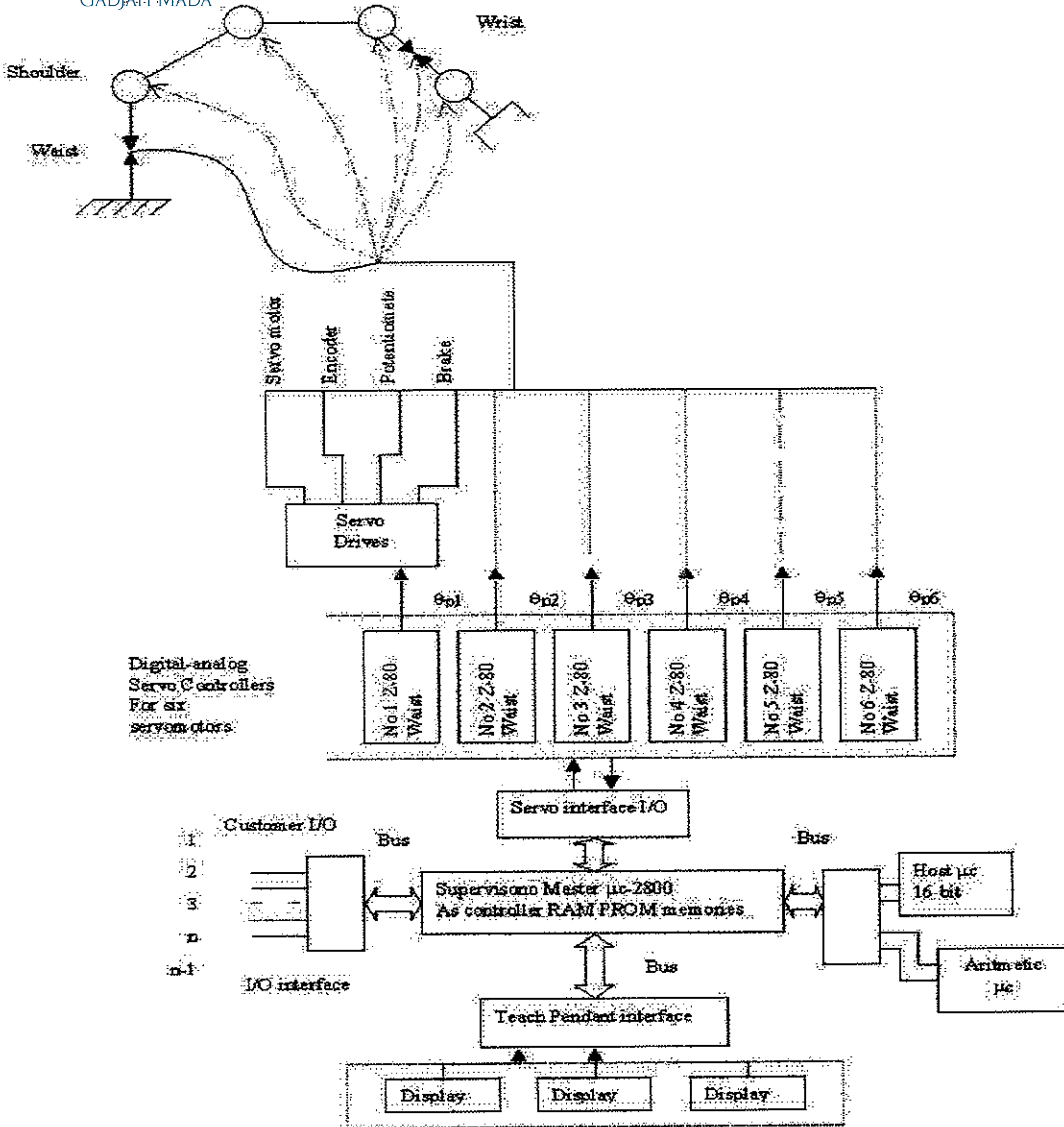
*controller* untuk menggerakkan robot dan dengan encoder akan diketahui putaran *joint* untuk menyusun urutan gerakannya.

Untuk mengerti struktur kinematik dari robot, bagaimana kerja robot, dan kesesuaian dengan pekerjaan yang akan dilakukan, kita harus menguasai berbagai disiplin ilmu seperti; *mechanical and control engineering*, *analog* dan *digital elektronik*, ilmu komputer, proses fabrikasi, dan ilmu manajemen. Berbagai disiplin ilmu tersebut harus berjalan seiring untuk dapat menghasilkan sebuah robot yang benar-benar optimum.

Komponen-komponen utama dari robot adalah :

- *Manipulator*
- *Controller*
- *Power Drive/Supply*
- *Teach Pendant/Manual Control*
- *Auxiliary peripheral terminals*

Robot banyak digunakan di dunia industri dengan derajat kebebasan yang berbeda-beda sesuai dengan pekerjaan yang dilakukan. Untuk *robot workpiece transfer* biasanya digunakan 3 derajat kebebasan, untuk robot dengan aplikasi *pick and place* digunakan 4 derajat kebebasan. Robot industri dengan aplikasi yang lebih kompleks menggunakan robot yang mempunyai derajat kebebasan yang lebih banyak seperti untuk operasi *painting* minimal robot tersebut harus memiliki 5 derajat kebebasan, serta untuk *assembly* digunakan robot dengan derajat kebebasan 6.



Gambar I.7. Operational Block Diagram of a six-axis Revolute Robot.



Akhir-akhir ini terdapat 6 kategori standar untuk robot manipulator yang biasa kita jadikan pertimbangan dalam memilih robot yakni :

1. Terminologi dan Simbologi
2. Karakteristik dengan metode khusus
3. Standar konstruksi robot
4. Aturan-aturan mendesain
5. Metode tes dan kode tes
6. Hasil pemeriksaan

JIS B 0134, *National Bureau of Standards (NBS), US, Department of Commerce* (Special Report 459) merumuskan terminologi kerobotan :

1. Tipe Robot Industri  
Mengklasifikasikan robot industri berdasarkan :
  - 1.1. Informasi dan teaching
  - 1.2. Urutan informasi
  - 1.3. Konfigurasi Operasi
2. Istilah-istilah dasar yang menunjukkan fungsinya
3. Istilah-istilah dasar yang menunjukkan *performance* dan karakteristik
4. Istilah yang menunjukkan kinerja robot
5. Istilah yang menunjukkan operasional dan kontrol robot
6. Istilah yang menunjukkan kepandaian dari robot
7. Istilah yang menunjukkan tingkat keamanan

Istilah-istilah kunci yang terdapat dalam industri robot adalah:

- *Repeatability* – kemampuan mengulang gerakan yang diajarkan sebelumnya.
- *Accuracy* – kemampuan untuk bergerak menuju target yang belum diajarkan sebelumnya.
- *Tool speed* – kemampuan kecepatan linear robot ketika tool bergerak sepanjang garis lurus.



**Screw speed** – kecepatan angular ketika tool berputar pada sebuah sumbu.

- *Joint interpolated motion* – gerakan dimana suatu joint membutuhkan waktu terlalu lama untuk menentukan gerakan, sedangkan *joint* lain bergerak lambat secara proporsional sehingga semua *joint* tersebut menyelesaikan perubahan gerak masing-masing secara terus-menerus terhadap *joint* yang bergerak paling lambat.
- *Joint limits* – batas *software* atau *hardware* yang memaksa *joint* robot bergerak pada jangkauan maksimum. Batas *software* mempunyai jangkauan yang lebih kecil dari pada batasan *hardware*.
- *Joint speed limits* – batas kecepatan untuk *joint* robot yang membatasi kecepatan *links* robot dapat berpindah atau berputar.
- *Point-to-point motion* – karakteristik *starting* dan *stopping* antara gerakan *tool* menuju target-target.
- *Continous path motion* – karakteristik gabungan gerakan antara banyak target, biasanya disertai dengan pengurangan *accuracy* karena perpindahan target.
- *Interpolation (kinematic) capabilities* – robot biasanya mempunyai kemampuan untuk *forward* dan *inverse kinematics*. Gabungan keduanya memberikan kemampuan robot untuk bergerak pada koordinat *joint* dan kartesian yang kita maksudkan adalah gerak *joint*, linear atau gerak melingkar.
- *Forward kinematic* – menghitung kordinat *joint* untuk menyelesaikan sebuah gerakan robot, hal ini tidak semudah yang terlihat dikarenakan adanya *secondary joint* seperti *four-bar linkages*, *ball screws* dan lain-lain yang mungkin dibutuhkan untuk menyelesaikan gerakan ini.
- *Inverse kinematics* – menyelesaikan persamaan matematik dari kinematik robot untuk menghitung koordinat *joint* yang diperlukan untuk menggerakkan *tool* ke posisi tujuan. Hal ini diselesaikan dengan memperlihatkan koordinat *tool* pada sumbu x, y, z dan koordinat target merupakan *part* atau titik operasi dalam *workcell* . Inverse kinematik



menghitung koordinat *joint* yang menggerakkan sumbu koordinat *tool* dengan sumbu koordinat target.

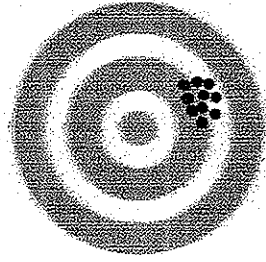
- I/O – input/output yang terdiri dari sinyal ON/OFF, *threshold values*, atau sinyal analog yang memungkinkan mengontrol atau merespon *external devices/sensors* untuk urutan kerja *workcell*.
- *Programming language* – bahasa dan logika susunan yang digunakan untuk memprogram perintah operasi guna mengontrol gerakan robot dan hubungannya dengan sensor dan peralatan lain.
- *Multi-tasking* – kemampuan untuk memproses lebih dari satu program dalam satu waktu atau proses I/O secara bersama-sama.
- *Load capability* – gaya dan torsi yang mampu diterima oleh robot untuk menggerakkan *tool*.
- TCF – *Tool* atau *Terminal Control Frame*.
- TCP – *Tool/Terminal Control Point*.
- *Teach Pendant* – alat operator yang digunakan untuk mengajarkan atau menyimpan urutan gerak robot dan perintah program yang sederhana.

### Repeatibility & Accuracy

Di dalam industri, sebuah robot tidak harus akurat untuk dapat menjadi *repeatable*, meskipun, sebuah robot tidak lebih akurat dari pada *repeatability*-nya. Untuk itu, *accuracy* lebih rendah dari pada *repeatability*. Kedua istilah ini berhubungan, namun tidak saling mempengaruhi, untuk itu sangat penting untuk memahami perbedaan antara dua jenis istilah ini.

- *Repeatability*

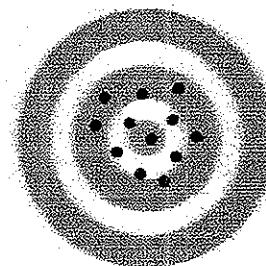
*Repeatability* adalah derajat dimana sebuah robot mampu untuk kembali ke sebuah titik referensi, seperti ujung dari *tool*, di dalam sebuah *workcell*. Perhatikan pada sebelah kanan dari *bullseye* dimana penembak menembak sasaran terkumpul saling berdekatan, meskipun begitu berada jauh dari *bullseye*. *Repeatability* dapat dimengerti sebagai sejauh mana sebuah group dapat dibuat.



**Gambar I.8. Repeatability**

- *Accuracy*

*Accuracy* adalah derajat dimana sebuah lengan robot dapat bergerak ke sebuah titik yang diperintahkan dalam *workcell* ketika koordinat titik tersebut dimasukkan dari sebuah *offline programming station*, dihitung oleh program, atau diterima dari sebuah *vision system*. *Accuracy* menggambarkan seberapa dekat lengan tersebut akan bergerak ke titik tersebut. Pada *bullseye* dibawah, perhatikan bahwa semua lubang yang ditembak mendekati sasaran, tetapi masing-masing titik saling berjauhan. Kita tidak harus mempunyai *repeatability* yang bagus untuk mendapatkan *accuracy* yang baik.

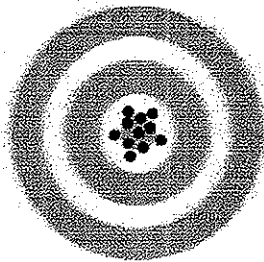


**Gambar I.9. Accuracy**



## Accuracy dan Repeatability

*Accuracy* dan *repeatability* adalah perhitungan dimana seberapa dekat sebuah *offline programmed point* dari robot dapat terjadi, dan seberapa dekat masing-masing titik tersebut. Perhatikan pada *bullseye* dibawah, titik-titik lubang semuanya ditengah-tengah target dan titik-titik tersebut saling berdekatan. Ini merupakan sebuah *accuracy* dan *repeatability* yang bagus. Sebuah robot dalam keadaan ini akan paling mudah untuk dilakukan *off-line program*.



**Gambar I.10. Repeatability and Accuracy**

Sejak dimulainya otomatisasi, *repeatability* telah menjadi sebuah masalah yang membutuhkan sebuah pemecahan. Ketika telah melakukan pekerjaan-pekerjaan, robot dapat mengalami keausan pada *machine ways* dan *bearingnya*. Keausan ini sangat berpengaruh besar pada *accuracy* dan *repeatability* robot, yang dapat mengakibatkan kesalahan kerja sampai pada kerugian materi bahkan kecelakaan operator. Ada beberapa metode yang berbeda untuk mengkoreksi penyimpangan ini, semua dengan teknologi yang bervariasi. Meskipun begitu pada dasarnya adalah dengan mensetting sebuah *repeatability checker*. Hal ini merupakan pengaturan yang sangat sederhana. Pada ujung *wrist* robot, bor sebuah lubang menggunakan 3/6" pisau *drill* dengan kedalaman 1/2" dari *wrist*. Pada sebuah daerah kerja robot, *install* sebuah *limit switch* dengan pisau *drill* yang sesuai. Buatlah program kepada robot untuk mengambil pisau *drill* pada *wrist* ke pisau *drill* pada *switch*. Jika kontak yang benar terjadi, IO membolehkan robot untuk melanjutkan pekerjaan, namun jika tidak robot akan berhenti dan operator akan segera tahu bila ada masalah dengan *repeatability* nya. Jika *switch* dapat dibuat dan titik-titik



masih mati, kemungkinan terdapat masalah pada *torch alignment*, *tooling*, *part* dan lain-lain.

*Repeatability* bagaimanapun juga bukan hanya satu-satunya masalah yang dihadapi robot. *Repeatability* dari sebagian besar robot industri jauh lebih baik dari pada *accuracy*-nya. Umumnya *repeatability* berkisar antara 0.5 mm sedangkan *accuracy* sekitar 10 mm atau lebih jelek. Hal ini bukanlah merupakan sebuah masalah jika program robot menggunakan *teach pendant* dan penglihatan manusia. Adanya masalah hanya pada *repeatability*-nya. Meskipun begitu ketika memprogram sebuah robot menggunakan sistem *offline* untuk menggerakkan robot secara numerik, *accuracy* robot menjadi sangat penting.

Dalam teorinya, dimungkinkan untuk memperbaiki *accuracy* sehingga dapat sebaik *repeatability*-nya. Alasan mengapa *accuracy* dari robot sangat buruk adalah karena terdapat toleransi manufaktur yang terjadi selama proses produksi dari setiap robot. Dua sumber kesalahan terbesar adalah ketidaksesuaian pada panjang *link* robot dan titik nol pada setiap *joint*.

Yang dibutuhkan adalah sebuah sistem yang dapat memperhitungkan posisi xyz dari ujung robot, membandingkan dengan perkiraan posisi robot tersebut, dan akhirnya memperkirakan kesalahan (*error*) dan mencontohkan kesalahan ini untuk memperbaiki *accuracy* dari *offline programming*.

Terdapat juga *software* yang dapat memecahkan masalah tersebut yang disebabkan oleh *backlash*, *wear*, dan *normal vagrance* mesin.

Para *engineer* dari seluruh dunia berlomba-lomba mendesain mekanisme yang teruji untuk menjaga pertumbuhan penawaran untuk proses otomatisasi, robot melakukan banyak hal yang menakjubkan. Ketika sebagian besar para manufaktur robot mengklaim sebuah *repeatability* sebesar 0.2 mm (0.008 *inches*), CNC *machine tool* (bukan disebut robot) manufaktur mengklaim *repeatability* sebesar 0.0000254 mm (0.000001 *inches*) dan *accuracy* seimbang. Hal ini sebagian besar merupakan harapan dari keluhan dan toleransi manufaktur terlibat didalamnya. Sebuah mesin CNC ukuran sedang dapat membawa kemana saja dari 4-7 ton (8000-14000 lbs) dan mengangkat sampai dengan 1300 *inches*



per menit. Sebuah robot mungkin dapat membawa sekitar 2000 pounds dan mengangkat 800 *inches* permenit. Tantangan yang dihadapi para engineer sekarang adalah bagaimana dapat mengawinkan keduanya. Membuat sebuah robot yang mempunyai *repeatability* dan *accuracy* yang sama dengan mesin CNC dan semakin cepat gerakannya.

### I.3. Sejarah Perkembangan Robot Industri

Robot Industri dipatenkan pertama kali oleh George de Vol pada tahun 1954 beserta peralatan penunjang seperti; kontrol fotoelektrik, sistem rekam magnetik, namun sebetulnya robot telah digambarkan lewat imajinasi pada film *Star Wars* dan *Return of The Jedi*. Kata robot berasal dari kata Czech robotit yang berarti melakukan pekerjaan yang membosankan, istilah ini diperkenalkan oleh penulis drama berkebangsaan Czech, Karl Capek dalam karyanya yang berjudul *Rossum's Universal Robot (R.U.R)* awal tahun 1920-an.

Seorang insinyur perusahaan pesawat, Joe Engelberger tertarik dengan karya De Vol dan meyakinkan perusahaannya untuk mengembangkan robot, namun baru berhasil setelah Consolidated Diesel Electric bergabung dan terbentuk Unimation tahun 1960 dengan produk pertamanya Unimate untuk *die-casting* dan dijual kepada General Motor.

Setelah itu berdiri organisasi lain yang menekuni robot, perkembangan organisasi yang menekuni bidang robot disajikan dalam bentuk tabel sebagai berikut :

**Tabel I.1. Sejarah perkembangan organisasi robot**

NO	NAMA ORGANISASI	DIDIRIKAN
1.	Japan Industrial Robot Association (JIRA) c/o Kikaishinko Kaikan BL dg. 3-5-9. Shibakoen, Minato-ku, Tokyo 105 Japan.	Oktober 1972
2.	Robotic Industries Association (RIA)* one SME-Drive, 20501 Ford Road PO Box 1366 Dearborn, Michigan 48121 USA.	Juni 1974

<sup>3</sup> [www2.et.byu.edu/~ered/robotics](http://www2.et.byu.edu/~ered/robotics)



3.	Italian Society for Industrial Robots (SIRI) c/o Etas compass, Via Mantegna, 6 Milano itali.	1975
4.	British Robot Association (BRA) 35-39 Hgh Street, Kempston, Bedford MK 427BJ United Kingdom.	1977
5.	French Industrial Robot Association (AFRI) 91 rue Falquieue, 75015 Paris, France.	1978
6.	Robotics International of SME one SME Drive Po box 930, Dearborn, Michigan 48128 USA.	1980
7.	Swedish Industrial Robot Association (SWIRA) storgatan 19, Box 5506 S-11485 Stoclholm Sweden.	1980
8.	Australian Robot Association 9 Queens Avenue MC Mohans Point, Sydney, NSW 2060 Australia.	1981
9.	Fachgemeinschaft Montagetechnik. Habdhabung Stechnik und Industrie Robot Postfach 710109 c/o VDMA D-6000 Frankfurt (Main) 71 West Germany.	Oktober 1981
10.	Danish Industrial Robot Association (DIRA) c/o Technological Institute Div of Industrial Automation. Gregersensvej Post box 141, OK-2630 Taasbup, Denmark.	Febuari 1982
11.	Singapore Robotic Association 5 Portsdown, Road, Off Ayer Rajah Road Singapore 0513 Republic of Singapore.	Juni 1982
12.	Robotic Society of Japan (Address, see JIRA)	Januari 1983
13.	The Robotics Society in Finland Po box 5500331 Helsinki 33 Finland	March 1983

Industri Otomotif di Amerika pada tahun 1999 mengalami peningkatan sampai 20 % dalam penggunaan robot untuk Industri Otomotif, mereka membeli lebih dari 60 %



robot pada tahun tersebut<sup>4</sup>. Fenomena ini terjadi seiring dengan relatif menurunnya harga robot untuk mendukung sistem fabrikasi mereka.

Semakin banyak perusahaan yang menggunakan robot untuk berbagai aplikasi untuk *metalcasting*, dari sistem sederhana seperti *mold* dan *core handling* sampai proses *cleaning rooms*, *machining*, *assembly*, robot banyak sekali digunakan untuk operasi *metalcasting*.

Salah satu hal yang menjadi pertimbangan memilih sistem robot adalah tingginya derajat fleksibilitas dalam operasionalnya, dan sekarang robot telah mengalami kemajuan yang sangat besar dalam hal fleksibilitas dibandingkan sepuluh tahun yang lalu. Kebutuhan konsumen semakin meningkat yang mengharuskan perusahaan memenuhi produk yang sangat beragam dengan volume yang dapat turun ataupun naik. Robot mampu untuk melakukan proses belajar, *machine vision*, kecerdasan buatan, dan teknologi peralatan yang fleksibel dapat memenuhi kapasitas serta keinginan dari pasar.

*Sophisticated software* dan *control* tergabung dalam sebuah operasi fabrikasi yang mendukung sistem yang fleksibel. Sistem yang fleksibel tersebut mampu membantu proses fabrikasi dengan cepat bila terjadi pergantian jadwal, desain yang variatif, dan merakit beberapa tipe dari komponen dengan meminimalisir *changeover times*.

Sebagai *customer* yang mengambil sikap "*Do what ever what ever I want- whenever I want it*" atau lakukan apapun, apapun yang saya inginkan kapanpun saya menginginkannya, banyak perusahaan yang menggantungkan fabrikasi dengan mengurangi *waste*, perencanaan kapasitas produksi rata-rata, mengurangi biaya dan waktu operator, peluncuran, dan pengiriman serta semakin pandai untuk menggunakan otomatisasi.

Kekuatan sistem robot adalah pada kemampuan untuk menyelesaikan berbagai operasi yang membutuhkan fleksibilitas, tetapi robot sendiri tidak akan mampu menjadi fleksibel atau digantungkan jika desain, *manufacturing*, *supplier* dan *customer* tidak diperhatikan.

Ketika sistem robot baru diperkenalkan dan digunakan pada proses di industri sekitar satu setengah dekade yang lalu, terdapat pandangan yang buruk tentang robot

<sup>4</sup> Journal - *Foundry Management & Technology*, John R Wright, 2000



yang diaplikasikan di industri manufaktur, otomotive misalnya, perusahaan Hamtranck, Michigan, terjadi kesalahan robot yang digunakan untuk *painting*(cat) mobil dimana ketika itu beberapa robot saling mengecat satu sama lain. Hal itu terjadi di waktu yang lalu, khususnya pada perkembangan teknologi robot dan sistem otomasi lain yang berhubungan.

Berikut akan digambarkan sebuah data yang menggambarkan perkembangan teknologi robot yang sangat cepat. “ Hal yang tidak terjadi sebelumnya ketika banyak sekali permintaan akan robot industri khususnya di bidang Otomotif yang menjadi penggeraknya,” dikatakan oleh Jan Karlsson, direktur *United Nations Commission for Europe* (UN/ECE). Di seluruh dunia melakukan permintaan untuk robot industri meningkat sampai 20 % pada tahun 1999 dari pada tahun 1998, Amerika Utara paling besar permintaan akan robot *skyrocketed* 60 %. Industri di Eropa meningkat permintaan akan robot 12 %, di lain pihak mereka meningkat 31 % pada tahun 1998. dari kesemuanya itu nampak sekali bahwa pada abad ke-21 ini merupakan “*the Age of the Robot*”<sup>5</sup>.

Industri otomotif memberikan peranan yang terbesar pada tahun 1999, pembeliannya meningkat 24% dari tahun sebelumnya di seluruh dunia. Angka 60 % tersebut menggambarkan bahwa “*North America is the hottest robotics market in the world...triple the worldwide rate of growth*”, seperti yang dikatakan oleh Donald A. Vincent, Executive Vice President RIA (Robotics Industries Association, Ann Arbor, Michigan. Amerika Utara melakukan pembelian pada tahun 1999 sebanyak 17.591 buah robot dengan total harga \$1,4 billion, jenis robot yang terbanyak adalah *spot welding robots* yang meningkat sebesar 102 %, diikuti oleh *assembly robots* yang meningkat 100 %, seterusnya yakni *material handling* sebesar 52 % dan *Arc welding* sebesar 46 % dibandingkan dengan tahun 1998<sup>6</sup>.

Menurut RIA sekarang terdapat lebih dari 100.000 robot yang beroperasi di Amerika utara yang menempatkan Amerika sebagai negara terbanyak kedua setelah Jepang yang menggunakan robot dari segala bidang. Sebelumnya hanya terdapat 10 %

<sup>5</sup> Journal - *Foundy Management & Technology*, John R Wright, 2000

<sup>6</sup> Journal – *Material Handling Management*, vol 55, George Weimer, 2000



dari perusahaan manufaktur yang sebenarnya dapat memanfaatkan robot untuk produksinya yang menggunakan robot dan selebihnya belum menggunakan robot.

Penggunaan robot pada manufaktur meningkat sangat cepat disebabkan karena beberapa hal, menurut Eric Mittelstadt, *chairman emeritus* dari *Fanuc Robotics North America Inc*, Rochester Hills, Michigan. "robot dewasa ini lebih mudah untuk diprogram, robot juga sangat terbuka untuk berhubungan dengan komputer untuk meningkatkan proses. Biaya untuk mendapatkan informasi robot makin lama semakin berkurang termasuk biaya *software*, bahkan sekarang penggunaan robot semakin luas di industri, sekarang dapat kita lihat robot digunakan untuk "*material removal*" dan menggantikan mesin seperti "*CNC grinders*".

Salah satu faktor utama pada peningkatan sampai 60 % diatas adalah *United States Post Office* yang melakukan pembelian robot seharga \$60 million, bagaimanapun juga aktivitas pada sistem robot dan otomatisasi sekarang pada puncaknya. Investasi pada sistem robot bagaimanapun juga menjadi sangat rumit dan membutuhkan teknologi tinggi, sehingga banyak perusahaan yang melakukan "*simulation route*" sebelum melakukan pada "*actual hardware*".

Bob Brown, presiden Deneb Robotic Inc, Troy, Michigan, a *subsidiary of Dassault Systems*, Paris mengatakan bahwa Pendekatan dengan simulasi 10.000 kali lebih murah dalam menyelesaikan masalah dari pada langsung pada hardware. Semakin banyak perusahaan yang menggunakan peralatan digital untuk memecahkan masalah dikarenakan tingginya biaya jika terjadi kesalahan dan besarnya modal yang dikeluarkan untuk proses otomatisasi<sup>7</sup>.

*Fanuc Robotics of America* melakukan peragaan peningkatan fungsi robotnya pada tahun 2000 bersama Mori Seiki dalam hal penggabungan dengan peralatan lain di Westec, Los Angeles. Robot terbaru dari Fanuc yakni *Toploader Robots* khususnya M-710iT digabungkan dengan Moti Seiki SV500 *vertical machining center* dan sebuah SL *turning center*. Rel robot yang disediakan membuat sebuah "mobile robot" yang dapat bekerja untuk beberapa jenis mesin dan station. Dengan menggunakan 6 derajat kebebasan (satu linear, 5 rotary), M-710iT mampu untuk menangani benda kerja diantara

<sup>7</sup> Journal – *Material Handling Management*, vol 55, George Weimer, 2000



beberapa operasi dan melayani kedua mesin tersebut dengan biaya yang rendah dibandingkan dengan *traditional linear gantries*. *Fanuc* general manager, *material handling*, Dick Johnson mengatakan dengan menggunakan *toploader robot* kita dapat memiliki robot dengan *work envelopes* yang luas tidak seperti robot standar dengan tipe *pedestal* yang dilekatkan pada lantai. Dengan menggunakan robot ini robot dapat mengangkat material dari pallet, memindahkan, dan mengurangi beberapa peralatan. Robot dapat digunakan untuk *deburring* dan *labelling*, seperti operasi utama yang biasa dilakukan di *plastic injection molding*.

Aplikasi yang lain dari *Fanuc* adalah melayani 6 sampai 8 mesin dengan menggunakan dua robot M-710iT, sistem ini menggunakan dua robot dengan satu rel. keuntungannya adalah dapat melakukan *overlapping workspaces* seperti terdapat *conveyor* di tengah-tengah rel, keuntungan lainnya adalah jika robot membutuhkan perawatan atau perbaikan, *toploader* dapat dipindahkan pada ujung-ujung rel dan dengan menggunakan *back-up mode* dapat melakukan operasi biasa seperti *loaded* dan *unloaded* sendiri-sendiri.

Robot jenis baru ini sangat sesuai untuk aplikasi *metal cutting* dengan *work envelopes* yang luas seperti *powertrain machining*, *tending of larger plastic injection molding machines* dan *die casting extraction*. Robot juga dapat digunakan untuk *long distance transfer* seperti *automotive glass* dan *sheet metal stamping*.

Robot generasi terbaru dengan teknologinya ini sangat potential untuk melakukan revolusi baru dalam *machine tool* dan industri plastik seperti yang dikatakan Dick Motley, *product manager Fanuc Robotics*. Robot tersebut dapat meningkatkan produktivitas dengan disertai *improve* sampai mencapai 90 % atau lebih. Hal ini terjadi hanya setahun yang lalu ketika *Fanuc* memperkenalkan produk terbarunya yakni *toploader robot* dengan versi yang lebih kecil, banyak dari *costumer* yang menanyakan untuk beban yang lebih besar ketika mereka tahu akan manfaat dari *toploader*.

Contoh lain yang menggambarkan meningkatnya minat pada penggunaan robot adalah dari Motoman, division, Yaskawa, West Carrollton, Ohio. Perusahaan tersebut baru-baru ini memperkenalkan *new non-contact, measuring/correction system* untuk mengetahui pergeseran dari *center point robot welding*.



Salah satu aspek yang menyebabkan meningkatnya penggunaan robot pada *manufacturing* adalah sering terjadi diskusi atau dialog teknologi yang membahas robot beserta peralatan lain yang menunjang untuk meningkatkan kemampuan robot mengerjakan pekerjaan khusus seperti ; *gripper*, *clamps*, *rail*, *end effectors* dan banyak lagi peralatan kecil lainnya yang sangat penting untuk meningkatkan kemampuan robot, *electrical connectors* contohnya.

*Electric connector* yang tahan uji sangat penting dewasa ini mengingat fakta bahwa robot dan sistem robot sangatlah mahal dan biaya perbaikan juga sangat mahal seperti yang dijelaskan Mark Oakes, *electrical product manager*, *Wago Corp*, Germantown, Wisconsin, *subsidiary of Wago*, Minden, Germany. Kegagalan dan kerusakan robot yang paling utama adalah kegagalan dan kerusakan dari konektor dan solusinya adalah *Wago’s patented “Cage Clamp”* yang berbasis *spring-pressure technology*, *connector* ini beroperasi secara *independent* dan mempunyai *solid* dan *vibration-proof connection*, tambahannya.

Persoalan lain pada sistem robot dan otomatisasi adalah banyaknya jenis robot dan *bus protocols*, *Wago* telah mengembangkan *bus-independent technology* dimana rangkaian listriknya dapat “*talks to itself*”. Fleksibilitas dari sistem ini sangat membantu dan menarik bagi pelaku manufaktur, tambahannya lagi.

Sistem EOA, Dallas, division of De-Sta-Co, Madison Heights, Michigan, contohnya membuat *Robohands*, *gripper* yang dapat meningkatkan kemampuan untuk mengambil, memindahkan, meletakkan benda kerja yang bentuknya sangat kompleks. Perusahaan ini juga memperkenalkan produk baru yang disebut “*body builder*” merupakan *end effector* yang cakap. Terdapat minat yang besar terhadap produk ini seperti yang dikatakan Aaron Baker, *product line manager*. Alat ini didesain khusus untuk *press room* dan *body shop work*.



Teknologi robot terbaru menaruh perhatian pada hubungan antara robot dengan *part* seperti hubungan gaya dan torsi yang dapat dikontrol. Teknologi ini akan membuat robot lebih aplikatif didalam industri *assembly*, yang menjadikan akan lebih luasnya penggunaan robot.

Robot dewasa ini digunakan hampir di semua sektor industri yang berhubungan dengan *repetitive task* atau pekerjaan yang sulit dilakukan dengan manual atau berbahaya seperti :

- *Welding, painting, surface finishing* pada industri otomotive dan penerbangan
- Perakitan elektronik dan produk-produk konsumen beserta *inspection*
- *Inspeksi part* yang menggunakan *robot assisted sensor* atau *Coordinate Measurement Machines (CMM)*
- Eksplorasi alam antariksa dan bawah air
- Limbah berbahaya pada laboratorium, fasilitas nuklir dan laboratorium kedokteran

### Produsen dan Pembeli

Terdapat sejumlah produsen robot di dunia, yang terbanyak terdapat di Jepang. Beberapa produsen robot yang terkenal adalah:

- Fanuc (Jepang)
- Kawasaki (Jepang)
- Kuka (Jerman)
- ABB (Swedia, Amerika Serikat)
- Adept (Amerika Serikat)
- Seiko (Jepang)
- Motoman (Jepang)
- Mitsubishi (Jepang)

Harga sebuah robot bervariasi tergantung pada aplikasi, ukuran robot dan kerumitan, serta biaya teknologi yang mendukungnya. Harga robot dapat mencapai antara



\$ 1000 sampai miliaran dollar , tetapi harga rata-rata dari sebuah robot berkisar antara \$ 20.000 - \$ 80.000, biaya dari keseluruhan *Robot cell* besarnya beberapa kali lebih mahal dari biaya robotnya sendiri.

Para produsen biasanya memberikan *specification sheet*, tetapi kita harus berhati-hati dalam meneliti spesifikasi tersebut, para produsen tidak merasa perlu menggunakan *procedure test* yang sama untuk membuat data spesifikasi tersebut.

## Teknologi Pendukung

Teknologi yang sering dijumpai dalam penggunaan robot adalah :

- *Vision Systems*
- *End-of-Arm Tooling* dan *special compliance manipulation devices*
- *Application Technology*
- *Optical devices* seperti laser
- Sensor seperti *acoustical* dan atau *proximity sensors*
- *Wrist sensor* yang mengukur gaya *wrist* dan torsi
- *Control software* dan *hardware*, seperti AC/DC motor, *encoders*, *tachometer*, amplifier
- *Part delivery systems* seperti *conveyor*, *part feeders*
- *Application software*, *interface software*
- *Realtime operating systems*, bahasa program
- *Communication Protocol/networks*
- I/O devices seperti PLC (*Programmable Logic Controller*), *discrete* ataupun *analog*

## Keuntungan

- Fleksibilitas tinggi, dapat diprogram ulang, *kinematic dexterity*, dapat diatur besarnya respon untuk input dari manusia, meningkatkan kualitas produk.
- Mengoptimalkan *Capital Intensive Equipment* pada banyak shift kerja.
- Mengurangi kecelakaan kerja.



• Mengurangi polusi berbahaya bagi pekerja.

- Mengurangi waktu penghentian operasi.

### Kerugian

- Mengurangi Jumlah pekerja.
- Adanya penambahan operator.
- Adanya biaya yang besar untuk pengurangan tenaga kerja serta penggunaan teknologi baru.
- Teknologi yang tinggi tidak selalu dapat menutupi beberapa kekurangannya.
- Adanya biaya lain untuk membeli teknologi pendukung yang sangat dibutuhkan untuk memfungsikan cell, biasanya 3-10 kali lebih besar dari harga robot itu sendiri.

### Keterbatasan

- *Assembly dexterity* tidak sama dengan manusia, sehingga di beberapa bagian dibutuhkan koordinasi penglihatan dan lengan.
- Perbandingan antara berat beban dengan berat robot masih buruk, umumnya kurang dari 5 %.
- Susunan struktur robot sering membatasi *joint limits* dan volume kerja.
- Volume kerja terbatas sejauh jika ukuran utama dipenuhi atau ketika *tooling/sensors* ditambahkan pada robot.
- *Robot repeatability* atau *accuracy* dapat membatasi jangkauan aplikasi.
- Arsitektur yang kaku dari sebagian besar sistem kontrol robot modern membuat kesulitan untuk menggabungkannya dalam sebuah *automated cells* dimana terdapat bermacam-macam alat yang harus diintegrasikan.

### Bahasa Pemrograman Robot

Terdapat beberapa bahasa program dan *interfaces* untuk robot yang merupakan modifikasi dari bahasa program yang sudah ada seperti Basic, Pascal, atau C. Bahasa-



bahasa pemrograman ini menggunakan sebuah *device interface* untuk mengeluarkan perintah-perintah kontrol kepada *servocard/amplifiers* yang menggerakkan mekanisme fisik motor. Sebagai tambahan, *programming interface* memungkinkan *user* untuk membaca dan mengirimkan *device I/O*.

Beberapa contoh dari bahasa pemrograman diantaranya :

- DART/SPEL

Merupakan bahasa pemrograman yang dasarnya seperti yang dikembangkan oleh SEIKO yang menggunakan seperti dibawah ini untuk mengontrol gerak robot dan I/O.

```
100 MOVE T5 T7
110 DELAY 20: SPEED 200
120 MOVE T10 T4
130 OUTPUT + OG3 500
```

- KAREL

Bahasa pemrograman yang dikembangkan oleh Fanuc dan merupakan turunan dari bahasa Pascal.

- VAL II

Bahasa pemrograman yang dikembangkan oleh Unimation.

- CODE (juga dikenal sebagai Robline) C dan API libraries

Bahasa pemrograman yang dikembangkan oleh BYU dan CIMETRIX dan membutuhkan *user* untuk menulis C program yang memanggil fungsi-fungsi *Library*, seperti program dibawah ini:

```
#include
#include
#include

#define OPEN_HAND 45.0
#define CLOSE_HAND 50.0

void main( void )
{
  /* Local variables */
  server peg;
```



```

mechanism s100, gripper;
char *server_name;
node_id s100_id, gripper_id;
node_id peg_1_loc, grip_tcf, pallet2, peg_1, pallet;
double offset = 150.0;

if( GetDefaultServer(&server_name)==ERROR )
{
printf("No default server found\n");
exit(-1);
}

/* open server */
peg = open_server( server_name, SYSTEM_V, 0 );
set_simrate(peg,0.25);

/* get all node ID to be used */
get_named_node_id(peg, "s100", &s100_id);
get_named_node_id(peg, "gripper", &gripper_id);
get_named_node_id(peg, "peg_1_loc", &peg_1_loc);
get_named_node_id(peg, "grip_tcf2", &grip_tcf);
get_named_node_id(peg, "pallet2", &pallet2);
get_named_node_id(peg, "peg_1", &peg_1);
get_named_node_id(peg, "pallet", &pallet);

/* open mechanism */
s100 = open_mechanism( peg, s100_id, CONTROL);
set_motion_track(s100, ON);
gripper = open_mechanism( peg, gripper_id, CONTROL);

set_interp_type( s100, JOINT_INTERP );
set_joint_speed( s100, 0.25 );
set_joint_speed( gripper, 0.25 );
move_single_axis( gripper, 0, OPEN_HAND );

while(1)
{
move_near_node( s100, peg_1_loc, grip_tcf, offset );
move_to_node( s100, peg_1_loc, grip_tcf );
move_single_axis( gripper, 0, CLOSE_HAND );
attach_node( peg, peg_1, grip_tcf );
move_away( s100, grip_tcf, offset );

move_rel_node( s100, pallet2, grip_tcf, "xyz", 0., 0. ,0. ,
125., 87.5 ,175. );
move_rel_node( s100, pallet2, grip_tcf, "xyz", 0., 0. ,0. ,
125., 87.5 ,75.0 );
move_single_axis( gripper, 0, OPEN_HAND );
change_color( peg, peg_1, 1., 0., 0. );
attach_node( peg, peg_1, pallet2 );
move_away( s100, grip_tcf, offset );

.
.

```



Masalah terbesar yang berhubungan dengan bahasa pemrograman adalah sebuah program tidak dapat digunakan untuk sebuah mekanisme yang berbeda yang dibuat oleh *manufacturer* yang lain. Masalah ini terjadi ketika kita ingin mengganti mekanisme di dalam sebuah *cell* dengan sebuah mekanisme lain yang berbeda yang mengharuskan kita membuat bahasa program yang baru.

#### I.4. Standarisasi Robot dan Industri Otomatis

Terdapat beberapa standar yang tersedia untuk sistem robot. Standar utama dapat kita dapatkan dari *Robotics Industry Association (RIA)*<sup>8</sup>. Standarisasi ini termasuk definisi dari *repeatability* dan *accuracy*, pembatasan dan peraturan keamanan penggunaan *teach pendant*, informasi *interface* yang menggambarkan kemampuan gerak robot, serta *wiring codes* yang digunakan untuk controller gerak robot.

##### I.4.1. Robotics Industries Association R15 Standard Committee

- ANSI/RIA R15.01-1-1990 → ditetapkan tanggal 14 Mei 1990, 16 halaman.
- ANSI/RIA R15.02/1-1990 → ditetapkan tanggal 28 Desember 1990, 26 halaman.
- RIA R15.03-1-1994: → ditetapkan tanggal 12 Mei 1994, penundaan penetapan ANSI, 15 halaman.
- ANSI/RIA R15.05-1-1990 → ditetapkan tanggal 13 September 1989, 36 halaman.
- ANSI/RIA R15.05-2-1992 → ditetapkan tanggal 14 September 1992, 45 halaman.
- ANSI/RIA R15.05-3-1992 → ditetapkan tanggal 16 October 1992, 6 halaman.
- ANSI/RIA R15.06-1992 → ditetapkan tanggal 19 August 1992, 22 halaman.

<sup>8</sup> [www2.et.byu.edu/~ered/robotics/STANDARD/STANDARD.html](http://www2.et.byu.edu/~ered/robotics/STANDARD/STANDARD.html)



ANSI/RIA R15.07/TR1-1993 → ditetapkan tanggal 20 September 1993,  
20 halaman.

### **ANSI/RIA R5.01-1-1990**

*(Standar Nasional Amerika untuk Industri Robot dan Sistem Robot – Metode identifikasi umum untuk Sinyal dan Power Carrying Conductors)*

Standar ini berhubungan dengan penyediaan metode-metode umum untuk mengidentifikasi Sinyal dan *Power Carrying Conductors* yang digunakan dalam proses manufaktur serta aplikasi dari industri robot dan sistem robot.

### **ANSI/RIA R15.02/1-1990**

*(Standar Nasional Amerika untuk Industri Robot dan sistem Robot – Hand Held Robot Control Pendant – Human Engineering Design Criteria)*

Standar ini dibuat untuk menyediakan pedoman bagi para *Engineer* dalam mendesain operator *control pendant* untuk industri robot dan sistem robot. Bahasan utama dari standar ini adaah *promote speed, accuracy, simplicity, efficient, reliability* dan keamanan operasional robot, *programming, training dan maintenance*.

### **RIA R15.03-1-1994**

*(Standar Nasional Amerika untuk Industri Robot dan sistem Robot – Circular Flange Mechanical Interface)*

Tujuan dari standar ini adalah untuk menstandarkan ukuran dari *circular flange mechanical interface* yang akan memungkinkan *direct coupling end effector* ke robot *mounting plate*.



**ANSI/RIA R15.05-1-1990**

INDONESIA  
GADJAH MADA

*(Standar Nasional Amerika untuk Industri Robot dan sistem Robot – Point-to-Point dan Static Performance Characteristics – Evaluation)*

Maksud utama dari standar ini adalah untuk membuat pengertian antara *Manufacturer* dengan *users* dari industri robot. Standar ini membuat pengertian dari kriteria *performance* yang paling penting dan sebuah metode untuk mengevaluasi kriteria tersebut. Yang termasuk dalam metode tes ini adalah *performance classes*, *standard test paths* dan *standard test loads*. Kegunaannya adalah untuk menyediakan informasi teknik yang penting guna memudahkan *user* untuk memilih robot yang sesuai dengan aplikasi mereka.

**ANSI/RIA R15.05-2-1992**

*(Standar Nasional Amerika untuk Industri Robot dan sistem Robot – Path Related dan Dynamic Performance Characteristics – Evaluation)*

Tujuan dari standar ini adalah untuk membuat pengertian antara para *manufacturer* dengan *user* dari industri robot. Standar ini menstandarkan *fundamental dynamic path-related performance characteristic* dan menyediakan metode untuk menghitung *dynamic performance*. Termasuk di dalamnya standar tes *performance classes*, *standar tes path*, *standar tes loads*. Kegunaannya adalah untuk menyediakan informasi teknik yang berguna bagi para *user* sehingga dapat robot yang sesuai dengan aplikasi yang mereka inginkan.

**ANSI/RIA R15.05-3-1992**

*(Standar Nasional Amerika untuk Industri Robot dan sistem Robot – Pedoman untuk Reliability Acceptance Testing)*



Standar ini menyediakan tes minimum yang dibutuhkan yang akan menilai sebuah produk baru dari sebuah industri robot yang akan digunakan tanpa tes tambahan. Kegunaan dari standar ini adalah menyediakan *assurance*, *trough testing*, yang merupakan kegagalan awal dalam industri robot yang telah terdeteksi dan diperbaiki oleh *manufacturer* pada saat pengiriman kepada *user*. Tes ini dapat dilakukan oleh *user* jika diinginkan.

### **ANSI/RIA R15.06-1992**

*(Standar Nasional Amerika untuk Industri Robot dan sistem Robot – Safety Requirments)(revisi dari ANSI/RIA R15.06-1986)*

Standar ini berfungsi menyediakan pedoman bagi *manufacturer* industri robot, *remanufacture* dan *rebuild*, *robot system installation*, dan metode-metode pengamanan untuk menambah tingkat keamanan dari personel yang tergabung dalam penggunaan industri robot dan sistem robot.

### **ANSI/RIA R15.07/TR1-1993**

*(Laporan Teknis dalam Industri Robot – Simulation/Offline Programming – Part 1 : Terms, Notations dan Kebutuhan data untuk Robot modelling)*

Laporan teknis ini menjelaskan istilah-istilah dan definisi yang digunakan untuk mengklasifikasi karakter-karakter dari robot industri. Laporan teknis juga membuat metodologi untuk memberikan geometrik robot dan informasi kinematik. Metode ini akan memberikan informasi bagi *robot vendors*, *simulation vendors* dan *users* sebuah pengertian yang konsisten dari perubahan informasi.

### **I.4.2. Association A15 Standard Committe**

- ANSI/AVA A15.05/1-1989 → *ditetapkan tanggal 1Desember 1988, 24 halaman.*



• **BSR/A15.08/1 - 199X AIA A15.08/2-1993** → *ditetapkan AIA tanggal 10 September 1993, pemudaan penetapan ANSI, 19 halaman.*

- **AIA A15.08/3-1993** → *ditetapkan AIA tanggal 10 September 1993, pemudaan penetapan ANSI, 12 halaman.*
- **BSR/AIA A15.08/4-199X** → *target waktu penetapan April 1997, 12 halaman.*
- **BSR/AIA A15.08/7-199X** → *target waktu penetapan Januari 1997, 19 halaman.*

### **ANSI/AVA A15.05/1-1989**

*(Standar Nasional Amerika untuk Sistem Penglihatan Otomatis – Performance test – Penghitungan Relative Position dari Target fature di dalam ruang 2 Dimensi).*

Standar ini bermaksud untuk menjelaskan sebuah standar tes pengukuran yang akan dapat digunakan sebagai referensi dalam membuat spesifikasi dan mengevaluasi sistem penglihatan mesin. Tes ini didesain untuk membantu para manufaktur dan *user* dalam memahami dan menginformasikan keinginan dan kemampuan nyata dari sistem penglihatan.

### **BSR/A15.08/1 –199X**

*(Standar Camera Data Sheet)*

Dokumen ini meliputi *Camera optical interface, camera transfer functions, camera image defects, derived spesification, menghitung camera transfer function, dan curve fitting/plotting* serta metode-metode numerik.

### **AIA A15.08/2-1993**

*(Proposal Standar Nasional Amerika untuk Automated Vision Component – Camera – Standard AIA Connector Spesifications) (revisi dari ANSI/AIA A15.08/2-1992)*



Standar ini merinci *connector* yang sesuai untuk *machine vision*, *scientific*, *medical* dan kegunaan umum *image data acquisition* pada industri, laboratorium atau lingkungan kantor. Fungsi utama *connector* ini adalah untuk mentransfer semua energi dan sinyal analog, sinyal digital antara kamera dan sebuah *image processor*.

### **AIA A15.083/3-1993**

*(Proposal Standar Nasional Amerika untuk Automated Vision Component – Camera – AIA Monochrome Digital Interface Specification) (revisi dari ANSI/AIA A15.08/3-1992)*

Tujuan utama dari standar ini adalah untuk merinci komunikasi digital antara sebuah video kamera dengan sebuah *image processor*. Video kamera ini terdiri dari *matrix array cameras*, *variable scan camera* dan *linear array cameras*. Fungsi utama dari *interface* ini adalah untuk mentransfer sebuah *image digital* dari kamera ke sistem *image processing*.

### **BSR/AIA A15.08/4-199X**

*(Proposal Standar Nasional Amerika untuk Automated Vision Component – Cameras – RGB Digital Interface Specification) (revisi Idari Committee Review Draft)*

Standar ini merinci komunikasi digital antara sebuah *RGB color video* dengan sebuah *image processor*. Video camera terdiri dari *matrix array cameras*, *variable scan cameras* dan *linear array cameras*. Fungsi utama dari *interface* ini adalah untuk mentransfer sebuah *image digital* dari kamera kepada sistem *image processing*.

### **BSR/AIA A15.08/7-199X**

*(Proposal Standar Nasional Amerika untuk Automated Vision Components – Cameras – AIA Serial Communication Protocol Specification)(revisi 2 dari Committee Review Draft)*



Standar ini berhubungan dengan *protocol* dan kode perintah yang digunakan dalam *serial communication* antara sebuah video kamera dan sebuah *image processor*. Tujuan utama *protocol* ini adalah untuk mentransfer perintah kontrol dari *image processor* kepada video kamera dan untuk pemahaman perintah ini oleh kamera. Yang kedua, standar ini menjelaskan *low-speed communication* dari data kamera kepada *host processor*.

## I.5. Aplikasi Robot Finishing

Aplikasi *Robot finishing* terutama yang menggunakan *abrasive* dan *belt sintesis*, *flap* dan *buff wheels*. Penekanan utama akan ditekankan pada proses *polishing* untuk *finishing* permukaan yang akan dilakukan pengecatan atau plat. Penjelasan ini merupakan gambaran komponen-komponen apa yang membuat suatu *system Robot finishing*, bagaimana tiap bagian saling bekerjasama, faktor apa yang mempengaruhi biaya, dan membuat panduan bagi para pengguna yang akan melakukan proses *polishing*, *buffing* atau *deburring* serta membantu memberikan pemahaman tentang peralatan yang akan diperlukan untuk sebuah proses *finishing* agar tercapai hasil yang terbaik.

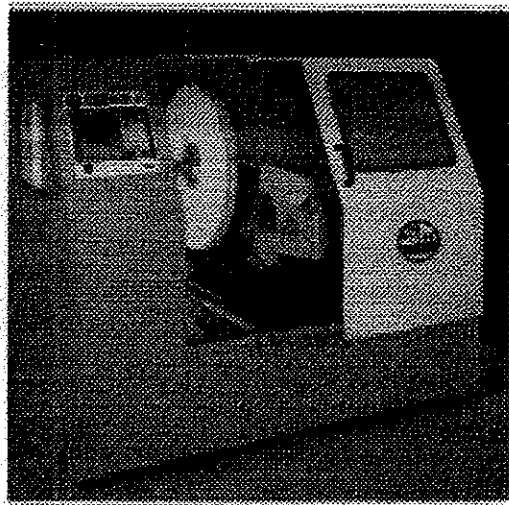
Sejak adanya teknik *polishing* modern pada awal abad 20, hampir semua proses *polishing* diselesaikan dengan menggunakan tangan. Dengan perkembangan teknologi telah membawa pengembangan pada media, sistem semi otomatis, dan sistem otomatis. Dengan perkembangan ini telah membawa kepada para jasa *finishing* untuk mengembangkan sistem otomatis guna menangani berbagai bentuk benda kerja yang lebih kompleks.

Karena kesederhanaan dari proses *buffing* (*cloth* dan *compound*), *Buffing* merupakan proses *finishing* pertama yang dilakukan otomatisasi. Pada tahun 1915, 1916, dan 1917 proses otomatisasi *polishing* mulai berusaha dilakukan, keberhasilannya sangat terbatas pada bentuk-bentuk sederhana dengan volume benda kerja yang besar. Untuk bentuk-bentuk yang lebih kompleks memerlukan banyak media "*processing head*", setiap *head* mengerjakan bagian yang spesifik dengan bentuk tertentu. Sistem otomatisasi ini



dilakukan dengan target volume produksi yang tinggi dengan bentuk-bentuk yang lebih kompleks.

Sistem otomatisasi CNC untuk proses *polishing* membuka peluang bagi proses dengan menggunakan *belt* untuk bentuk benda kerja yang lebih kompleks, sebagian besar teknologi CNC hanya terbatas pada satu *belt* saja. CNC juga menyediakan 5 derajat kebebasan, yang terutama diperuntukkan untuk bentuk yang rumit. Pada banyak kasus untuk bentuk yang kompleks harus dilakukan pengulangan proses untuk menyelesaikan proses *finishing*. CNC *belt polishing* sangat cocok untuk aplikasi *gate grinding* dan *flap wheel* dimana dua sampai empat bagian harus di set dan dijalankan secara bersamaan. Keuntungan utama dari CNC jika dibandingkan dengan sistem otomatisasi tradisional adalah pada saat pergantian benda kerja. Kontrol komputer CNC memberikan kebebasan kepada operator untuk memanggil program dari memori, mengubah 2 sampai 4 *fixture* dan menjalankan produksi dalam hitungan menit<sup>9</sup>.



**Gambar I.11. CNC Polishing Center**

Otomatisasi Tradisional dan CNC merupakan sistem yang sangat cocok untuk proses *buffing*. *Polishing* menggunakan media *abrasive* mengingatkan kita pada

<sup>9</sup> Journal – *Robotic Finishing Applications*, Paul F. Mickstyn CmfgE (Manager of Robotic Systems Acme Manufacturing Company Madison Heights, Michigan).



operasional menggunakan tangan, untuk bentuk benda kerja yang kompleks orang menggunakan “manipulating part” selain *wheel* dan *belt* untuk menyelesaikan benda kerja tersebut.

Perkembangan teknologi robot telah membuka peluang kepada aplikasi otomatisasi *finishing* untuk bentuk benda kerja yang sederhana dan yang kompleks. Industri robot dapat meniru gerakan dari manusia selama melakukan proses finishing manual. Robot memiliki kekurangan dari manusia dari segi perasaan pandangan dan sentuhan, namun hal ini dapat ditutupi dengan kemampuan mereka untuk mengulang gerakan dengan tingkat presisi yang tinggi. Kemampuan pengulangan mereka membuat robot sangat ideal untuk aplikasi proses perpindahan seperti *mig welding*, *water jetcutting*, *sealant dispensing*, *paint spraying* dan proses *finishing* itu sendiri.

Robot, ketika digabungkan dengan berbagai peralatan seperti; *finishing heads*, dan *system software* membuat suatu sistem otomatisasi yang sangat canggih. Robot yang mempunyai 6 derajat kebebasan dapat melakukan gerakan yang kompleks dan dengan “head” yang tepat dan desain *tool* yang baik dapat melakukan proses polishing untuk 6 sisi dari benda kerja. Ketika robot tidak dapat menyelesaikan benda kerja dengan produksi rata-rata sama dengan “*traditional Multi Head Finishing line*” atau “*Multi Spindle CNC cells*”, robot dapat melakukan banyak jenis operasi *finishing* pada suatu benda kerja.

Ketika satu faktor kemampuan *robot cell* tidak dapat berjalan dan *quick part* berubah, *robot cell* masih dapat berjalan dengan kemampuan sama seperti manual polishing. Aplikasi *Buffing* untuk saat ini terbaik jika digunakan metode tradisional dan CNC. Robot hanya dapat dijaga sama produksi rata-ratanya untuk gerakan yang sama seperti operator, biasanya dapat lebih cepat jika dibandingkan dengan sistem otomatisasi yang lain. Untuk kasus yang jarang ketika menggabungkan *belt finishing* dengan *buffing* pada bagian yang sama, robot dapat menjanjikan dengan mengurangi proses dan operasi.

### 1.5.1. Pengertian Polishing

*Polishing* merupakan salah satu metode *material finishing* yang dilakukan untuk menghilangkan goresan, kekasaran dan *burrs* pada suatu material sehingga permukaan



yang kasar menjadi halus dengan menggunakan bahan *abrasive* pada sebuah *polishing wheel* yang berputar sekitar  $7500 \text{ ft/min}^{10}$ . *Polishing wheel* terbuat dari bahan kanvas, kulit, kain, dan bahkan kertas, yang membuat *polishing wheel* menjadi fleksibel.

Bahan *abrasive* yang digunakan melekat pada bagian luar dari *polishing wheel*. Setelah selesai digunakan, *polishing wheel* dapat digunakan kembali dengan melekatkan kembali bahan *abrasive*. Butiran *abrasive* dengan ukuran 20 – 80 digunakan untuk permukaan kasar, 90 – 120 untuk *finish polishing*, dan diatas 120 untuk *fine finishing*.

Proses *polishing* tidak hanya menghilangkan sebagian permukaan kasar material tetapi juga memindahkannya ke bagian permukaan lain yang lebih rendah sehingga permukaan material menjadi mengkilap. Proses *polishing* tidak bertujuan untuk merubah ukuran dari material yang dikerjakan, sehingga hampir tidak terjadi perubahan dalam hal bentuk dan ukuran material.

Bubuk *abrasive* yang baik seperti *jewelers rouge*, *Linde-A*, *rottenstone*, atau material lain dilekatkan pada *wheel* sedangkan material yang dipolish dipegang untuk melawan gaya putar *wheel*, panas yang dihasilkan dari proses membantu proses *polishing* itu sendiri. Proses ini sendiri biasanya merupakan proses yang kering dan tidak menggunakan cairan pendingin. *Polishing compound* yang digunakan dewasa ini biasanya berbentuk *stick* yang bila digunakan dengan menggosokkan pada bahan *abrasive*.

Kita dapat melakukan proses *polishing* ini baik untuk permukaan yang rata maupun yang tidak rata, untuk bentuk yang kompleks diperlukan ukuran *polishing wheel* yang kecil dengan pemegang yang kecil pula.

## 1.5.2. Aplikasi Robot Polishing di Industri

Hampir semua operasi manufaktur melibatkan *finishing* menggunakan tangan, mulai dari *finishing* tepi tajam dari permukaan mesin sampai *finishing* paling kompleks yakni *finishing jet engine fan blades* atau pinggul buatan serta kaki buatan.

Berikut ini adalah contoh pemakaian otomatisasi *hand finishing* menggunakan robot pada beberapa industri :

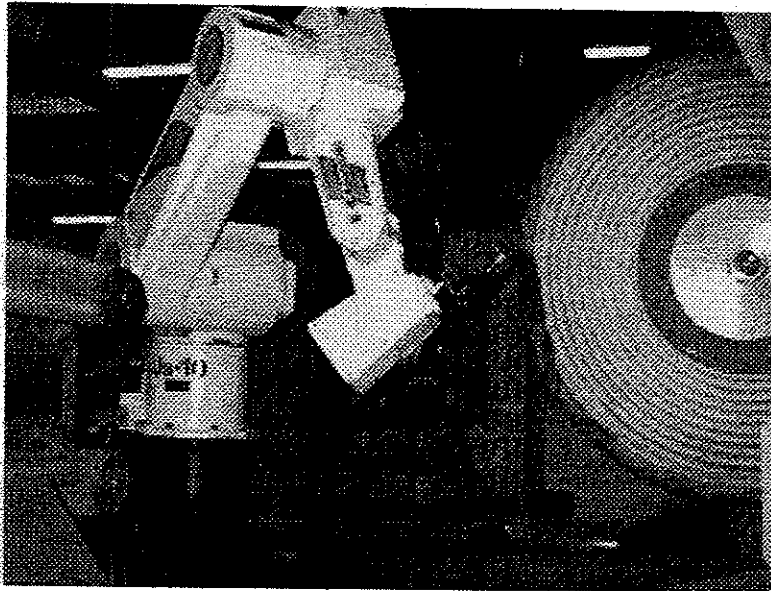
<sup>10</sup> *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems*, Mikell P. Groover



- *Aerospace – Airframe spars, stringers, skins – Engine fan vain, blade root, disks, dan combustion housings.*
- *Cookware Pots, pans, knives, forks, utensils.*
- *Houseware Die Cast lamp bases, vacuum cleaner trim. Die cast lamp bases, vacuum cleaner trim.*
- *Plumbing Sink, faucets, bases, handles.*
- *Marine Deck hardware, propellers, drive housings.*
- *Automotive Trim components, engine, transmission, plastic trim, bumpers, motorcycle suspension, engine details, trim components, gas tanks and fenders.*
- *Lock Hardware Lock sets, knobs, levers, hinges, trim components.*
- *Medical Implant(knees, hip), instruments.*



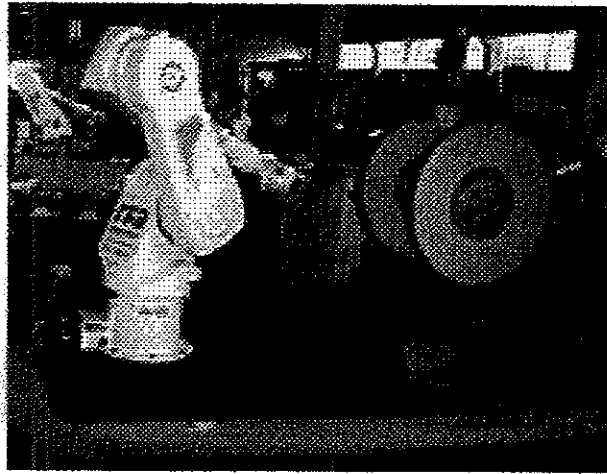
**Gambar I.12. Robotic Canopy polishing**



**Gambar I.13. JS 10 Robot Polishing**



**Gambar I.14. Polishing Robot for stainless steel workpiece**



**Gambar I.15. Robotcell for polishing brass lightshades**

Penggunaan robot sebagai pengganti sistem manual yang menggunakan tangan manusia telah cukup berkembang dewasa ini, dengan mengutamakan prinsip bahwa keberhasilan proses polishing untuk mencapai hasil yang memuaskan seperti dengan metode manual dapat dicapai berkat kemampuan *repeatability* dan *accuracy* dari sistem robot yang didukung oleh sistem penginderaan dari robot tersebut. Terdapat tiga metode yang digunakan dalam otomatisasi robot untuk proses polishing di industri, yakni :

### 1. *Abrasive-belt Polishing*

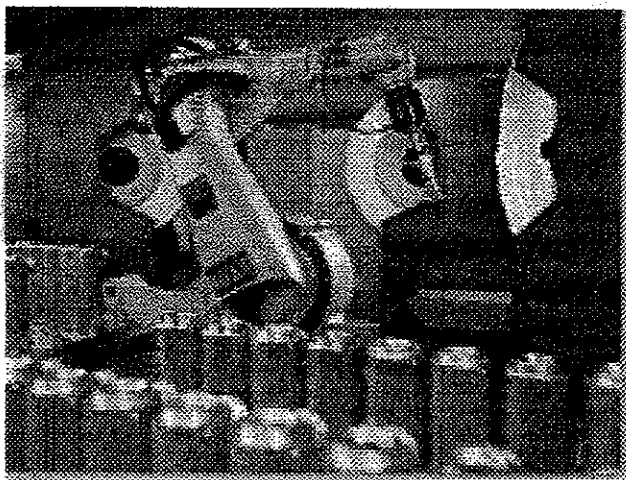
Proses polishing dengan menggunakan *belt* yang dilapisi bahan *abrasive* yang berputar, terdiri dari motor listrik sebagai penggerak dua *pulley* yang memutar *belt*. Tegangan *belt* serta jalannya *belt* dikontrol dengan menggunakan peralatan terpisah yang disebut dengan *back stand*. Ukuran *belt* yang diproduksi di industri bermacam-macam sesuai dengan kebutuhan konsumen. Metode ini sangat cocok untuk proses polishing dengan bentuk material yang tidak kompleks serta dengan berat yang relatif ringan, karena material dipegang oleh lengan robot.



**Gambar I.16. Abrasive belt polishing robot**

2. *Buffing-wheel Polishing* dengan robot sebagai pemegang material

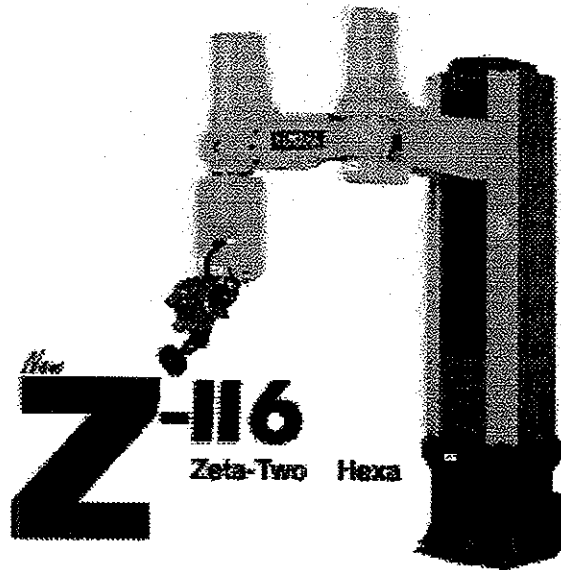
Metode ini menggunakan lengan robot sebagai pemegang material yang akan *dipolish*, sedangkan *Buffing wheel* digerakkan oleh motor listrik. Cara ini hampir sama dengan metode yang menggunakan *abrasive belt*, dengan *buffing wheel* sebagai media *abrasive*.



**Gambar I.17. Carat Robotic for Buffing Wheel Polishing**

### 3. *Buffing-wheel Polishing* dengan robot sebagai pemegang *wheel*

Merupakan proses *polishing* dengan tingkat ketelitian yang paling tinggi, sesuai untuk pengerjaan material yang kompleks. Material yang dikerjakan tidak perlu diangkat sehingga dapat digunakan untuk material dengan ukuran besar. Untuk bentuk-bentuk yang lebih kompleks dapat menggunakan *L-tool* pada *end-effector*nya, sehingga dapat dicapai tempat-tempat yang lebih sulit.



Gambar I.18. Zeta Two Robot for Polishing

Ketika kita ingin menerapkan sistem *finishing* menggunakan robot, kita harus memperhatikan beberapa *Justification factors*, yang antara lain :

1. *Labor Cost* – Berapa biaya operator *finishing*, berapa banyak operator yang mengerjakan proses *finishing* tiap *shift*? – Berapa jam rata-rata operator bekerja dan keuntungannya? – beberapa perusahaan hanya melaksanakan satu shift operasi *finishing*, yang menyulitkan dalam perhitungan pada berbagai tipe otomatisasi.
2. *Workmen's Compensation Cost* – Apakah benda kerja berukuran besar dan berat, apakah ada kemungkinan cedera? – Apakah benda kerja berukuran kecil dan sulit untuk dipegang, membutuhkan gerakan tangan berulang untuk memproses,



menambah resiko “Carpal Tunnel Syndrome”? – Apakah peralatan mengeluarkan suara berisik, dan atau kotor, mempengaruhi kesehatan? faktor resiko? – Apakah pekerjaan itu melelahkan dan membosankan sehingga dapat mempengaruhi efektifitas dan keselamatan kerja? – *Workmen’s Compensation Claims* sedang populer saat ini. Proses manual untuk benda kerja kecil dan besar menjadi faktor yang sangat berpengaruh pada keuntungan di masa depan. *Robot finishing cell* dapat dapat meminimalisasi hal ini dengan menjauhkan operator dari resiko kesehatan dikarenakan kelelahan, kotor, dan kebisingan dari *manual finishing*.

3. *Governmental Regulations* – Apakah manual *finishing* telah memenuhi OSHA *standard*? – Apakah tingkat polusi udara memungkinkan area terbuka bagi proses *finishing*? – limbah dari *polishing* (material yang berbahaya).
4. *Just-In-Time Manufacturing* – Apa tujuan perusahaan terhadap *inventory product*? – Apakah produk yang dihasilkan akan berkurang atau berkembang di masa mendatang? – Apakah kompetisi yang ada mengharuskan kita untuk mengurangi harga produk dan mengembangkan pengiriman agar dapat tetap kompetitif?
5. *Quality Control* – Akankah penawaran konsumen menginginkan perbaikan kualitas yang hanya dapat dipenuhi jika menggunakan sistem otomatisasi?
6. *Available Work Force* – Bagaimanakah kemampuan operator *finishing* di tempat kita? – jika kita akan mengembangkan usaha, dapatkah kita menyewa dan melatih *work force* dalam waktu yang cukup? – Apakah departemen *finishing* mengontrol kualitas dan produktivitas? – Apakah aturan kerja mempengaruhi kemampuan kita untuk merespon kondisi pasar? – Apakah penghapusan *finishing* tangan memperbaiki tingkat kompetitif produk di pasar? – Di banyak *plant*, departemen *finishing* mengontrol kualitas dan produktivitas dari produk jadi. Untuk meningkatkan kapasitas produksi, kita harus menyewa dan melatih operator *finishing* tambahan. Lebih kurang tiga dari sepuluh operator harus sudah berpengalaman minimum satu tahun.
7. *Perishable Cost* – Biaya penggunaan media (*belt*) sebagai implementasi dari *robot cell* telah berkurang dari 50 sampai 30 % daripada operasi manual.



8. Peralatan pengaman seperti sarung tangan, *apron*, *ear plugs*, pelindung kaki, pelindung cahaya dan kacamata pengaman semua peralatan tersebut hampir dipunyai oleh semua perusahaan *finishing* yang sesuai dengan OSHA dan *local safety codes*. Manual operator *finishing* dapat menggunakan 2 pasang sarung tangan sekali *shift* dan sepasang kacamata pengaman seminggu sekali. Hal ini memerlukan biaya \$2,000.00 atau lebih dari biaya tidak langsung setiap unit *finishing* dalam setahun. Robot tentu tidak memerlukan peralatan keamanan tersebut. Keuntungan *Finishing Robot* memiliki kemampuan yang tinggi untuk mengatasi perubahan, pada proses *finishing processor manual* dapat dengan cepat dan efektif menyelesaikan benda kerja dengan berbagai bentuk, jenis, dan seting yang cepat bahkan tidak ada pergantian.

Kebanyakan dari sistem otomasi tetap sangat cocok untuk operasi yang besar dan langkah yang banyak, sehari-hari bahkan berminggu-minggu dengan gerakan yang sama untuk jenis benda kerja yang sama. Produksi hanya akan berhenti jika ada penggantian media, set up yang menyulitkan dan membutuhkan waktu yang tidak sedikit. Mesin CNC menangani benda kerja dengan proses menengah sampai banyak langkah operasi dengan baik. Penggantian benda kerja biasanya cepat, hanya membutuhkan penggantian *fixture* dan *loading program* baru dari memori. Bagaimanapun juga CNC *cell* biasanya terbatas hanya untuk *single operation* dan cocok untuk operasi *belt grinding* yang sederhana atau *forgiving flap wheel* atau *buffing*.

Robot seperti manusia mengambil dan memindahkan benda kerja pada suatu media untuk menyelesaikan proses *finishing* yang diinginkan. *Robot cell* dapat menangani sampai delapan operasi individu seperti *abrasive* atau *belt sintetis*, *flap wheel*, *wire brushes*, *wheel sintetis* dan *buff* dengan *compound*. Sebagian besar *cell* dapat di set untuk menjalankan kombinasi dari berbagai macam operasi sesuai dengan urutan dan proses parameter dihitung oleh program.

Teknik *part queuing* dan *fixturing* pada proses robot dapat disetting untuk pergantian benda kerja secara cepat ketika konsep *quick cell tooling* telah dikembangkan. Untuk menyelesaikan sebuah perpindahan benda kerja, operator menjalankan aliran



benda kerja yang terdapat pada *queue*, memilih dan mengeluarkan nomor benda kerja baru dari *memori storage*, memindahkan bagian yang berada pada *queuing trays* dan mengganti EOAT robot dengan *fixture* yang baru yang akan dijalankan. Pada beberapa kasus *set up* media atau *contact wheel* harus diganti untuk benda kerja yang baru. Pergantian ini biasanya dapat ditangani dalam 10 menit atau kurang. Ketika *cell hardware* dan *part program* akan dijalankan, operator dengan mudah menmasangkan benda kerja yang baru pada *queuing trays* dan menghidupkan *automatic cycle*. Robot kemudian akan memindahkan benda kerja pertama dari *queue* dan mengerjakannya sampai dengan delapan operasi sebelumnya.

Program robot melakukan *set up* untuk kecepatan proses, daya, dan SFPM dari aplikasi. Program juga menjaga jalannya media *wear factors* seperti umur *belt* dengan menambah daya proses atau SFPM pada penghitungan awal benda kerja atau *worn wheel* dengan memilih program dan SFPM untuk *wheel* baru dengan diameter kecil berdasarkan pada *Horsepower* yang dijalankan proses. Ketika menyelesaikan proses robot mengembalikan benda kerja pada posisinya di *queue*, dan kembali mengambil benda kerja baru. Robot akan melanjutkan menjalankan semua benda kerja yang ada di *queue*, berhenti hanya jika terjadi kesalahan, seperti kerusakan, *worn belt* atau *wheel*, menjatuhkan benda kerja dari EOAT, *air pressure loss*, atau ketika kesalahan sistem terjadi.

Sistem robot untuk proses *polishing* tidak sesuai hanya untuk *single piece runs*, meskipun mereka dapat dengan baik menangani *smaller lot runs* dari 10 sampai 50 benda kerja. Ketika robot *finishing cells* didesain dan diimplementasikan dengan baik, seorang operator dapat menangani sampai empat *cells* secara bersamaan. Ketika didesain sebuah *queue* yang besar digunakan konveyor atau metode lain seperti AGV's, tidak menjalankan produksi ketika istirahat, makan siang atau saat pergantian shift adalah normal.

Tidak dijalankannya produksi dapat diperhitungkan sebagai perbaikan produktifitas untuk tiap *shift*. Implementasi *process control software* untuk memonitor dan menghitung parameter proses telah bermanfaat bagi umur media sampai delapan jam dari ketidak aktifan operasi. Hal ini telah membuat perusahaan untuk menjalankan tiga



*shift* tidak beroperasi. Hal ini juga telah menambah manfaat dari otomatisasi, dengan tidak hanya mengurangi biaya media, tapi juga menyediakan waktu produksi sampai 23 jam dengan hanya 16 jam beroperasi.

### Part selection

Ketika kita akan mengevaluasi benda kerja yang akan diproses, hal terbaik jika kita mensetup kategori seperti; bentuk, ukuran, berat, kebutuhan proses, material dan volume. Benda kerja dengan karakteristik yang sama atau serupa di kelompokkan dan dipisahkan. Konfigurasi dari banyak robot tidak dapat melakukan proses untuk semua bentuk dan ukuran yang sangat berbeda. Beberapa jenis benda kerja seperti tuas satau pipa memerlukan proses di keenam sisinya, membuat *part presentation*, pemegang, dan *head* adalah sangat penting. Proses untuk keenam sisi memerlukan memerlukan desain *head* khusus dan pemegang dengan konsep *part reorientation* akan membuat desain *cell* spesial. Volume benda kerja harus diperhitungkan untuk mengembangkan *special cell feature* yang lain.

### Cell consideration

Ketika kita ingin memutuskan untuk mendesain teknologi atau melihat sistem penunjang, kita harus mempertimbangkan beberapa faktor. Pemilihan dari tiap komponen sangat penting antara lain ; *robots, heads, arrangement, software, tooling* dan keamanan untuk tiap komponen harus dievaluasi. Pemilihan robot harus dibuat semudah mungkin. Saran dari produsen harus dipertimbangkan, produsen dengan produk yang bermacam macam untuk berbagai kebutuhan dengan kontrol yang umum akan sangat bermanfaat. Hal ini akan sangat berguna ketika kebutuhan produksi membutuhkan spesifikasi, ukuran *cell* yang berbeda. Produk robot tersedia dalam berbagai bentuk dan ukuran, *polishing* dan *buffing* biasanya cocok menggunakan 6 derajat kebebasan, dengan *payload* 22 sampai 99 lb. Alasan utama harus dirumuskan , haruskah kita memutuskan untuk menggunakan robot dengan spesifikasi kurang dari 6 derajat kebebasan atau *payload* kurang dari 22 lb. Harus diperhitungkan kemampuan robot tersebut jika jenis dan ukuran dari benda kerja berubah di masa mendatang.



## Process Heads

UNIVERSITAS  
GADJAH MADA

Pemilihan dan penempatan dari *heads* merupakan bagian yang penting dari desain dan implementasi dari *robot finishing cell*. Beberapa pengguna baru memilih lengan standar untuk buffing dan *polishing jack*. Pilihan ini jarang dapat bertahan untuk waktu yang lama, hampir semua sistem pendukung robot mempunyai bermacam desain *head* untuk memenuhi kebutuhan proses dan aplikasi yang luas dari *robot finishing*, *head* harus fleksibel. Berbagai macam jenis *contact wheel* dan ukuran dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan proses dari berbagai benda kerja. Kecepatan penggantian *wheels*, desain *floating wheels*, kemampuan kontrol daya dan kecepatan adalah beberapa pertimbangan utama pemilihan *heads*. *Head* dengan *vertical* dan *horizontal belt* mungkin dibutuhkan untuk proses yang lebih baik dari benda kerja yang bervariasi. *Modern heads* telah didesain dengan fleksibilitas yang tinggi untuk berbagai proses. Sebuah desain *head* dapat mengakomodasi *belt*, *wheels*, *buffs*, dengan *software* untuk *kontrol belt* dan atau *buff wheel wear factor*. Memilih *head* untuk satu kegunaan, seperti operasi *belt* atau *wheel* dapat sangat berpengaruh pada keterbatasannya di masa mendatang untuk sebuah sistem *robot finishing* yang fleksibel.

## End-Of-Arm Tooling

Benda kerja yang akan digunakan dalam proses *finishing* sangat mempengaruhi kita dalam mendesain sebuah *gripper*. Para produsen dari perusahaan *tooling company* banyak memproduksi bermacam-macam “off-the-shelf” *pneumatic actuated products*. Jenis *parallel* dan *three jaw styles* dengan *gripping forces* antara 30 sampai 330 lbs adalah jenis *gripper* yang paling banyak digunakan. Ketika kita ingin mendesain atau memilih suatu *gripper* untuk benda kerja tertentu, kita harus mempertimbangkan besarnya *gripping force* yang dibutuhkan untuk memegang benda kerja selama proses *finishing*. *Belt polishing* dapat digunakan untuk *gripping force* yang relatif bervariasi antara 30 sampai 100 lbs, tergantung pada ukuran benda kerja, bentuk dan permukaan *finger*. *Flap wheel*, *wire brushes* dan *synthetic wheel* membutuhkan suatu jenis *finger locking design* untuk mengunci benda kerja pada *fingers* agar mencegah benda kerja terlepas pada saat proses. Aplikasi *buffing* membutuhkan desain *gripper* yang paling



sulit. *Buff* cenderung akan memegang pinggiran benda kerja dan mendorongnya menjauhi *gripper*, ketika *buff* sedang mengalami proses, *gripper* harus mempunyai gaya pemegang yang besar dari 100 sampai dengan 300 lbs dengan menggunakan *locking finger design*. Kadang-kadang benda kerja tidak dapat menggunakan produk “off-the-shelf”, untuk kasus ini designer harus mendesain sendiri *pneumatic actuated cylinders*, *collets*, *mandrells*, dan peralatan lain yang dibutuhkan untuk memegang benda kerja. Tujuan utama dari *gripper* adalah memegang benda kerja dengan gaya yang tepat untuk operasional yang terus-menerus, *grippers* tidak boleh merusak benda kerja, dan mengganggu proses. *Grippers* harus dapat mengambil benda kerja dari *queuing nest* dan meletakkan benda kerja yang telah *difinishing* ke tempat yang telah disediakan tanpa merusak benda kerja yang telah *difinishing*. Bagian pemegang yang bersentuhan dengan benda kerja harus mempertimbangkan perubahan bentuknya, sangat dianjurkan untuk membuat desain *gripper* yang bersentuhan dengan benda kerja dapat diganti dengan mudah, karena hampir tidak mungkin membuat suatu *gripper* yang bagian pemegangnya tidak bersentuhan dengan benda kerja selama proses. *Gripper* juga harus dapat berkomunikasi dengan *cell* selama proses, *switches* atau sensor untuk mengidentifikasi *open/closed positions* dan *part present* akan sangat bermanfaat untuk mengatur proses. Ketika kita ingin mendesain suatu *gripper*, sangat dianjurkan untuk menghindari penggunaan *single acting spring unit*, dan *vacuum* untuk semua proses. *Single spring* dan *vacuum* tidak mempunyai reliabilitas seperti *pneumatic double acting mechanical design* dan harus dihindari sebisa mungkin. Desain *safety spring*, dimana sebuah *spring* bekerja bersama tekanan udara dan memberikan gaya pegang, jika tekanan udara hilang harus dipertimbangkan dimana benda kerja yang jatuh dapat menyebabkan masalah jika tekanan udara hilang.

Ketika seorang pengguna membutuhkan sejumlah benda kerja yang berbeda dalam satu *shift*, *tool change modules* adalah pemecahannya. Alat ini memungkinkan pengguna mengganti *gripper* secara cepat tanpa menggunakan alat yang lain, sehingga dapat menghindari penggunaan manual oleh operator dan waktu yang terbuang. Pada kasus yang lain *gripper* dihubungkan dengan kabel dan pipa ke adapter yang terletak pada *pneumatic device* untuk mengunci *tool* pada lengan robot, cara ini dapat



memungkinkan pergantian *tool* dalam satu menit atau kurang. Biasanya seorang operator memerlukan waktu 10 sampai 15 menit untuk melepas dan memasang baut pada *tool* ini. Pada proses yang memerlukan *finishing* benda kerja secara menyeluruh terkadang dibutuhkan peralatan tambahan yang bekerja bersama dengan *gripper*. Peralatan yang umum adalah part *reorientation station*, dimana benda kerja ditempatkan pada *nest* dan diletakkan kembali pada posisi yang berbeda untuk menyelesaikan bagian benda kerja yang belum diproses. Teknik ini digunakan pada benda kerja seperti *hip* dan *knee implants* yang membutuhkan posisi pegangan dari banyak sisi.

### Part Presentation

Pemilihan tipe *raw part's presentation* sangat berpengaruh pada produktivitas *cell*, banyak dari pengguna baru untuk pertama kali menggunakan *operator load* setiap benda kerja untuk robot EOAT, hal ini sangat jarang dapat memecahkan masalah produktivitas. Hampir semua *production cell* telah mengembangkan *raw part queue* dari 6 sampai 30 *parts*, *queue* ini memungkinkan *cell* untuk tetap beroperasi untuk beberapa persediaan *queue*.

*Queue station* dapat mengambil sejumlah *forms*, *single* dan *double drawer stations* adalah yang paling populer dikarenakan memungkinkan operator untuk memeriksa, mengganti jenis benda kerja dan operator tanpa mengganggu *cell's production*. *Conveyor* dapat menyediakan sampai delapan jam *parts queue* dan telah menyediakan bagi *customer* yang memerlukan *medium* sampai *high size lot runs*, sehingga dapat digunakan untuk *full* tiga *shift* operasi.

Ketika kita ingin memilih kapasitas dari *queue*, harus dipertimbangkan beberapa faktor berikut :

1. Harus diantisipasi penggunaan media untuk waktu yang panjang, benda kerja pada *queue* harus tidak boleh melebihi jumlah *part* yang berjalan pada satu set media. *Cell* akan berhenti jika media mengalami kelebihan dan biaya untuk penambahan *part* pada *queue* sangat merugikan.
2. Biaya *tooling* untuk *queue* dengan kapasitas yang besar sangat mahal.

## Cell Arrangement

Komponen *cell* harus disusun dengan pertimbangan kemudahan service, memprogram, dan operasionalnya. *Floor space* sangat penting pada setiap pabrik, tetapi mendesain sebuah *cell* dimana komponen-komponennya diletakkan pada satu tempat dapat memyusahkan dalam memprogram dan perawatan. Menempatkan komponen pada *common base* dan menggunakan *plug-in connector* menambah biaya yang harus pengguna bayarkan ketika *cell* dipindahkan.

*Cells* didesain dengan *fence style barrier* dan *total walled enclosures*. *Fences* merupakan pemisah yang tidak mahal untuk memisahkan robot dengan operator, *fences* melindungi lingkungan luar dari lemparan atau jatuhnya benda kerja, tetapi desain *fences* ini harus menggunakan *dust collector* agar tidak mencemari lingkungan. Desain dengan *total walled enclosures* menggunakan *sheet metal* yang memiliki jendela dan pintu untuk mengakses. *Total enclosure* memiliki keuntungan tambahan karena tidak tercemarinya lingkungan, namun tetap diperlukan *dust collector* yang biasanya diletakkan di lantai. *Heads* biasanya tidak membutuhkan *elaborate guards* dan *dust hoods* yang membuat media dapat bebas beroperasi untuk berbagai gerakan. *Cell lighting* disediakan oleh *independent lighting transformer to fluorescent* atau *adjustable flood light fixtures*.

Keamanan merupakan hal utama yang harus diperhatikan, standar pemerintah dan perhatian yang bagus diperlukan untuk menjaga/membatasi akses ke area kerja robot. Penyediaan fasilitas untuk mengakses *part* pada *queue* untuk operator tetap harus ada tanpa harus mengganggu jalannya produksi. *RIA safety committee* telah mengeluarkan standar keamanan bagi pengguna robot.

## Software

*Software Robot polishing systems* memperlihatkan sedikit kesamaan dengan aplikasi robot industri yang lain. *Finishing robots* tidak hanya melakukan sebuah proses, tetapi melakukan proses pada banyak lokasi(*heads*). Setiap proses memerlukan alat yang



berbeda dengan parameter proses seperti; SFPM, IPM, *force*, *dressing* and *compensation factors*. Untuk menyelesaikan seluruh proses, robot juga dapat melakukan *palletizing* dan *depalletizing* benda kerja.

Program *logic* untuk menyelesaikan urutan proses dengan 6 buah media terpisah dapat terdiri dari *firing* dan *monitoring* lebih dari 60 I/O's dan sampai 8 *analog signals*. Untuk satu *user frame* dan satu *user tool* pada tiap *heads* diperlukan 40 sampai 60 *process points*. Hasil ini untuk kontrol struktur yang kompleks meskipun bagi programmer yang telah berpengalaman.

Jika *robotic finishing cell* digunakan untuk *tool proses*, mereka harus dibuat "user friendly". Perintah yang mendukung struktur *software* yang kompleks untuk setiap bagian dari program harus dibatasi menjadi "polisher friendly" sistem menu yang sederhana. Sistem tersebut harus dapat mendukung seluruh proses tanpa operator harus sebagai programmer robot yang ahli. Menu sistem tersebut memungkinkan pengguna untuk mengembangkan urutan proses dengan menamai setiap user name. Semua input diberikan dari sistem CRT/Keyboard, semua model operasi dapat diketahui dengan melihat menu pilihan proses, dengan status urutan proses, perhitungan material, *cycle time*, dan kesalahan yang ditampilkan oleh monitor. Pengguna tidak harus menulis urutan kode, perintah I/O on atau of, atau harus mengerti bahasa robot untuk mengembangkan kerja robot. Semua program yang kompleks di buat oleh *executive software*, yang tidak dapat dilihat oleh pengguna. Dengan perlakuan seperti ini diharapkan pengguna dapat berkonsentrasi kepada produktivitas kerjanya, *process* dan *quality issues*, bukan pada program robot yang sangat kompleks. Untuk mengembangkan *software* untuk *robotic finishing cell*, hal-hal dibawah ini harus menjadi pertimbangan :

- *Automated palletizing/depalletizing routines*
- *Flexible sequence control*
- *Robot IPM, head force, SFPM override*
- *Media Wear compensation (force, SFPM, or IPM)*
- *Media Life Monitor*
- *Path-shut-off or multiple repeat*



- *Path test run*
- *Frame offsets*
- *System fault screen*
- *Cycle timer/watch dog timer*
- *File management utilities.*

## Process Programming

Proses atau urutan program dapat diajarkan langsung menggunakan *teach pendant*. *User* menggerakkan *hand polisher robot* menuju media yang akan dilakukan proses *finishing*, selama proses ini *user* dapat menseting parameter-parameter berdasarkan media yang digunakan dan area benda kerjayang akan diproses. Sebuah program yang baik memungkinkan bagi *user* untuk mengubah parameter proses (SFPM, IPM, Force). Memprogram sebuah *finishing robot* adalah sangat rumit dan membutuhkan waktu yang lama, terutama dalam menseting parameter dan melakukan tes untuk melihat hasil proses *finishing*. Pekerjaan ini menjadi lebih sulit ketika robot harus mengambil dan meletakkan benda kerja pada *queue* secara otomatis.

## Technology Advances

Simulasi komputer dari aplikasi robot telah digunakan beberapa tahun yang lalu untuk mengevaluasi potensi aplikasi seperti jangkauan, *desain tool* dan *cycle time*. Metode simulasi telah berhasil digunakan untuk penyusunan peralatan, mengevaluasi desain EOAT dan memperhitungkan *cycle time*. Keuntungan terbesar dari penggunaan simulasi pada *polishing cell* adalah mengurangi banyak *teach time*, dapat juga dilakukan pada saat proses produksi berjalan dan akan memerlukan tambahan benda kerja yang baru. Pengalaman membuktikan bahwa *off-line taught* program dapat dilakukan dalam waktu yang terpisah, waktu yang digunakan selama simulasi hampir sama dengan waktu yang digunakan pada saat proses produksi. Bagaimanapun juga, menggunakan teknik *off-line robot cell* dapat menjalankan lebih banyak produksi selama proses pemrograman. Teknik simulasi dapat berjalan dengan berhasil pada model 3-D CAD, *customer part* terkadang sulit untuk dimodelisasi, dan pada beberapa kasus terlihat sedikit kesamaan



model dengan ukuran sebenarnya. Proses yang menggunakan *raw material* seperti *casting*, *forging* atau *molding* tidak selalu memiliki toleransi yang besar hal ini disebabkan oleh penggunaan *multiple molds* dan *die placed* selalu meningkat, faktor inilah yang meningkatkan kompleksitas pemrograman dengan menggunakan teknik *on-line* dan *off-line programming*. Produsen *software* simulasi telah mengembangkan *software* untuk mendukung *hand held* dan *CMM probes* dengan biaya murah. Penelitian ini memungkinkan *user* untuk mendapatkan data *part surface* dan juga pada *part* yang diproduksi sebenarnya, metode ini sangatlah menjanjikan untuk menjadikan pengembangan proses pemrograman menjadi lebih efektif.

Robot telah mengalami perkembangan baru dengan adanya proses *polishing*, karena sekarang robot dengan kontrol komputernya dan gerak terus-menerus telah dapat diprogram menyerupai gerak tangan manusia untuk melakukan proses *polishing* untuk berbagai bentuk permukaan *part* yang kompleks. Seluruh produsen robot dan *user* yang semakin banyak pengalaman, *software*, simulasi dan kelebihan pada sistem dan proses serta evolusi teknologi lainnya akan membuat aplikasi proses *finishing* yang menggunakan robot semakin murah dan efisien.

### I.5.3. Peralatan Polishing dan kegunaannya

Kesuksesan proses *polishing* yang menggunakan *Buffing Wheel* dengan *Compound* terletak pada 4 faktor utama yakni:

- Tipe *Cutting compound* harus digunakan untuk pekerjaan kasar, dengan menggunakan jenis *aggressive cloth buffing wheel* untuk mempercepat pengikisan permukaan kasar material. Setelah didapati hasil yang normal untuk lapisan tersebut kemudian dilanjutkan dengan “color operation” menggunakan *soft cloth buffing wheel* yang digabungkan dengan pemakaian warna *compound* yang sesuai untuk mendapatkan hasil sebuah permukaan yang mengkilap.
- Prosedur “Cut and Color” dengan memperhitungkan hasil yang diinginkan dapat dilakukan dalam satu kali proses dengan mempertimbangkan faktor ekonomisnya. Tipe-tipe *buffing wheel* yang digunakan dalam prosedur ini dapat sangat bervariasi sesuai dengan material, jenis *compound* dan hasil yang diinginkan.



- Tipe *buffing wheel* yang digunakan harus sesuai dengan jenis *compound* yang dipakai, untuk jenis *compound* yang berbeda tidak boleh digunakan untuk satu *wheel* yang sama.
- Pemilihan *wheel* yang dipakai disesuaikan dengan ukuran material yang akan dikerjakan, serta kecepatan proses itu sendiri.

Beberapa pertimbangan yang harus dijadikan pedoman dalam memilih *wheel* yang tepat adalah sebagai berikut :

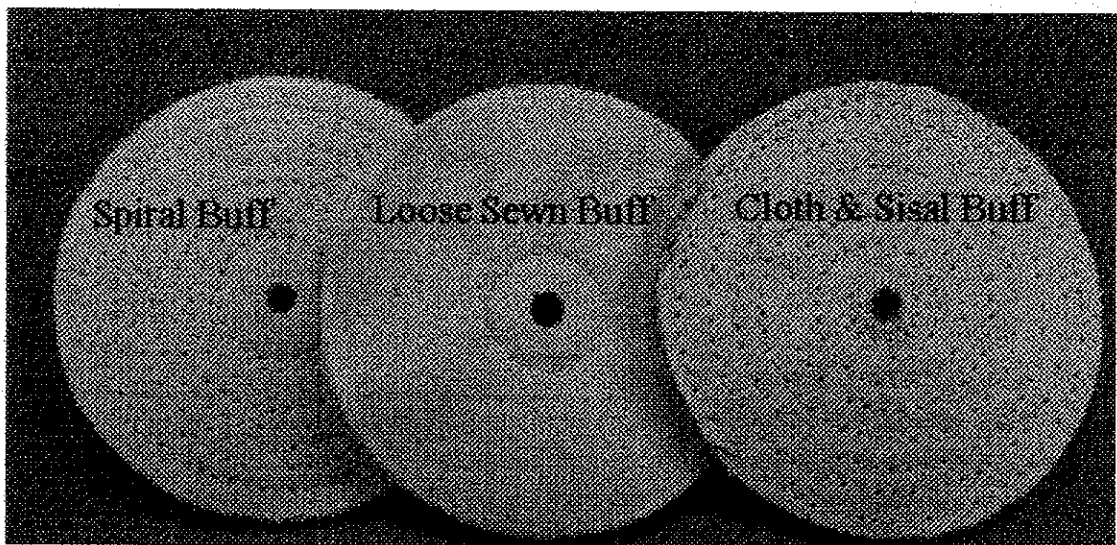
1. Pemilihan *wheel* disesuaikan dengan kecepatan luas permukaan per menit ketika proses berlangsung.
2. Diameter *wheel* yang digunakan disesuaikan dengan luasan operasi kerja yang mungkin terjadi.
3. Lebar permukaan *wheel* yang melakukan kontak dengan material sedikit lebih lebar dibandingkan dengan daerah kerja yang diinginkan.
4. Pemilihan kekerasan *wheel* dan material *wheel* disesuaikan dengan proses yang akan dilakukan.

Jenis-jenis *wheel* yang terdapat dalam dunia industri untuk proses *polishing* adalah sebagai berikut :

1. *Disc Canvas Wheels* – digunakan untuk peralatan pertanian seperti bajak dan sebagainya.
2. *Cloth (muslin) Polishing Wheels* – merupakan jenis yang paling banyak digunakan untuk berbagai jenis proses *polishing* dan berbagai tingkat kehalusan, mulai dari yang kasar sampai dengan yang halus.
3. *Leather Wheels – Bull neck leather* merupakan bahan yang umumnya digunakan dan dipakai ketika dibutuhkan sebuah *wheel* yang fleksibel untuk pengerjaan besi cor dan baja cor, kuningan serta perunggu.
4. *Solid Felt Wheel* – sangat cocok untuk pengerjaan permukaan *ferrous* dan *non ferrous metals*, menghasilkan *high finish* untuk baja, dan *medium finish* untuk kuningan dan aluminium.



5. *Sheep Skin Wheels* – digunakan untuk menghilangkan bintik-bintik noda pada lembaran stainless steel.
6. *Compressed Canvas Wheels* dan *Compressed Leather* – digunakan untuk pisau pemotong, *small tool*, *button dies* dan sebagainya.
7. *Full Disc Buff* – terbuat dari 20 lapis lembaran berbagai macam benang jenis baru dan beratnya tergantung pada pemakaiannya.
8. *Bias Type Buff* – digunakan dimana dibutuhkan *cutting* kecepatan tinggi dan *colouring buff*.



**Gambar I.19. Polishing Wheel (Bright work, Inc.)**

Gambar di atas merupakan contoh *Polishing wheel* ukuran kecil yang dikeluarkan oleh *Bright Work, Inc.*, yang terdiri dari 3 tipe yakni :

1. *Spiral Wheel* – terbuat dari bahan katun dengan pola benang berbentuk spiral yang memiliki keunggulan untuk pemakaian lama dengan kontrol yang baik, dan sesuai untuk segala jenis *compound*.
2. *Loose Sewn Wheel* – terbuat dari bahan katun kualitas tinggi untuk *finishing* hampir segala jenis logam, digunakan dengan *colouring* untuk menghasilkan permukaan yang mengkilap.

*Cloth & Sisal Wheel* – merupakan jenis *cutting wheel* cepat dengan *compound* stainless untuk stainless steel, baja dan besi cor, menggunakan benang fiber, harus sering ditambahkan *compound* dan tidak boleh terlalu banyak.

Satu lagi tipe *Polishing wheel* yang dikeluarkan oleh *Bright Work, Inc.* yakni *Air-flex wheel* yang memiliki sifat lebih *abrasive* jika dibandingkan dengan tipe *spiral wheel*, namun tidak lebih *abrasive* jika dibandingkan dengan tipe *Loose sewn*, tetapi memiliki keunggulan dapat digunakan untuk berbagai bentuk permukaan karena dapat menjangkau permukaan yang lebih rumit, dan dapat digunakan untuk berbagai jenis *compound*.



**Gambar I.20. Air-flex Polishing wheel**

Berikut ini adalah tabel penggunaan berbagai jenis *compound* dan kegunaannya masing-masing.

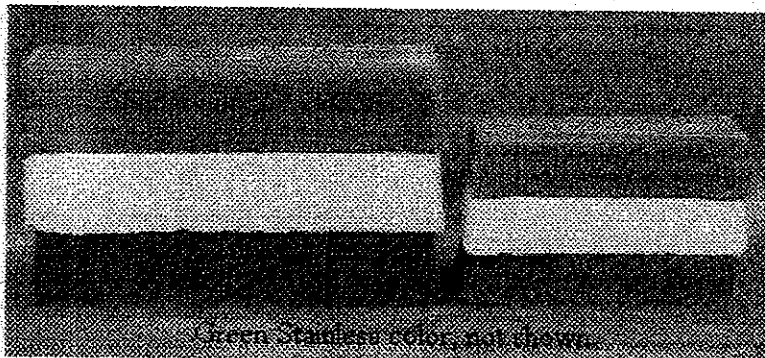
**Tabel I.2. Tipe compound dan kegunaannya**

TIPE COMPOUND	KEGUNAAN
COLORING	Untuk menghasilkan permukaan yang sangat mengkilap pada metal dan plastik
CROCUS	Untuk slight cut dan mewarnai soft metal



EMERY PASTE UNIVERSITAS GADJAH MADA	Digunakan pada roll, set-up wheel, wire wheel, dan tampico wheel
GREASELESS	Untuk polishing, deburring atau satin finish
GREASE STICK	Untuk pelumasan polishing wheel dan abrasive belt
STEEL CUT	Penamaan menggambarkan fungsinya
TRIPOLI	Untuk Cut dan mewarnai non-ferrous metal, plastik, dan kayu
WHITE POLISH	Untuk Cut dan mewarnai aluminium, brass, bronze, copper, celluloid, die casting, hard rubber, plastik, dan kayu

Berikut ini merupakan tabel penggunaan jenis-jenis *compound* sesuai dengan jenis material yang akan *dipolish* berdasarkan *Mosher Company*.




**Gambar I.21. Stainless steel compound**


**Tabel I.3. Penggunaan compound dan materialnya**

MATERIAL	PROSES		
	COLOR	CUT & COLOR	CUT
ALUMINIUM	COLORING COMPOUNDS 862 Soft, Dry 1062 Med. Hard, Med. Dry 1979 Very Hard, Dry 2222 Med. hard, Dry, Pink 2382 Hard, Dry, Yellow	TRIPOLI COMPOUNDS 1571 Hard, Very dry, 100 percent Saponifiable WHITE POLISH COMPOUNDS 16 Med. hard Dry 621 Hard, Dry	GREASELESS COMPOUNDS when more cut is required TRIPOLI COMPOUNDS 75 Med. hard, Med. Dry
NICKEL, SILVER & GOLD	COLORING COMPOUND 2113 W.D. Med. Hard, Dry, Water Disperseable 2222 Med. hard, Dry, Pink, Extra bright lustre	COLORING COMPOUND 1062 Med. hard, Med. dry CROCUS COMPOUNDS 7 Hard, Dry	TRIPOLI COMPOUNDS 1494 Hard, Med. Dry 1571 Hard, Very dry, 100% Saponifiable
BRASS & BRONZE	COLORING COMPOUNDS 1062 Med. Hard, Med. dry 1979 Very Hard, Dry 2222 Med. hard, Dry, Pink Extra bright lustre 2382 Hard, Dry, Yellow	TRIPOLI COMPOUNDS 100 percent Saponifiable 1571 Hard, Very dry WHITE POLISH COMPOUNDS 16 Med. hard Dry 621 Hard, Dry	TRIPOLI COMPOUNDS 75 Med. hard, Med. Dry 2010 Med. hard, Med. dry 2364 Hard, Med. dry
CHROMIUM PLATE	COLORING COMPOUNDS 1062 Med. Hard, Med. dry 1965 Hard, Med. Dry	COLORING COMPOUNDS 2318 W.D. Med. Hard, Med. dry	STEEL CUTTING 2330 Hard, Dry



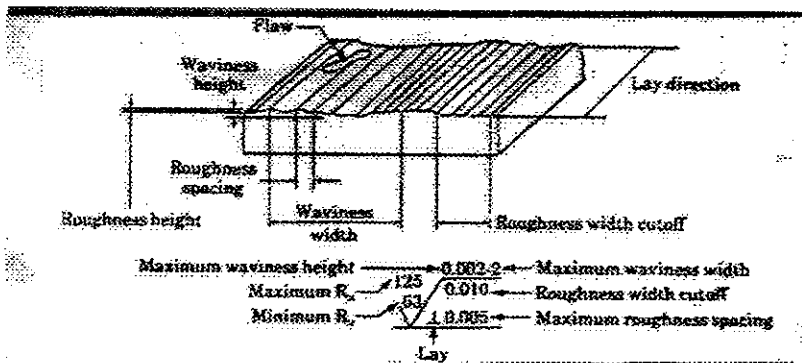
	<b>COLORING COMPOUNDS</b> 862 Soft, Dry 1062 Med. Hard, Med. dry 1979 Very Hard, Dry 2222 Med. hard, Dry, Pink	<b>TRIPOLI COMPOUNDS</b> 1571 Hard, Very dry 100% Saponifiable <b>WHITE POLISH COMPOUNDS</b> 16 Med. Hard, dry 621 Hard, Dry	<b>TRIPOLI COMPOUNDS</b> 75 2010
<b>STEEL &amp; STAINLESS STEEL</b>	<b>COLORING COMPOUNDS</b> 1979 Very Hard, Dry 2181 Green Hard, Dry 2222 Med. hard, Dry, Pink, Extra bright lustre 2382 Hard, Dry, Yellow	<b>COLORING COMPOUNDS</b> 1062 Med. hard, Med. dry 2318 W.D. Med. Hard, Med. dry	<b>STEEL CUTTING COMPOUNDS</b> 271 Med. hard, Med. dry 1722 Hard, Med. dry 2330 Hard, Med. dry
<b>PLASTIK &amp; HARD RUBBER</b>	<b>COLORING COMPOUNDS</b> 71 Med. hard, Med. Dry 862 Soft, Dry (*Lexan Compound) 2045 Soft, Med. dry (Anti-static)	<b>WHITE POLISH COMPOUNDS</b> 16 Med. Hard, Dry 17 Med. Hard, Med. Dry 2040 Med. hard, Greasy (Anti-static)	<b>MISC COMPOUNDS</b> 2105 Med. hard, Med. dry <b>TRIPOLI COMPOUNDS</b> 112 Med. hard, Med. dry 1010 Med. hard, Med. dry 1981 Soft, Med. Dry
<b>WOOD</b>	<b>COLORING COMPOUNDS</b> 1954 Med. hard, Med. dry 1979 Very hard. Dry	<b>WHITE POLISH COMPOUNDS</b> 1062 Med. hard, Med. dry	<b>TRIPOLI COMPOUNDS</b> 112 Med. hard, Med. dry 1571 Hard, Very dry 1722 Hard, Med. Dry
<b>LEAD, PEWTER, WHITE METAL</b>	<b>COLORING COMPOUNDS</b> 862 Soft, Dry Rouge 2113 W.D. Med.	<b>CROCUS COMPOUND</b> 7 Hard, Dry <b>WHITE POLISH</b>	<b>TRIPOLI COMPOUNDS</b> 1571 Hard, Very dry 2010 Soft, Med. dry



 UNIVERSITAS GADJAH MADA	Hard, Dry, Water Disperseable	COMPOUNDS 621 Hard, Dry	2318 W.D. Med. hard, Med. Dry
NICKEL	COLORING COMPOUNDS 1965 Hard, Med. Dry 1979 Very hard, Dry	-	-

### III.4. Kekasaran Permukaan dan Hasil Proses Polishing

Semua permukaan, bagaimanapun metode manufaktur dan preparasinya, mempunyai karakteristik khusus yang disebut dengan *surface finish* atau *texture*. Penggambaran secara geometrik tentang bentuk permukaan material cukup diperlukan. Pedoman yang secara umum menerangkan dan mengukur tentang hal tersebut telah ada seperti yang tertera pada gambar I.22. dibawah ini.



Gambar I.22. Standard surface finish terminology and symbol

Keterangan :

*Waviness* : deviasi yang terjadi diukur dari permukaan yang rata. Hal ini terjadi dimungkinkan oleh adanya *defleksi tools, dies*, dan benda kerja selama proses, *warping*, ketidakrataan dalam pelumasan, *vibrasi*, atau ketidakstabilan mekanik ataupun suhu di dalam sistem. Yang diukur untuk *waviness* adalah tinggi dan lebar dari *wave*.



wilayah yang kecil, deviasi yang tidak teratur dalam skala yang lebih kecil daripada *waviness*, mungkin terletak diatas *waviness*. Yang diukur dalam *roughness* adalah tinggi, lebar dan jarak/panjang permukaan yang diukur.

*Lay* : arah dari pola utama permukaan, yang biasanya dapat dilihat atau diamati dengan mata telanjang.

*Flaws* : ketidakraturan seperti *scratches* (goresan), *cracks* (retakan), *holes* (lubang), *depressionss*(lubang akibat tekanan), *laps* , *seam* (jalur sambungan), *tears* (sobekan), dan *inclusions*.

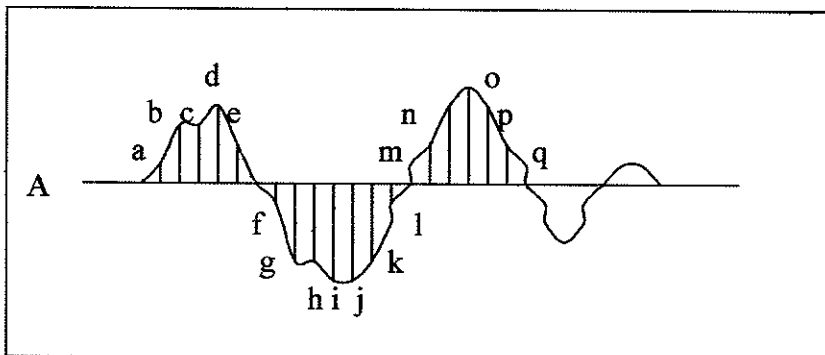
Umumnya, dua besaran yang menggambarkan kekasaran permukaan adalah *arithmetical average*, Ra (sering disebut AA atau CLA, Center Line Average) dan *Root Means Square Average*, Rq (RMS).

Berdasarkan skema yang diilustrasikan dibawah ini , *Arithmetical Average Roughness* didefinisikan sebagai :

$$Ra = \frac{a + b + c + d + \dots}{n}$$

dan *Root Means Square Average* adalah :

$$Rq = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + \dots}{n}}$$



Gambar I.23. Surface Roughness Measurement



Dikarenakan kesederhanaannya, *Arithmetical Average*, Ra telah menjadi standar

Internasional dan telah digunakan secara luas. Meskipun demikian dari gambar diatas terlihat adanya hubungan antara Rq dan Ra. Sebagai contohnya dapat terlihat pada kekasaran permukaan dari *sine wave*, Rq berbanding lurus dengan Ra dimana,  $Rq=(1,11)(Ra)$ .

Telah dilakukan penelitian untuk proses permesinan pada umumnya,  $Rq=(1,25)(Ra)$  dan lebih kurang,  $Rq=(1,45)(Ra)$  untuk proses *honing*. Besaran yang pada umumnya digunakan adalah mikro inchi ( $\mu\text{in}$ ) atau mikro meter ( $\mu\text{m}$ ), dimana  $1 \mu\text{in}=0,025 \mu\text{m}$  dan  $1 \mu\text{m}=40 \mu\text{in}$ .

Kekasaran permukaan biasanya diukur dan dicatat menggunakan peralatan yang bervariasi, yang disebut *surface Profilometers*. Salah satu yang umum dipakai adalah *diamond stylus* yang dijalankan secara garis lurus diatas permukaan material. Untuk memperlihatkan kekasaran permukaan, jalannya *profilometer* direkam menggunakan skala vertikal (tinggi kekasaran) yang besarnya lebih besar dibandingkan dengan skala horizontal.

Disebabkan oleh adanya radius dari *tip stylus*, bagian ini lebih halus dibandingkan dengan kekasaran permukaan yang sebenarnya. Semakin kecil radius dari tip dan semakin rendah kekasaran permukaan, akan semakin mendekati besaran dari kekasaran permukaan yang sebenarnya. Yang umum digunakan untuk mengukur kekasaran adalah menggunakan *stylus* berdiameter 0,0004 in ( $10 \mu\text{m}$ ). rekaman permanen dari profil permukaan dibuat oleh peralatan mekanik dan elektronik.

Kekasaran permukaan juga dapat diteliti dengan menggunakan optik atau mikroskop elektron. *Stereoscopic photograph* sangat berguna untuk penelitian permukaan tiga dimensi. Kekasaran permukaan dapat juga diukur dengan menggunakan alat ini.

Pengukuran dan pemahaman kekasaran permukaan material dapat dirasa cukup kompleks dan juga kontroversial. Pada umumnya tidak cukup menggambarkan kekasaran permukaan material dengan hanya menggunakan Ra atau Rq saja, dua permukaan material yang berbeda dapat mempunyai nilai kekasaran yang sama, seperti yang diukur oleh *profilometer*, tetapi topografinya mungkin berbeda. Perbedaan dari profil kedua



material dapat sangat berpengaruh besar ketika kita menghitung gesekan, *wear* (keausan), dan mekanisme pelumasan.

Simbol-simbol yang menjelaskan tentang *lay* dari sebuah permukaan diberikan pada tabel I.4. Simbol untuk *lay* diletakkan pada pojok kanan bawah dari *check mark*.

**Tabel I.4. Lay symbols for engineering surfaces**

Lay symbol	Interpretation	Examples	Lay symbol	Interpretation	Examples
—	Lay parallel to the line representing the surface to which the symbol is applied		C	Lay approximately circular relative to the centre of the surface to which the symbol is applied	
⊥	Lay perpendicular to the line representing the surface to which the symbol is applied		R	Lay approximately radial relative to the centre of the surface to which the symbol is applied	
X	Lay angular in both directions to line representing the surface to which symbol is applied		P	Pitted, protuberant, porous, or particulate nondirectional lay	
M	Lay multidirectional				

Simbol-simbol tersebut digunakan untuk menjelaskan sebuah permukaan berdasarkan kekasaran, *waviness*, dan *lay*, untuk itu *flaws* tidak termasuk. Bagaimanapun juga karena pentingnya, terdapat tanda khusus dalam gambar teknik yang menjelaskan tentang metode pemeriksaan untuk berbagai macam *surface flaws*.

Besarnya tingkat kekasaran dari sebuah permukaan yang akan *difinishing* dibutuhkan untuk aplikasi *engineering* yang diberikan dalam tabel I.5.



**Tabel I.5. Tingkat kekasaran beberapa komponen engineering**

(250 $\mu\text{in}$ )	$6,3\sqrt{\phantom{x}}$	Clearance surfaces Rough machine parts	(16 $\mu\text{in}$ )	$0,40\sqrt{\phantom{x}}$	Motor shaft Gear teeth (heavy loads) Spline shafts O-ring grooves (static) Antifriction-bearing bores and faces Chamshaft lobes Compressor-blade airfoils Journals for elastomer lip seals
(125)	$3,2\sqrt{\phantom{x}}$	Mating surfaces (static) Chased and cut threads Clutch-disk faces Surfaces for soft gaskets			
(63)	$1,60\sqrt{\phantom{x}}$	Piston-pin bores Brake drums Cylinder block, top Gear locating faces Gear shafts and bores Ratchet and pawl teeth Milled threads Rolling surfaces Gearbox faces Piston crowns Turbine-blade dovetails	(13)	$0,32\sqrt{\phantom{x}}$	Engine cylinder bores Piston outside diameters Crankshaft bearings
			(8)	$0,20\sqrt{\phantom{x}}$	Jet-engine stator blades Valve-tappet cam faces Hydraulic-cylinder bores Lapped antifriction bearings
(32)	$0,80\sqrt{\phantom{x}}$	Boached holes Bronze journal bearings Gear teeth Slideways and gibs Press-fit parts Piston-rod bushing Antifriction-bearing seats Sealing surfaces for hydraulic tube fittings	(4)	$0,10\sqrt{\phantom{x}}$	Ball-bearings faces Piston-pins Hydraulic piston rods Carbon-seal mating surfaces
			(2)	$0,050\sqrt{\phantom{x}}$	Shop-gage faces Comparator anvils
			(1)	$0,025\sqrt{\phantom{x}}$	Bearing balls Gages and mirrors Micrometer anvils

Tabel I.6. menunjukkan kisaran tingkat kekasaran dari berbagai macam proses *machining, forming*, dan proses *casting*.



**Tabel 1.6. Kisaran tingkat kekasaran dari berbagai macam proses manufaktur. (Sumber Courtesy of General Motors)**

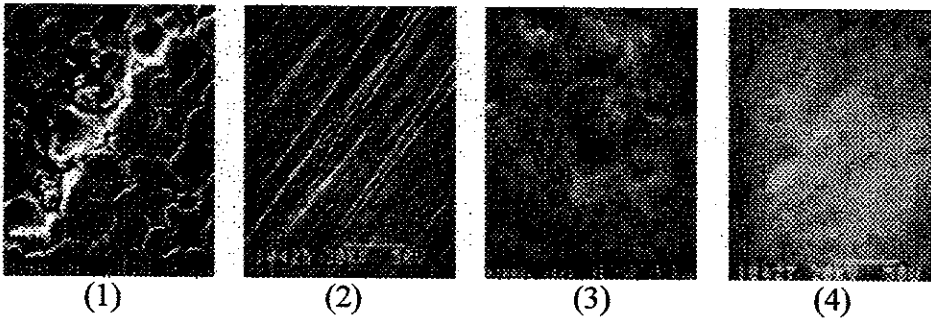
Process	Roughness $R_a$													
	$\mu\text{m}$	50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.80	0.40	0.20	0.10	0.05	0.025	0.012
Flame cutting	$\mu\text{in.}$	2000	1000	500	250	125	63	32	15	8	4	2	1	0.5
Grinding (coarse grinding)														
Sawing														
Planing, shaping														
Drilling														
Chemical machining														
Electrical discharge machining														
Milling														
Benching														
Reaming														
Electron beam machining														
Laser machining														
Electrochemical machining														
Boring, turning														
Barrel finishing														
Electrochemical grinding														
Roller burnishing														
Grinding														
Honing														
Electropolishing														
Polishing														
Lapping														
Superfinishing														
Sand casting														
Hot rolling														
Forging														
Permanent mold casting														
Investment casting														
Extruding														
Cold rolling, drawing														
Die casting														

Dari tabel tersebut terlihat bahwa untuk proses *polishing* rata-rata tingkat kekasaran yang diperoleh berkisar antara 0,40 sampai dengan 0,10  $\mu\text{m}$  namun untuk aplikasi tertentu dapat mencapai 0,012  $\mu\text{m}$ .



Proses *polishing* merupakan sebuah metode *finishing* yang cukup baik untuk menghasilkan permukaan yang halus dan banyak digunakan untuk proses manufaktur di industri jika dibandingkan dengan proses *lapping* maupun *super finishing*, meskipun untuk proses *lapping* dan *superfinishing* rata-rata hasilnya dapat mencapai  $0,05 \mu\text{m}$ .

Gambar I.24. menunjukkan contoh hasil proses polishing sebuah material.



Gambar I.24. Visualisasi hasil proses polishing<sup>11</sup>

Keterangan :

- (1) Merupakan gambar dari permukaan sebuah material stainless steel yang belum dilakukan proses *finishing* (sebelum proses *polishing*).  
Terlihat permukaan banyak terdapat *crevasses* dan kasar.
- (2) Merupakan gambar permukaan material stainless steel setelah dilakukan proses *polishing*.  
Terlihat permukaan lebih rata dan halus dibandingkan jika tidak dilakukan *polishing*, meskipun masih terdapat *grooves* yang teratur.
- (3) Merupakan gambar dari hasil proses *superfinishing* permukaan material (1) yang sebelumnya belum dilakukan *polishing*.  
Terlihat permukaan menjadi lebih halus, dan sebagian besar *crevasses* menjadi hilang.
- (4) Merupakan gambar dari hasil proses *superfinishing* permukaan material (2) yang sebelumnya telah *dipolish*.  
Terlihat permukaan menjadi sangat rata dan halus, tidak ada lagi *grooves* atau *crevasses*.

<sup>11</sup> [www.preciseusa.com](http://www.preciseusa.com)

## BAB II.

### ROBOT INDUSTRI KAWASAKI FS30L

Di tengah persaingan dalam dunia industri dewasa ini, pemakaian robot industri sebagai suatu terobosan baru telah menjadi sorotan bagi pelaku-pelaku bisnis. Pertimbangan-pertimbangan ekonomis, efisiensi, keselamatan dan sebagainya selalu digali untuk mencari kemungkinan-kemungkinan digantinya sistem yang lama menjadi sistem robot. Dengan persaingan yang sangat kompetitif itulah, maka para produsen robot berusaha terus melakukan penelitian-penelitian serta inovasi-inovasi yang baru yang mampu memenuhi kebutuhan para konsumennya dengan tidak meninggalkan sisi komersialnya untuk dapat bersaing di pasar global.

Salah satu produsen robot industri yang cukup terkenal pada saat ini adalah Robot Industri Kawasaki yang berpusat di Jepang. Dengan inovasi-inovasinya Robot Industri Kawasaki mampu menjadi pesaing utama dalam bisnis robot industri, Kawasaki mampu memberikan kecanggihan teknologinya sehingga banyak para konsumen yang menggunakan robot ini untuk keperluan produksinya. Hampir di setiap negara yang memiliki industri maju dan berkembang menggunakan robot Kawasaki, untuk itu Kawasaki telah membuka banyak cabang perusahaannya di banyak negara demi memenuhi kebutuhan konsumennya dan merebut pangsa pasar internasional.

Robot Industri Kawasaki telah memproduksi berbagai tipe robot yang digunakan dalam industri seperti *Arc Welding*, *Spray painting*, *Handling*, *Paletizing*, *Clen Room*, dan sebagainya. Robot Industri Kawasaki juga terus memperbaharui teknologinya dengan seri-seri yang lebih baru agar dapat bersaing dengan produsen robot lainnya.

#### II.1. Diskripsi Robot Industri Kawasaki

##### II.1.1. Sejarah Perusahaan

Kawasaki Heavy Industries LTD (KHI) merupakan perusahaan besar yang terdiri dari; *R&D*, *Engineering*, *Manufacturing*, dan *Service Oriented Tasks*. KHI berdiri pada tahun 1896. KHI sekarang memiliki 21 fasilitas *manufacturing* di seluruh penjuru dunia;



4 berada di Amerika Serikat dan satu berada di United Kingdom. KHI memiliki karyawan sebanyak 16500 orang dengan volume penjualan lebih dari 9 juta US\$.

Divisi Robot adalah merupakan bagian dari Consumer Products & Machinery Group. Kawasaki memasuki bisnis robot industri pada tahun 1968 dengan sebuah teknologi yang berlisensi bersama Unimation, dan memulai memproduksi dan menjual robot di Jepang.

Berikut ini merupakan gambaran peningkatan pertumbuhan produksi Robot Industri Kawasaki setelah tahun 1968<sup>1</sup>:

- 1968 – Memulai memproduksi robot hidrolik dibawah lisensi dari Unimation.
- 1973 – Produksi robot meningkat menjadi 100 unit.
- 1980 – Produksi robot meningkat menjadi 1.000 unit.
- 1983 – memulai memproduksi robot P-series.
- 1985 – Lisensi bersama dengan Unimation berakhir.
- 1986 – Mengembangkan *electric robot* (desain dasar Robot Kawasaki).
- 1986 – Produksi robot mencapai 5.000 unit.
- 1989 – Mengembangkan robot J-series.
- 1990 – Produksi robot mencapai 10.000 unit.
- 1991 – Mengembangkan robot U-series.
- 1992 – Penggabungan Divisi Robot dengan Divisi Factory Automation.
- 1993 – Produksi robot mencapai 15.000 unit.
- 1995 – Produksi robot mencapai 20.000 unit.
- 1998 – Memperoleh sertifikat ISO 9001.
- 1999 – Membuka kantor di Kentucky.
- 2000 – Membuka kantor di Kanada.
- 2000 – Membeli Kobe Steel Robot Division.
- 2000 – Mengembangkan robot Z-series.

---

<sup>1</sup> [www.kawasakirobot.com](http://www.kawasakirobot.com)



Divisi Robot mendirikan anak perusahaan di Amerika Serikat dan Eropa untuk memenuhi kebutuhan lokal akan robot. Ketiga anak perusahaan tersebut adalah Kawasaki Robotics (USA), Inc (KRI), Kawasaki Robotics (UK) Limited (KRUK), dan Kawasaki Robotics GmbH (KRG).

Kantor pusat Amerika Utara, Kawasaki Robotics (USA), Inc., dibuka pada tahun 1986 dan bergabung pada tahun 1990. Kantor cabang dibuka di UK pada tahun 1991, dan KRUK didirikan pada tahun 1995. KRG didirikan pada tahun 1995. Pada tahun 1998 Kawasaki Robotics membuka North American Training Center. KRI sebagai kantor pusat perusahaan secara langsung melakukan penjualan dan melayani konsumen di berbagai penjuru dunia.

Kawasaki Robotics (USA), Inc. menyediakan fasilitas sebagai berikut :

- *System Integration dan project management.*
- *Application Engineering.*
- *Feasibility studies dan Robotics simulations.*
- *Sales dan Marketing.*
- *Training dan Documentation.*
- *Field service dan Spare parts.*
- *Maintenance dan service program.*
- *Installation dan start-up.*
- *Hot line 24 jam.*
- *Refurbishing dan overhaul.*

### II.1.2. Visi dan Misi perusahaan

Visi Industri Robot Kawasaki adalah meningkatkan penjualan, sebagai bagian dari keluarga besar Kawasaki seluruhnya, dengan menjaga kemampuan untuk mencapai target kami.

Misi dari Industri Robot Kawasaki adalah kami menyediakan pemecahan masalah robot – kami bertekad untuk menjadi yang terbaik.. kami menghargai orang-orang yang telah membesarkan perusahaan kami, pelanggan kami, dan komunitas kami. Kawasaki robotics adalah sebagai pemimpin dalam pengadaan robot industri dan sistem otomatis.



Dengan beban robot yang berkisar antara 2 kg sampai 300 kg, kami melayani secara luas bagi kebutuhan industri dan aplikasinya.

Komitmen kami demi kualitas dan perbaikan yang terus-menerus telah membawa kami menjadi salah satu pemimpin *supplier* di dunia, dengan lebih dari 600 unit yang telah digunakan di Amerika Utara dan lebih dari 30.000 unit di penjuru dunia.

Tantangan-tantangan dari pengembangan sistem untuk pelanggan kami bervariasi, dan setiap kasus harus diselesaikan dengan hati-hati. Untuk beberapa pelanggan hanya dibutuhkan *single stand-alone robot*, untuk yang lain jauh lebih kompleks. Untuk kasus ini, Kawasaki Robotics telah memiliki kemampuan mendesain, merakit, mengetest sistem, melakukan secara menyeluruh manajemen proyek dari konsep sampai dengan implementasinya.

## II.2. Spesifikasi Robot Kawasaki FS30L

Robot Kawasaki FS30L merupakan salah satu seri dari Kawasaki F-series yang didesain sebagai sebuah perwujudan dari *art robot*. Jangkauan robot F-series, dengan berat yang ringan dan konstruksi lengan yang kecil sangat cocok untuk beban kecil sampai dengan menengah. Robot ini beroperasi dengan kecepatan yang tinggi dan memiliki akurasi yang tinggi serta *work envelope* yang fleksibel. Bidang pemasangan sangat kecil sangat kontras dengan *work envelope* yang luas.

Kelebihan-kelebihan yang ada pada Robot Kawasaki FS30L ini adalah :

### 1. *Speed Up – High Speed and High Performance*

Kawasaki FS30L mengurangi *cycle time*.

Dengan pengembangan konstruksi lengan yang ringan, *high output* dengan motor kecil serta efisiensi *reduction gear* yang tinggi, kecepatan maksimum robot telah ditingkatkan sebesar 20 % dari robot Kawasaki sebelumnya.

### 2. *Shape up – Small and Compact*

Kawasaki FS30L dapat beroperasi dalam daerah yang sempit.

Penghematan ruang merupakan salah satu keunggulan dari FS30L ini. Dengan desain yang kompak dan kecil, membuat dimensi lengan yang kecil dan



konfigurasi vertikal yang sederhana memungkinkan *lay out* yang efisien untuk peralatan tambahan.

Rumah penyangga sumbu/motor mengurangi area lantai yang dibutuhkan. konfigurasi *wrist* membuat instalasi kabel dan selang menjadi mudah. Robot FS30L berukuran kecil, sederhana dan energi yang digunakan sangat efisien dengan peralatan yang sangat mudah dipasang dan dibongkar.

### 3. Full Line Up – Conversion and Variation

Kawasaki FS30L dapat menyediakan berbagai macam keuntungan.

Robot FS30L merupakan robot *Handling* dengan pemasangan *Floor, Ceilling* atau *shelf mount*. Robot FS30L juga memiliki keuntungan lain yakni sistem pemasangan dengan konstruksi modul sehingga dapat dengan mudah dilakukan penggantian lengan untuk aplikasi lain dengan jangkauan dan beban yang berbeda sesuai dengan *conversion chart*.

Spesifikasi Robot Kawasaki FS30L selengkapnya dapat dilihat pada tabel II.1. di bawah ini.

**Tabel II.1. Spesifikasi Robot Kawasaki FS30L<sup>2</sup>**

Arm Type		Articulated Type	
Degrees of Freedom		6 Axes	
Axis Work	Axis	Max. Stroke	Max. Speed
Envelope and Max. Speed	JT1 : Arm rotation	$\pm 160^\circ$	160°/s
	JT2 : Arm out-in	$+140^\circ \sim -105^\circ$	140°/s
	JT3 : Arm up-down	$+120^\circ \sim -155^\circ$	160°/s
	JT4 : Wrist swivel	$\pm 270^\circ$	240°/s
	JT5 : Wrist bend	$\pm 130^\circ$	240°/s
	JT6 : Wrist twist	$\pm 360^\circ$	340°/s
Max. Reach		2,100 mm (from JT1-JT5)	

<sup>2</sup> [www.khi.co.jp](http://www.khi.co.jp)



<b>Max. Payload</b>		30 kg
<b>Moment</b>	JT4 : Wrist swivel	176.4 N.m
	JT5 : Wrist bend	176.4 N.m
	JT6 : Wrist twist	176.4 N.m
<b>Moment of Inertia</b>	JT4 : Wrist swivel	7.2 kg.m <sup>2</sup>
	JT5 : Wrist bend	7.2 kg.m <sup>2</sup>
	JT6 : Wrist twist	3.3 kg.m <sup>2</sup>
<b>Position Repeatability</b>		±0.15 mm (at Wrist Flange Surface)
<b>Max. linear speed</b>		11,100 mm/s (at Wrist Flange Surface)
<b>Mass</b>		585 kg (Excluding Option)
<b>Body Colour</b>		Munsell 10GY9/1 equivalent
<b>Installation</b>		Floor, Ceiling or Shelf mount
<b>Environmental Condition</b>	Ambient Temperature	0~45°C
	Relative Humidity	35~85 % (No Dew, Nor Frost Allowed)
	Vibration	Less than 0.5 G
	Other	The robot installing place should be free from : <ul style="list-style-type: none"> <li>• inflammable or corrosive liquid or gas</li> <li>• electric noise interference</li> </ul>
<b>Pneumatic Circuit</b>		Double Solenoid Valve : 1 circuit
<b>Degree of Protection</b>		IP65 equivalent

### II.3. Kemampuan operasi Robot Kawasaki FS30L

Robot Kawasaki FS30L merupakan robot yang didesain untuk proses *handling* dengan beban kecil sampai menengah yakni sampai dengan 30 kg. sebagaimana yang tercantum dalam tabel spesifikasi robot FS30L, robot ini mempunyai 6 buah *link* dan sebuah *base* yang bergerak dengan sumbu gerakanya berupa 6 buah *joint*. Setiap *joint*

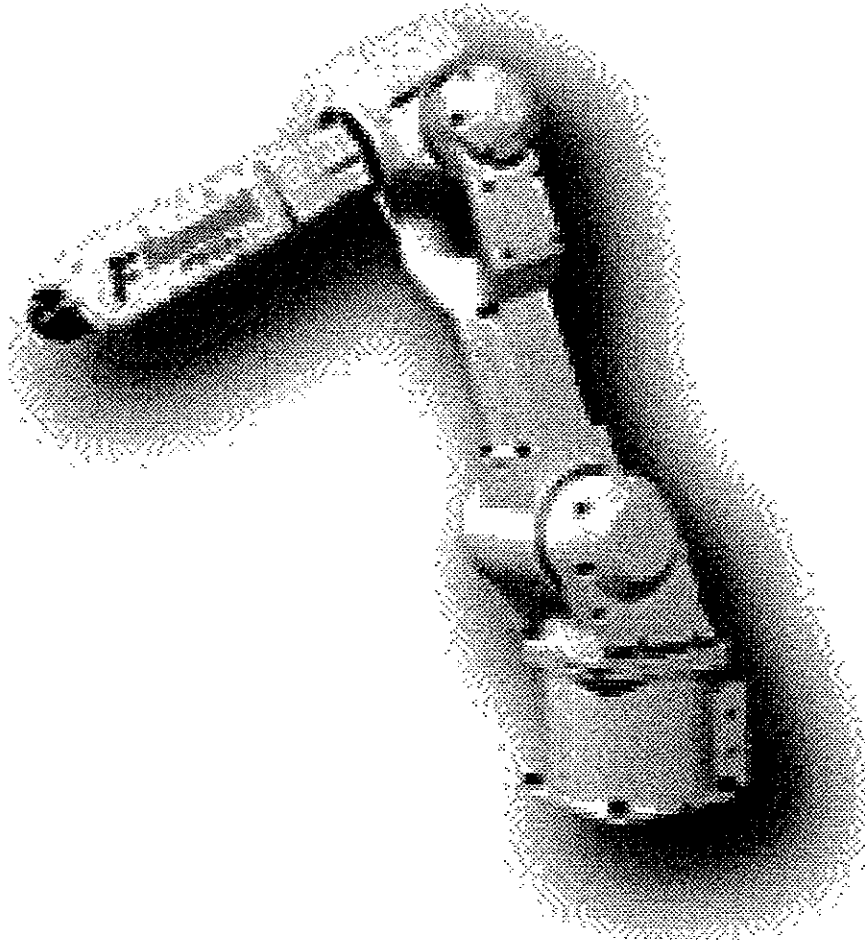


tersebut digerakkan oleh masing-masing sebuah servo motor dengan daya yang berbeda-beda sesuai dengan torsi yang dialami oleh tiap-tiap *joint*. Transmisi yang menjadi penggerak masing-masing lengan berupa transmisi roda gigi kecuali untuk *joint* 5 dan 6 yang menggunakan *belt* dan *pulley* sebagai sistem penggeraknya. Hal ini diambil dengan pertimbangan bahwa momen torsi yang dialami *joint* 5 dan 6 harus diperkecil agar beban yang dapat digunakan menjadi lebih besar, dengan cara menggeser titik berat *link* 5 dan *link* 6 mendekati *joint* 4, yakni motor penggerak kedua *joint* tersebut diletakkan pada *link* 4.

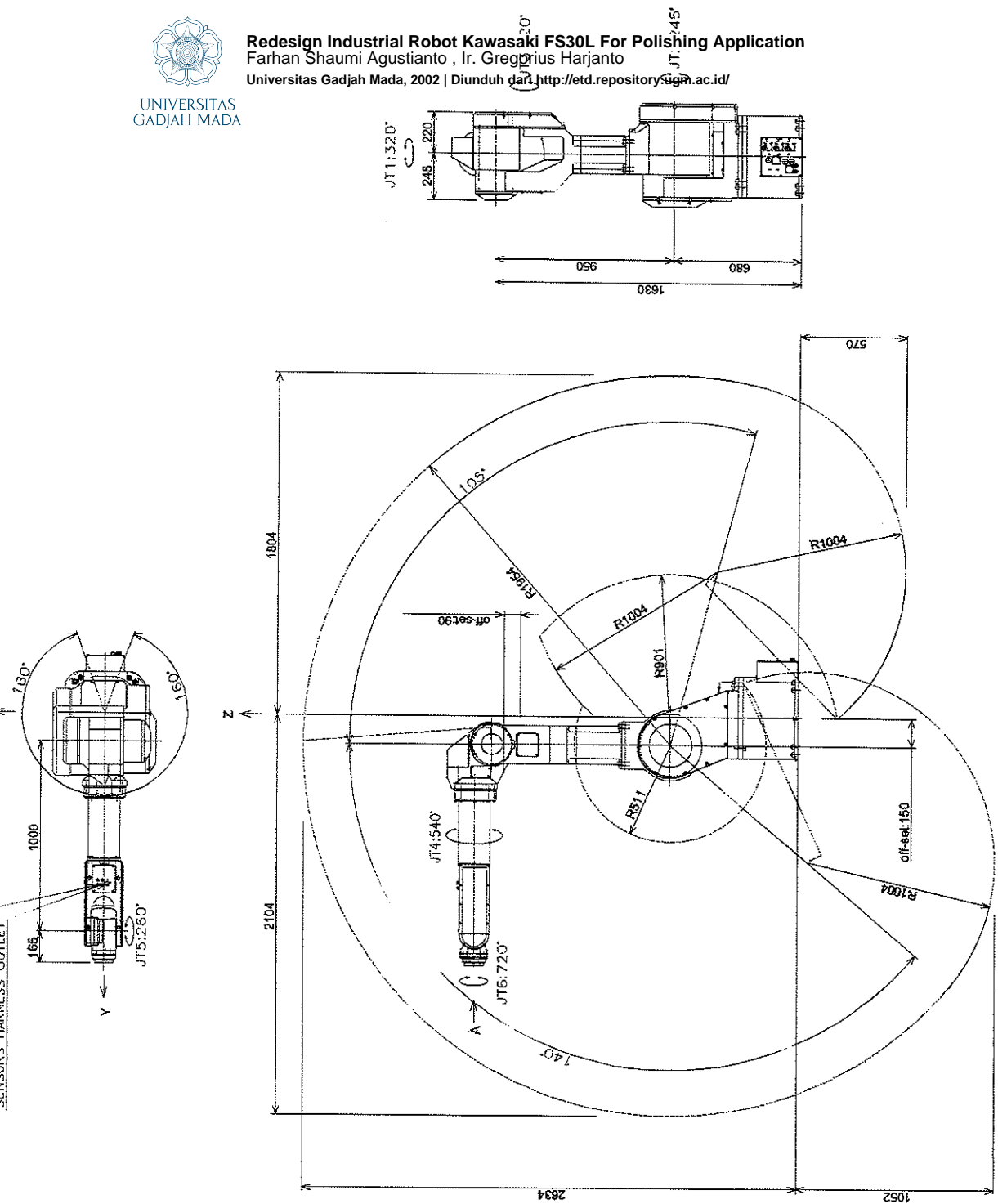
Pada robot Kawasaki FS30L ini semua *joint* merupakan *revolute joint* sehingga gerakan masing-masing *joint* merupakan gerak rotasi dengan sumbu *joint* sebagai sumbu rotasinya. Untuk *joint* 1 (arm rotation) yang menggerakkan *link* 1 dapat berputar sebesar  $320^\circ$  mengelilingi sumbu *base* dengan perincian  $160^\circ$  sebelah atas bidang gambar dan  $160^\circ$  sebelah bawah bidang gambar. Untuk *joint* 2 (arm out-in) yang menggerakkan *link* 2 dapat berputar  $140^\circ$  disebelah kiri sumbu vertikal bidang gambar berlawanan arah jarum jam dan  $105^\circ$  disebelah kanan sumbu vertikal bidang gambar searah jarum jam. Untuk *joint* 3 (arm up-down) yang menggerakkan *link* 3 dapat berputar  $120^\circ$  disebelah kanan sumbu memanjang *link* 3 searah jarum jam dan  $155^\circ$  disebelah kiri sumbu memanjang *link* 3 berlawanan arah jarum jam. Untuk *joint* 4 (wrist swivel) yang menggerakkan *link* 4 secara rotasi sejajar sumbu memanjang *linknya* dapat berputar sebanyak  $540^\circ$  masing-masing  $270^\circ$  di sebelah bawah dan atas bidang gambar. *Joint* 5 (wrist bend) yang menggerakkan *link* 5 dapat berputar sebanyak  $260^\circ$  dengan perincian  $130^\circ$  ke arah atas bidang gambar dan  $130^\circ$  ke arah bawah bidang gambar. Untuk *joint* 6 (wrist twist) yang menggerakkan *link* 6 dapat berputar sebanyak  $720^\circ$  terhadap sumbu memanjang *linknya* dengan masing-masing sebesar  $360^\circ$  ke arah atas dan bawah bidang gambar.

Motor listrik yang menggerakkan masing-masing *link* berupa servomotor yang letaknya berada di tiap-tiap *link* sebelumnya kecuali untuk *link* 6 yang servomotornya berada pada *link* 4.

Dengan kombinasi antara derajat putaran maksimum untuk tiap-tiap *joint* dan panjang masing-masing *link*, Robot Kawasaki FS30L memiliki daerah kerja (work envelope) yang luas yang terlihat pada gambar II.2



**Gambar II.1. Robot Kawasaki FS30L.**



Gambar II.2. Work Envelope Robot Kawasaki FS30L



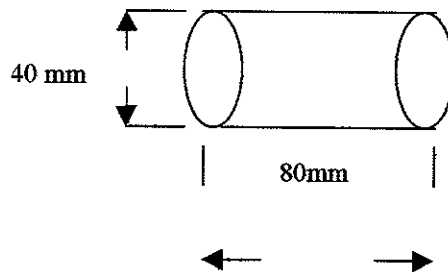
#### II.4. Aplikasi Robot Kawasaki FS30L untuk proses Polishing

Universitas Gadjah Mada, 2009. Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

Robot Kawasaki FS30L pada dasarnya merupakan robot *material handling*, namun dikarenakan kawasaki belum memproduksi robot untuk proses *polishing*, penulis memutuskan untuk menggunakan Robot Kawasaki FS30L sebagai penggantinya dengan pertimbangan-pertimbangan sebagai berikut :

1. Robot Kawasaki FS0L memiliki kemampuan untuk menahan beban sebesar 30 kg, sedangkan untuk standar aplikasi proses *polishing* sendiri dibutuhkan robot yang mampu menahan beban sebesar 22 lb sampai dengan 99 lb yang jika dikonversikan lebih kurang sebesar 10 kg sampai dengan 45 kg. Dengan beban maksimum 30 kg Robot FS30L mampu mengerjakan proses *polishing* untuk kerja kecil sampai dengan menengah.
2. Metode yang dipakai penulis untuk proses *polishing* ini adalah menggunakan metode *Buffing Wheel* dengan lengan robot sebagai pemegang material, sehingga sesuai dengan standar kerja robot FS30L yakni *material handling*.
3. Untuk berbagai bentuk dan ukuran material yang akan *dipolish* dapat dilakukan pemilihan *gripper*, untuk kemudian dipasang pada *end effector* Robot FS30L.

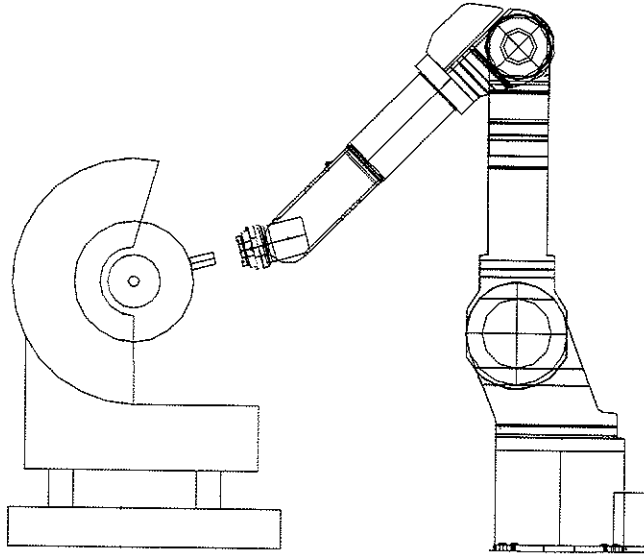
Sebagai contoh material yang akan digunakan oleh penulis adalah sebuah poros baja berbentuk silinder pejal dengan diameter 40 mm, panjang 80 mm dan berat 1 kg. sedangkan bagian yang akan dipoles adalah sisi alas lingkaran yang merupakan bekas pemotongan yang sebelumnya telah dilakukan proses deburring.



Gambar II.3. Dimensi Material yang akan dipolish



Gambar II.4. merupakan gambar sketsa dari proses polishing menggunakan Robot Kawasaki FS30 L dengan material poros baja serta menggunakan *DAN Technology Robotized Systems*<sup>3</sup> untuk baja.



**Gambar II.4. Sketsa Proses Polishing menggunakan Robot Kawasaki FS30L**

*DAN technology Systems* untuk proses *polishing* poros baja ini menggunakan dua buah *Polishing Unit* dan satu Buah *Brightening Unit*, menggunakan Kawasaki FS30L dengan *Payload* 30 Kg.

*Storage System* terdiri dari *container* yang digerakkan oleh *konveyor belt*. Robot akan mengambil material yang akan dipolish pada *tray* yang telah diletakkan pada *loading area* untuk kemudian dikerjakan oleh *Polishing Unit Mod. Jolly* menggunakan *Sisal Brush Wheel* untuk proses *cutting* dengan diameter 400 mm dan tebal 60 mm, untuk selanjutnya dikerjakan oleh *Polishing Unit Mod. S 200* menggunakan *Sisal Brush Wheel* dengan diameter 1000 mm dan tebal 80 mm untuk proses *colouring*. Sedangkan proses yang terakhir untuk *colouring* menggunakan *Brightening Unit Mod. S 200* yang

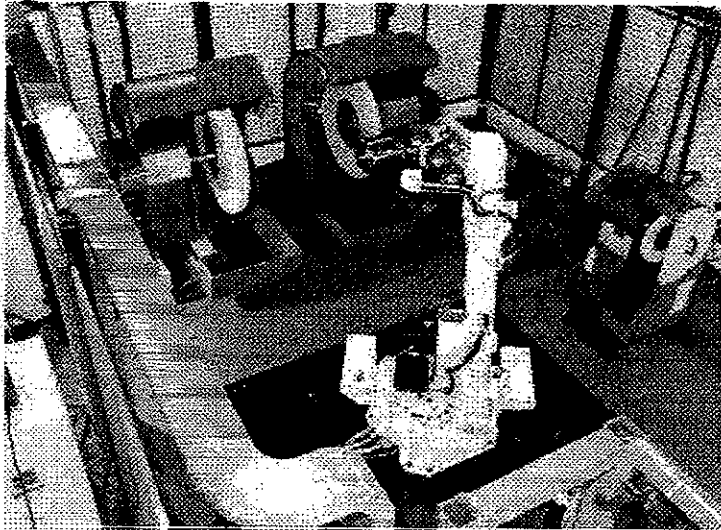
<sup>3</sup> [www.deantoni.it](http://www.deantoni.it)



menggunakan *Cotton Brush Wheel* dengan diameter 100 mm, tebal 80 mm. Setelah dilakukan proses *polishing* material dipindahkan pada *tray unload* yang telah tersedia.

*Compound* yang digunakan pada Proses *Cutting* sesuai dengan tabel III.2 yang dikeluarkan oleh *Mosher Company* yakni *Steel Cutting compound 2330 Hard.Med.dry.* sedangkan untuk *colouring* pertama menggunakan *colouring compound 2318 W.D.Med.hard,Med.dry,* dan yang kedua menggunakan *colouring compound 2222 Med.Hard,dry,Pink,Extra bright lustre.*

Gambar II.5. dibawah ini merupakan contoh aplikasi *Dan Technology Systems* untuk *Polishing* *Steinless steel.*



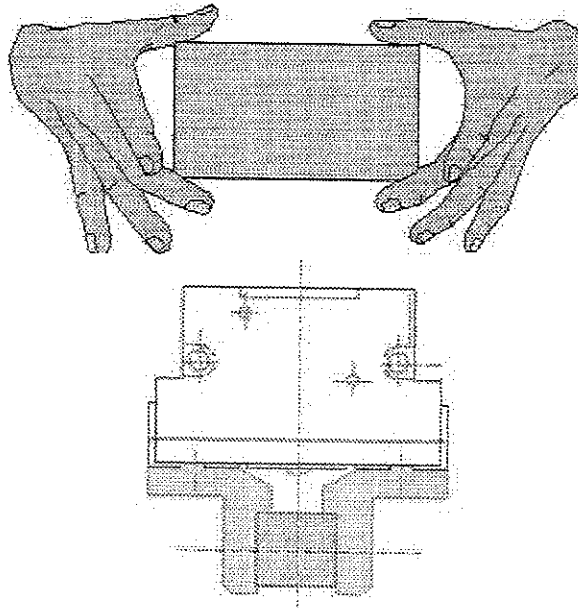
**Gambar II.5. DAN Technology Robotized Systems for Steinless Steel**

## III.A Gripper

### III.A.1 Definisi Gripper

*Gripper* adalah merupakan sebuah alat yang dapat memegang sebuah objek/material yang akan digerakkan atau dipindahkan<sup>13</sup>.

Cara termudah untuk menggambarkan sebuah *gripper* adalah seperti tangan manusia, sebuah *gripper* dapat memegang, mencengkeram, memindahkan serta melepaskan/menjatuhkan sebuah objek/material.



**Gambar III.A.1. Cara kerja gripper pengganti tangan manusia**

Sebuah *gripper* hanya merupakan sebuah bagian dari keseluruhan sistem otomatisasi. Sebuah *gripper* dapat digabungkan pada sebuah robot ataupun menjadi bagian dalam sebuah sistem otomatis.

<sup>13</sup> [www.arobotics.com](http://www.arobotics.com)



Berbagai macam jenis dan ukuran dari *gripper* yang terdapat dalam industri sekarang ini sehingga kita dapat memilih model yang tepat untuk aplikasi tertentu yang kita inginkan.

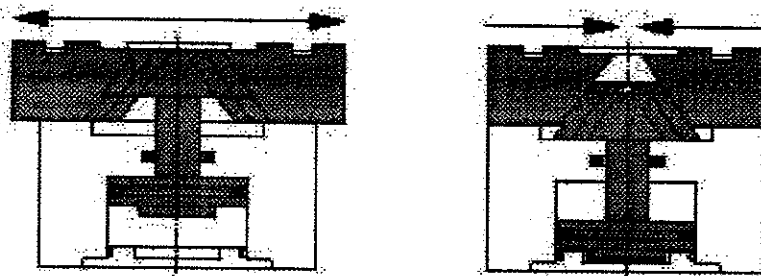
### III.A.2. Klasifikasi Gripper

Prinsip dasar dari *gripper* yang akan digunakan adalah udara bertekanan disuplai ke dalam silinder menekan piston keatas dan kebawah, sesuai dengan desain mekaniknya *jaw gripper* akan bergerak membuka dan menutup.

Terdapat tiga jenis gerak utama dari *gripper jaw*; *parallel*, *angular* dan *toggle*. Prinsip-prinsip operasional dari ketiga gerak tersebut berdasarkan gerak *gripper jaw* relatif terhadap *gripper body*.

#### III.A.2.1. Parallel Gripper

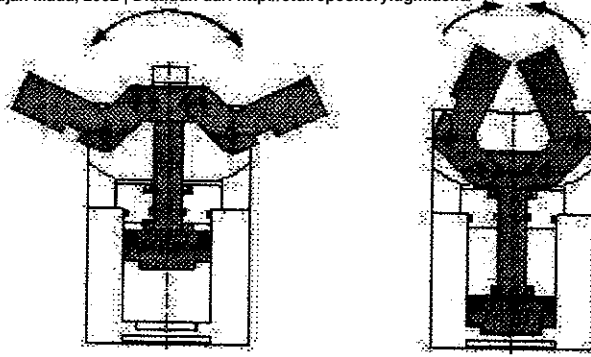
*Gripper jaw* bergerak dalam gerak paralel relatif terhadap *gripper body*. Digunakan dalam sebagian besar aplikasi, *parallel gripper* merupakan tipe yang lebih akurat dibandingkan dengan tipe-tipe yang lain.



Gambar III.A.2. Parallel Gripper

#### III.A.2.2. Angular Gripper

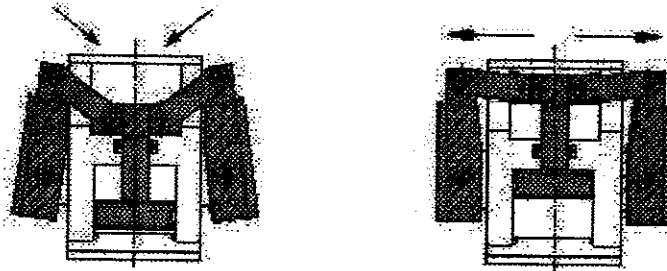
*Gripper jaw* membuka dan menutup mengitari sebuah *central pivot joint*, bergerak dalam lintasan melingkar. *Angular gripper* sering digunakan ketika ruang terbatas tersedia atau ketika *jaw* harus bergerak keatas atau dalam tempat yang sempit.



**Gambar III.A.3. Angular Gripper**

### III.A.2.3. Toogle Gripper

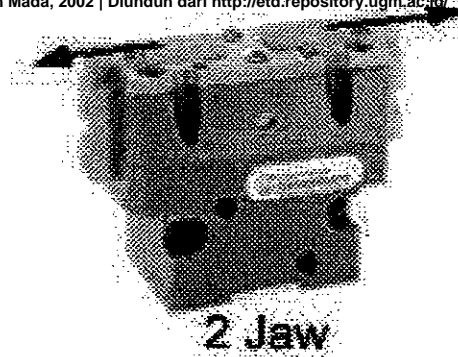
*Pivot joint jaw* bergerak sebagai *over-center toggle lock*, menghasilkan gaya pegang yang tinggi dibandingkan rasio beratnya. Mekanisme ini akan tetap terkunci meskipun jika tekanan udara menghilang.



**Gambar III.4. Toggle Gripper**

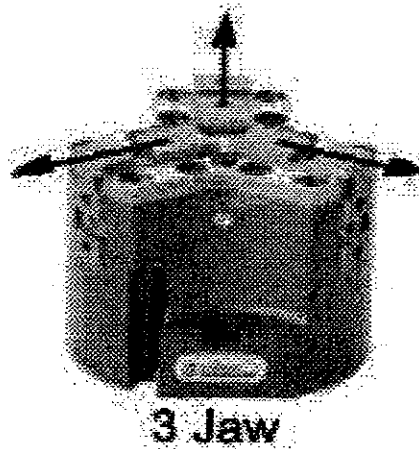
### III.A.2.4. 2 Jaw dan 3 Jaw Gripper

*2 Jaw gripper* merupakan jenis *gripper* yang paling populer, semua *tipe 2 Jaw gripper* (angular, paralel dan toggle) terdapat 2 bagian dari *finger* yang bersentuhan langsung dengan material yang dipegang. *Jaw* bergerak dalam gerak yang sinkron membuka atau menutup dengan sumbu gerak yang terdapat pada *gripper body*.



**Gambar IIIA.5. 2 Jaw Gripper**

*3 Jaw gripper* merupakan salah satu jenis *gripper* yang khusus, semua *3 jaw gripper* (paralel dan toggle) terdapat 3 bagian dari *finger* yang bersentuhan langsung dengan material yang dipegang. *Jaw* bergerak secara sinkron membuka dan menutup dengan sumbu gerak terdapat pada *gripper body*. *3 jaw* menghasilkan lebih banyak bagian yang melakukan kontak dengan material dan lebih akurat posisi *center* dibandingkan dengan tipe *2 jaw*.



**Gambar IIIA.6. 3 Jaw Gripper**

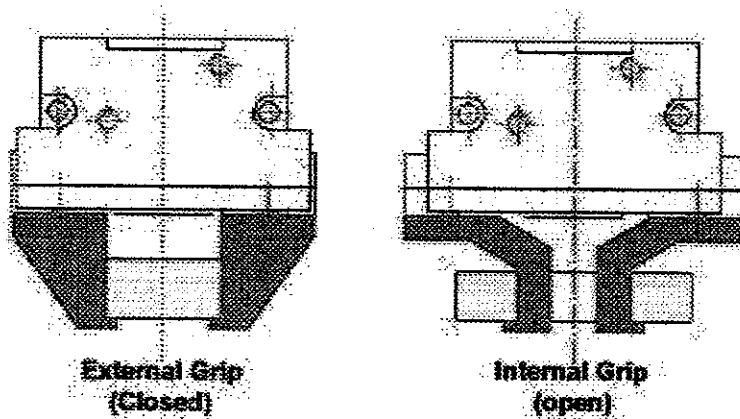
### III.A.2.5. Internal dan External Gripping

*Gripper* yang digunakan dewasa ini ada 2 jenis dalam hal cara memegang material, *external* dan *internal*. Kedua cara tersebut digunakan tergantung pada geometri dari *part* yang akan dipegang, proses yang akan dijalani, bagian tertentu yang akan dipegang dan ruang yang tersedia.



*External gripping* merupakan cara yang paling banyak digunakan untuk memegang material. Gaya menutup *gripper* digunakan untuk memegang benda kerja.

*Internal gripping* digunakan ketika geometri material memungkinkan serta ketika proses yang akan dijalani mengharuskan adanya proses permukaan luar material. Gaya membuka *gripper* digunakan untuk memegang benda kerja.

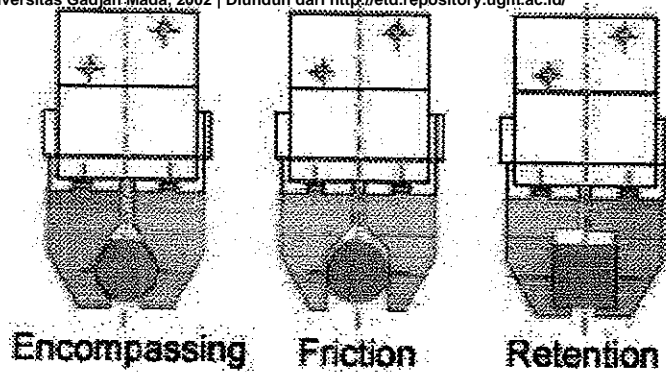


**Gambar III.A.7. External and Internal Gripper**

### III.A.3. Pemilihan Finger

Pemilihan *finger* sangat dibutuhkan dalam setiap aplikasi. *Finger* digunakan untuk membuat kontak dengan material yang akan dipegang. Pertimbangan yang matang dalam hal pemilihan *finger* ini dapat menekan ukuran dan gaya pegang *gripper* itu sendiri untuk aplikasi tertentu yang diinginkan.

*Encompassing* atau *retention finger* lebih baik dikarenakan meningkatkan stabilitas dan juga memperkecil gaya pegang *gripper*. Bagaimanapun juga lintasan *jaw* tambahan dibutuhkan untuk *encompass* atau *retention* sehingga juga menjadi bahan pertimbangan pemilihan *finger gripper*.



**Gambar III.A.8. Encompassing and Retention**

#### III.A.4. Pemilihan Gripper untuk Proses Polishing

Memilih sebuah *gripper* yang tepat untuk aplikasi tertentu bukan merupakan pekerjaan yang mudah, karena terdapat beberapa hubungan yang kompleks dalam memilih dan menghitung dimensi yang tepat.

Beberapa faktor sangat berpengaruh dalam pemilihan *gripper*. Beberapa faktor penting tersebut adalah :

- Ukuran material yang akan dipegang.
- Berat material
- Letak dari pusat gravitasi material
- Gaya jepit yang dibutuhkan
- Kecepatan waktu membuka dan menutup *finger* yang diijinkan.

Disamping faktor-faktor diatas tentunya masih ada faktor lain yang berpengaruh dalam pemilihan *gripper*.

Dewasa ini, untuk memudahkan *costumer* dalam memilih *gripper* yang tepat untuk aplikasi tertentu telah berkembang berbagai macam *software*. Salah satunya yakni *Festo Gripper Selection Program*, yang menangani pemilihan *gripper* dari model *parallel* dan *3-point Gripper*, sampai *radial* dan *angle gripper*, sehingga sangat memudahkan *costumer*.

*Festo Gripper Selection Program* bekerja dalam sistem *windows* yang memberikan *user* langkah-langkah yang jelas. Tahap demi tahap program ini



memerlukan informasi dan nilai variabel tertentu yang berhubungan dengan aplikasi.

Berikut ini adalah prosedur singkat dari program tersebut :

- Mendefinisikan tipe *gripper* yang akan digunakan.
- Memberikan informasi tentang material dan *gripper finger*.
- Memasukkan data tekanan operasional, koefisien gesekan material dan angka keamanan.
- Mendefinisikan arah dan kecepatan gerak *gripper*.

Program ini menghitung beban dari *gripper jaws*, kecepatan menutup dan membuka *finger* berdasarkan berat *gripper finger* atau *moment inersia* massa *gripper fingers*. Kemudian menghitung *gripping force* berdasarkan tekanan dan material *fingers* serta torsi *gripper* yang dibutuhkan yang berhubungan dengan tekanan.

Hasil dari penghitungan ini memberikan tipe-tipe *gripper* yang sesuai dan dapat dicetak sesuai pilihan *user*.

Menggunakan program ini untuk memilih *gripper* yang tepat memiliki banyak keuntungan yakni kecepatan dan ketepatan dalam memilih *gripper* yang hanya dengan menekan beberapa tombol sampai dengan mencetaknya, untuk kemudian dapat dilihat spesifikasi *gripper* dalam katalog Festo maupun dalam *Festo CD ROM*.

Untuk aplikasi *polishing* menggunakan *buffing wheel* dengan *gripper* sebagai pemegang material, penulis menggunakan Program *Gripper Selection Tool – Version 2.02*.

Material yang akan *dipolish* adalah baja berbentuk silinder pejal dengan diameter 40 mm, panjang 80 mm dengan berat 1 kg. bagian yang akan dipolish adalah permukaan alas lingkaran.

Untuk material yang berbentuk silinder, *gripper* yang paling tepat adalah jenis *3-point gripper*, karena untuk material dengan sumbu axial simetrik gripper ini dapat menjepit material pada posisi central dengan gaya minimum baik untuk *internally* maupun *externally*. *Gripper* jenis ini sangat baik dalam hal distribusi gaya jepit sekaligus keamanannya bahkan meskipun ada gaya lateral dari segala arah.



Secara umum kelebihan dari *3-point gripper* ini adalah :

1. Sesuai untuk *axially symmetrical workpieces*
2. Dapat menahan gaya lateral
3. Gerak memusat pada setiap langkah
4. Merupakan *gripper* dengan keamanan tinggi
5. Cocok untuk *internal* atau *external gripping*
6. *Self-centring*
7. Dapat disensor dari paling kurang 2 sisi
8. *Double acting*
9. *Maximum precision*
10. *Retention forces* yang tinggi

Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam memilih *gripper* tersebut adalah sebagai berikut :

1. Memilih tipe *gripper* yang akan digunakan, yaitu *3-point Gripper*.
2. Memberikan informasi tentang material dan *finger* yaitu:
  - Informasi tentang material
    - Jarak  $x$  (center of gravity) material, diukur dari permukaan atas *gripper body* = 50 mm.
    - Berat material,  $m = 1$  kg.
  - *Gripping Direction*, yaitu *external direction*.
  - Informasi tentang *ONE Gripper finger*
    - Jarak  $x$  (center of gravity) *finger*, diukur dari permukaan atas *gripper body* = 45 mm.
    - Berat *finger*,  $m = 0,25$  kg.
    - $X_D$ , panjang *gripper* = 60 mm.
3. Memasukkan data *dynamic movement*
  - *Horizontal gripping with vertikal acceleration* = 0,0111 m/s.
  - *Vertical gripping with vertical acceleration* = 0,0111 m/s.
  - *Vertical gripping with horizontal acceleration* = 0,0111 m/s.



4. Memasukkan data tekanan ruang, koefisien gesekan, dan angka keamanan

Bahan permukaan *finger* = steel, bahan material = steel

- *Enviromental condition, pressure* = 4,9 bar
- Temperatur material = 60<sup>0</sup>
- Angka keamanan = 3

5. Melihat hasil perhitungan untuk kemudian mencetak *form result* dengan menekan tombol “ *print calculation protocol* “.

**Customer data**

**Teknik Mesin UGM Yogyakarta**      **Customer No.:** 0001  
**Telephone** : 0274-902181  
**Fax** : 0274-521673

**Testo 3-point Gripper HGD - 50 - A**

**FESTO part no.** 161 838  
**Gripping direction** External gripping  
**Working pressure** 4.9 bar  
**Device temperature** 60.0 °C  
**Safety factor** 3  
 The centre of gravity does not lie between the gripper fingers

**Information about the object**

**Weight of the object** 1.000 kg  
**Distance 0-line -> centre of gravity** 50 mm


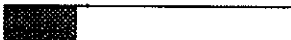



**Information about ONE gripper finger**

**Weight of one gripper finger** 0.250 kg  
**Distance 0-line -> centre of gravity** 45 mm  
**Distance 0-line -> gripping point** 60 mm  
**Friction coefficient  $\mu$  between gripper finger and object** 0.25

**Size and direction of the dynamic movement**

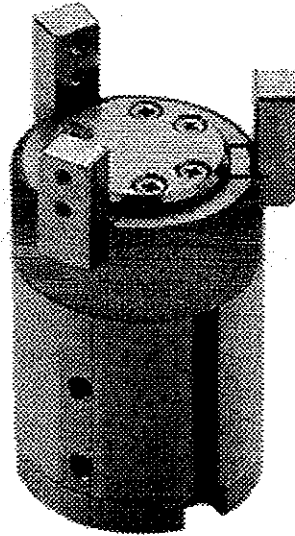
**Highest linear acceleration** -0.01 m/s<sup>2</sup>  
**Vertical gripping with horizontal acceleration**

**Final results (rate of utilization in %)**

**Total weight (object, gripper and finger)** 2.730 kg  
**Intermediate distance of the pressure point** 60.00 mm   
**Static gripping force with friction fit\*** 9.81 N   
**Dynamic gripping force with friction fit\*** 9.82 N   
\*The gripping force is only relevant if a friction fit exists between the fingers and the object. It is greatly reduced if there is a form fit.  
**Dynamic longitudinal force on the gripper fingers** 5.72 N   
**Dynamic transversal force My** 0.00 Nm 

**With flow control valves attainable closing time at 4.9 bar** 0.42 s

The calculated closing time (of the selected fingers for one gripping stroke) can be attained by using flow control valves.  
 The results calculated via this program have the same reliability as the data used for the calculation and do not guarantee any warranty or consequences in contemplation  
 of law. Claims regarding calculation results not achieved or arithmetical errors can not be put forward. As for the rest, our legal liability with regard  
 to aim of damages - for whatever legal ground - in any case is limited to cases of willful or intentional default or gross negligence.



**Gambar III.A.9. 3-point Gripper HGD-50-A**

Spesifikasi dari HGD – 50 A ini dapat dilihat pada tabel III.A.1. di bawah ini.

**Tabel III.A. 1. Spesifikasi 3-pint Gripper HGD-50-A**

<b>Criterion</b>	<b>Feature</b>
Mode of operation	Double acting
Gripper function	3-point
No. of gripper jaw	3
Drive	One cylindrical central
Type of mounting direct	Srew
Sensing type	Magnetic
Design of slot	NA5
Piston nominal size	50 mm
Operating pressure	2 – 8 bar



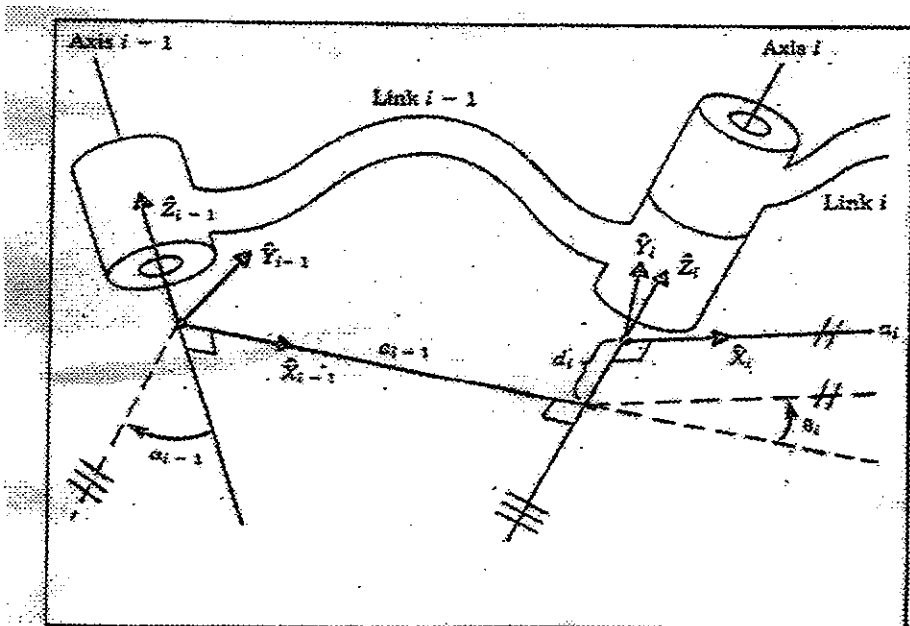
Ambient temperature	5° – 60° C
Air connection type	Female thread
Connector thread	G 1/8
Material of barrel/housing	Alumunium
Material of gripper fingers	Tool steel
Material of cover	POM
CT criterion	Compliant
Product weight	0,985 kg
Nominal gripping force, closing	320 N
Nominal gripping force, opening	350 N
Operating frequency max.	4 Hz
Nominal times opening/closing	10 ms
Air consumption at 6 bar per stroke	0,0675 l
Medium	Compressed air, filtered
Interchangeability	0,2 mm
Repetition accuracy (+/-)	0,02 mm



### III.B. Kinematika dan Dinamika Robot Kawasaki FS30L

Perhitungan kinematik dan dinamik ini merupakan analisis koordinat masing-masing joint maupun *manipulator* terhadap koordinat *base* yang ditetapkan. Hal ini berguna untuk mengontrol sistem penginderaan dari robot dan juga untuk menganalisis besarnya torsi dan gaya yang dialami tiap-tiap *joint* dan *link* untuk keperluan desain dan optimalisasi kinerja dari robot itu sendiri.

Perhitungan yang akan dilakukan selanjutnya adalah dengan menganalisis setiap posisi gerak robot yang sekiranya akan mengalami pembebanan yang besar untuk setiap *joint*-nya, dalam hal ini penulis akan mengambil 5 buah posisi gerakan robot. Koordinat yang dipakai adalah koordinat kartesian, dengan parameter-parameter tertentu yang telah terdefiniskan seperti yang terlihat pada gambar III.B.1. di bawah ini :



Gambar III.B.1. Parameter link dan joint pada Robot

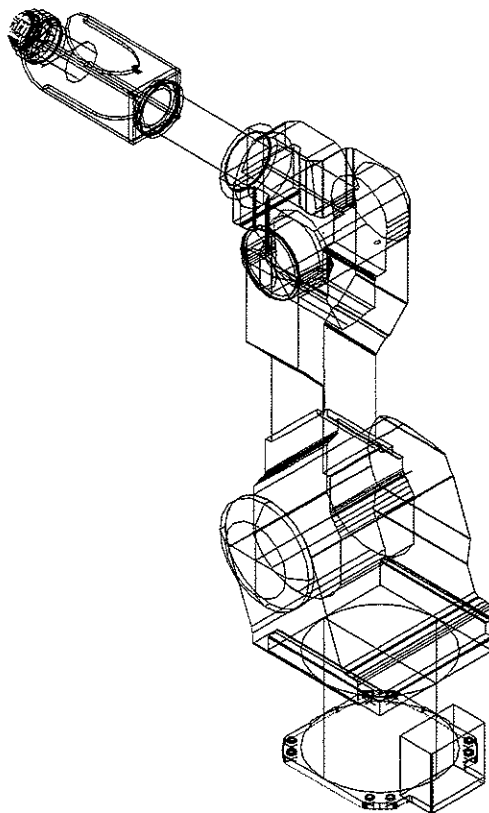
Dalam melakukan perhitungan dinamik robot, penulis menggunakan persamaan gerak Newton-Euler dengan terlebih dahulu menetapkan parameter-parameter yang diperlukan melalui gambar dan dibantu dengan program Auto-Cad untuk menetapkan



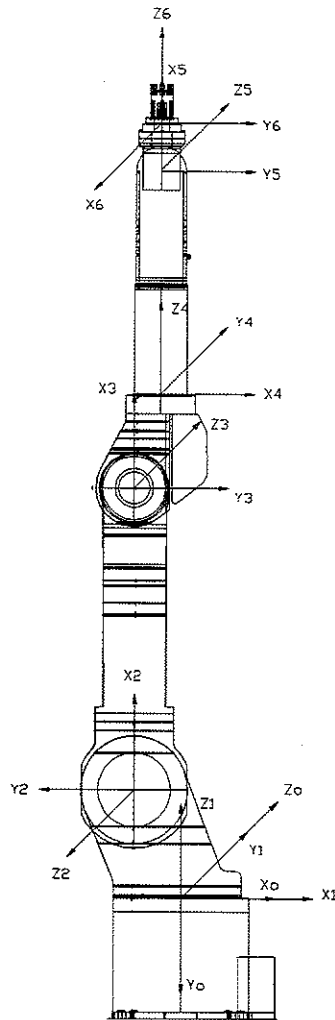
parameter massa *link* dan koordinat pusat massa tiap *link* berdasarkan data yang tertera pada katalog Robot Kawasaki FS30L. perhitungan yang dilakukan selanjutnya menggunakan program *Mathlab* dengan memasukkan persamaan-persamaan yang sudah terdefinisi.

Dikarenakan Robot yang akan dianalisa akan diaplikasikan untuk proses *polishing*, maka penulis menggunakan manipulator berupa *gripper* dan material baja dengan dimensi yang sudah tertera pada gambar. Pada perhitungan dengan adanya manipulator dan material ini akan berpengaruh pada harga pembebanan statis maupun dinamis.

Untuk posisi 1 merupakan posisi istirahat sedangkan posisi 2,3,4,5 dan 6 merupakan posisi ekstrim atau merupakan posisi dimana robot mencapai jangkauan terjauhnya, dengan perkiraan bahwa torsi terbesar yang terjadi pada tiap joint akan dialami untuk posisi-posisi tersebut.



**Gambar III.B.2. Model 3D Robot Kawasaki FS30L**



**Gambar III.B.3. Posisi 1**

<b>i</b>	<b><math>\theta_i</math></b>	<b><math>\alpha_{i-1}</math></b>	<b><math>a_{i-1}</math></b>	<b><math>d_i</math></b>
1	$0^\circ$	$90^\circ$	0	0
2	$90^\circ$	$90^\circ$	-0.15	0
3	0	$-180^\circ$	-0.95	0
4	$-90^\circ$	$90^\circ$	-0.09	-0,09
5	$90^\circ$	$-90^\circ$	0	0
6	$90^\circ$	$90^\circ$	0	0



### POSISI 1

$$\theta := \begin{bmatrix} 0 \\ 90 \\ 0 \\ -90 \\ 90 \\ 90 \end{bmatrix} \cdot \frac{\pi}{180} \quad \alpha := \begin{bmatrix} 90 \\ 90 \\ -180 \\ 90 \\ -90 \\ 90 \end{bmatrix} \cdot \frac{\pi}{180} \quad a := \begin{bmatrix} 0 \\ -0.15 \\ -0.95 \\ -0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad d := \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\theta_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.571 \\ 0 \\ -1.571 \\ 1.571 \\ 1.571 \end{bmatrix} \quad \alpha_i = \begin{bmatrix} 1.571 \\ 1.571 \\ -3.142 \\ 1.571 \\ -1.571 \\ 1.571 \end{bmatrix} \quad a_i = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.15 \\ -0.95 \\ -0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad d_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

### Matrik Transformasi

$$A(i) := \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & a_i \cdot \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & a_i \cdot \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A01 := A(0)

$$A(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A12 := A(1)

$$A(1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -0.15 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A23 := A(2)

$$A(2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -0.95 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



UNIVERSITAS  
 GADJAH MADA

$$A(3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0.09 \\ 0 & 1 & 0 & -0.09 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A45 := A(4)$$

$$A(4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A56 := A(5)$$

$$A(5) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A06 := A01 \cdot A12 \cdot A23 \cdot A34 \cdot A45 \cdot A56$$

$$A06 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0.09 \\ 0 & 1 & 0 & 0.09 \\ 1 & 0 & 0 & -1.1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Letak ujung manipulator (gripper) terhadap base ( 0;0;0.1185)

$$P_0 := A06 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1185 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad P_0 = \begin{bmatrix} 0.09 \\ 0.208 \\ -1.1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

### Matrik Rotasi

$$R(i) := \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) \end{bmatrix}$$

$$R01 := R(0)$$

$$R(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$



$$R(1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R21 := R12^{-1}$$

$$R02 := R01 \cdot R12$$

$$R23 := R(2)$$

$$R(2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$R03 := R02 \cdot R23$$

$$R32 := R23^{-1}$$

$$R34 := R(3)$$

$$R(3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R04 := R03 \cdot R34$$

$$R43 := R34^{-1}$$

$$R45 := R(4)$$

$$R(4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R05 := R04 \cdot R45$$

$$R54 := R45^{-1}$$

$$R56 := R(5)$$

$$R(5) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R06 := R05 \cdot R56$$

$$R65 := R56^{-1}$$

$$R10 := R01^{-1}$$

$$R20 := R02^{-1}$$

$$R30 := R03^{-1}$$

$$R10 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R20 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R30 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



UNIVERSITAS  
 GADJAH MADA

$$R40 := R04^{-1}$$

$$R40 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$R50 := R05^{-1}$$

$$R50 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R60 := R06^{-1}$$

$$R60 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

### Kecepatan Sudut

$$\begin{aligned} \omega0 &:= 0 & \omega1 &:= 2.792 & \omega2 &:= 2.443 & \omega3 &:= 2.792 & z &:= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \omega4 &:= 4.189 & \omega5 &:= 4.189 & \omega6 &:= 5.934 & & & & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R10\omega1 &:= R10 \cdot (\omega0 + z \cdot \omega1) & R20\omega2 &:= R21 \cdot (R10\omega1 + z \cdot \omega2) & R30\omega3 &:= R32 \cdot (R20\omega2 + z \cdot \omega3) \\ R40\omega4 &:= R43 \cdot (R30\omega3 + z \cdot \omega4) & R50\omega5 &:= R54 \cdot (R40\omega4 + z \cdot \omega5) & R60\omega6 &:= R65 \cdot (R50\omega5 + z \cdot \omega6) \end{aligned}$$

$$R10\omega1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.792 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$R20\omega2 = \begin{bmatrix} 2.792 \\ 2.443 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$R30\omega3 = \begin{bmatrix} 2.792 \\ -2.443 \\ -2.792 \end{bmatrix}$$

$$R40\omega4 = \begin{bmatrix} 2.443 \\ 1.397 \\ -2.792 \end{bmatrix}$$

$$R50\omega5 = \begin{bmatrix} 1.397 \\ -1.397 \\ -2.443 \end{bmatrix}$$

$$R60\omega6 = \begin{bmatrix} -1.397 \\ 3.491 \\ 1.397 \end{bmatrix}$$

### Percepatan Sudut

$$\begin{aligned} \ddot{\omega}0 &:= 0 & \ddot{\omega}1 &:= 0.698 & \ddot{\omega}2 &:= 0.611 & \ddot{\omega}3 &:= 0.698 & R00 &:= 1 \\ \ddot{\omega}4 &:= 1.047 & \ddot{\omega}5 &:= 1.047 & \ddot{\omega}6 &:= 1.4835 & & & R00\omega0 &:= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \ddot{\omega}1 &:= 0 & \ddot{\omega}2 &:= 0 & \ddot{\omega}3 &:= 0 & \ddot{\omega}4 &:= 0 & & \\ \ddot{\omega}5 &:= 0 & \ddot{\omega}6 &:= 0 & & & & & & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R10\ddot{\omega}1 &:= R10 \cdot (R00 \cdot \ddot{\omega}0 + z \cdot \ddot{\omega}1 + (R00\omega0 \times z \cdot \omega0)) \\ R20\ddot{\omega}2 &:= R21 \cdot (R10\ddot{\omega}1 + z \cdot \ddot{\omega}2 + R10\omega1 \times z \cdot \omega2) \\ R30\ddot{\omega}3 &:= R32 \cdot (R20\ddot{\omega}2 + z \cdot \ddot{\omega}3 + (R20\omega2) \times z \cdot \omega3) \\ R40\ddot{\omega}4 &:= R43 \cdot (R30\ddot{\omega}3 + z \cdot \ddot{\omega}4 + R30\omega3 \times z \cdot \omega4) \\ R50\ddot{\omega}5 &:= R54 \cdot (R40\ddot{\omega}4 + z \cdot \ddot{\omega}5 + R40\omega4 \times z \cdot \omega5) \\ R60\ddot{\omega}6 &:= R65 \cdot (R50\ddot{\omega}5 + z \cdot \ddot{\omega}6 + R50\omega5 \times z \cdot \omega6) \end{aligned}$$

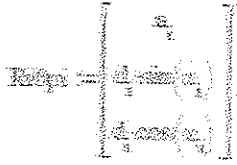
$$R10\ddot{\omega}1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20\ddot{\omega}2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 6.821 \end{bmatrix} \quad R30\ddot{\omega}3 = \begin{bmatrix} 6.821 \\ 7.795 \\ -6.821 \end{bmatrix} \quad R40\ddot{\omega}4 = \begin{bmatrix} 3.9 \\ -6.821 \\ 3.413 \end{bmatrix}$$

$$R50\ddot{\omega}5 = \begin{bmatrix} -17.055 \\ -3.413 \\ -9.752 \end{bmatrix} \quad R60\ddot{\omega}6 = \begin{bmatrix} -11.703 \\ -9.752 \\ -25.344 \end{bmatrix}$$



## Percepatan Linier

$p_i$  : origin frame koordinat terhadap sistem koordinat (i-1)



$$\begin{aligned}
 R10p1 &:= \begin{bmatrix} a_0 \\ d_0 \cdot \sin(\alpha_0) \\ d_0 \cdot \cos(\alpha_0) \end{bmatrix} & R20p2 &:= \begin{bmatrix} a_1 \\ d_1 \cdot \sin(\alpha_1) \\ d_1 \cdot \cos(\alpha_1) \end{bmatrix} & R30p3 &:= \begin{bmatrix} a_2 \\ d_2 \cdot \sin(\alpha_2) \\ d_2 \cdot \cos(\alpha_2) \end{bmatrix} \\
 R40p4 &:= \begin{bmatrix} a_3 \\ d_3 \cdot \sin(\alpha_3) \\ d_3 \cdot \cos(\alpha_3) \end{bmatrix} & R50p5 &:= \begin{bmatrix} a_4 \\ d_4 \cdot \sin(\alpha_4) \\ d_4 \cdot \cos(\alpha_4) \end{bmatrix} & R60p6 &:= \begin{bmatrix} a_5 \\ d_5 \cdot \sin(\alpha_5) \\ d_5 \cdot \cos(\alpha_5) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$R10p1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20p2 = \begin{bmatrix} -0.15 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R30p3 = \begin{bmatrix} -0.95 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R40p4 = \begin{bmatrix} -0.09 \\ -0.09 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R50p5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R60p6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^iR_0 \dot{v}_i = ({}^iR_0 \dot{\omega}_i) \times ({}^iR_0 p_i^*) + ({}^iR_0 \dot{\omega}_i) \times [({}^iR_0 \dot{\omega}_i) \times ({}^iR_0 p_i^*)] + {}^iR_{i-1} \cdot ({}^{i-1}R_0 \dot{v}_{i-1})$$

$$R10vdot1 := (R10dot1 \times R10p1) + R10\omega1 \times (R10\omega1 \times R10p1) + 0$$

$$R20vdot2 := (R20dot2 \times R20p2) + R20\omega2 \times (R20\omega2 \times R20p2) + R21 \cdot R10vdot1$$

$$R30vdot3 := (R30dot3 \times R30p3) + (R30\omega3 \times (R30\omega3 \times R30p3)) + R32 \cdot R20vdot2$$

$$R40vdot4 := (R40dot4 \times R40p4) + R40\omega4 \times (R40\omega4 \times R40p4) + R43 \cdot R30vdot3$$

$$R50vdot5 := (R50dot5 \times R50p5) + (R50\omega5 \times (R50\omega5 \times R50p5)) + R54 \cdot R40vdot4$$

$$R60vdot6 := (R60dot6 \times R60p6) + (R60\omega6 \times (R60\omega6 \times R60p6)) + R65 \cdot R50vdot5$$

$$R10vdot1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20vdot2 = \begin{bmatrix} 0.895 \\ -2.046 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R30vdot3 = \begin{bmatrix} 13.971 \\ 15.006 \\ 14.811 \end{bmatrix} \quad R40vdot4 = \begin{bmatrix} -14.129 \\ 15.435 \\ -13.971 \end{bmatrix}$$

$$R50vdot5 = \begin{bmatrix} 15.435 \\ 13.971 \\ 14.129 \end{bmatrix} \quad R60vdot6 = \begin{bmatrix} 13.971 \\ 14.129 \\ 15.435 \end{bmatrix}$$



### Percepatan Linier di Pusat Massa

$s_i$  : posisi pusat massa link-i terhadap  $(x_i, y_i, z_i)$  dalam meter  
 ditentukan dengan bantuan Autocad

$$s_1 := \begin{bmatrix} 0.0198769 \\ 0.0187241 \\ 0.2792426 \end{bmatrix} \quad s_2 := \begin{bmatrix} 0.3640382 \\ -0.0001744 \\ -0.0247365 \end{bmatrix} \quad s_3 := \begin{bmatrix} 0.0311122 \\ -0.0584025 \\ -0.0003596 \end{bmatrix} \quad s_4 := \begin{bmatrix} -0.0000557 \\ -0.0000192 \\ 0.4155820 \end{bmatrix}$$

$$s_5 := \begin{bmatrix} 0.3206769 \\ 0 \\ -0.1464595 \end{bmatrix} \quad s_6 := \begin{bmatrix} -0.0001711 \\ 0.0000010 \\ 0.0499760 \end{bmatrix}$$

$${}^iR_{oq} = {}^iR_o \omega_{doti} \times {}^iR_{osi} + {}^iR_o \omega_i \times [ {}^iR_{owi} \times {}^iR_{osi} ] + {}^iR_{ovdoti}$$

$$R_{10a1} := R_{10o} \dot{s}_1 \times (R_{10o} \cdot s_1) + R_{10o} \omega_1 \times (R_{10o} \omega_1 \times (R_{10o} \cdot s_1)) + R_{10ovdot1}$$

$$R_{20a2} := R_{20o} \dot{s}_2 \times (R_{20o} \cdot s_2) + R_{20o} \omega_2 \times (R_{20o} \omega_2 \times (R_{20o} \cdot s_2)) + R_{20ovdot2}$$

$$R_{30a3} := R_{30o} \dot{s}_3 \times (R_{30o} \cdot s_3) + R_{30o} \omega_3 \times (R_{30o} \omega_3 \times (R_{30o} \cdot s_3)) + R_{30ovdot3}$$

$$R_{40a4} := R_{40o} \dot{s}_4 \times (R_{40o} \cdot s_4) + R_{40o} \omega_4 \times (R_{40o} \omega_4 \times (R_{40o} \cdot s_4)) + R_{40ovdot4}$$

$$R_{50a5} := R_{50o} \dot{s}_5 \times (R_{50o} \cdot s_5) + R_{50o} \omega_5 \times (R_{50o} \omega_5 \times (R_{50o} \cdot s_5)) + R_{50ovdot5}$$

$$R_{60a6} := R_{60o} \dot{s}_6 \times (R_{60o} \cdot s_6) + R_{60o} \omega_6 \times (R_{60o} \omega_6 \times (R_{60o} \cdot s_6)) + R_{60ovdot6}$$

$$R_{10a1} = \begin{bmatrix} -0.155 \\ 0 \\ 0.146 \end{bmatrix} \quad R_{20a2} = \begin{bmatrix} 1.043 \\ -2.385 \\ -5.01 \end{bmatrix} \quad R_{30a3} = \begin{bmatrix} 13.976 \\ 15.921 \\ 14.448 \end{bmatrix} \quad R_{40a4} = \begin{bmatrix} -15.344 \\ 18.475 \\ -16.804 \end{bmatrix}$$

$$R_{50a5} = \begin{bmatrix} 14.073 \\ 18.478 \\ 14.78 \end{bmatrix} \quad R_{60a6} = \begin{bmatrix} 13.262 \\ 12.621 \\ 15.823 \end{bmatrix}$$

### Persamaan-persamaan Mundur

$m_i$  = massa tiap link ( kg )

$m_t$  = massa total ( data Autocad )

$$m_t := 0.1032072339473 + 0.0724924460640 + 0.0295482470174 + 0.0011111164060 + 0.00112118124$$

$$m_1 := \frac{0.1032072339473}{m_t} \cdot 430.3 \quad m_2 := \frac{0.0724924460640}{m_t} \cdot 430.3 \quad m_3 := \frac{0.0295482470174}{m_t} \cdot 430.3$$

$$m_4 := \frac{0.0011111164060}{m_t} \cdot 430.3 \quad m_5 := \frac{0.0011211812428}{m_t} \cdot 430.3 \quad m_6 := \frac{0.0000827492909}{m_t} \cdot 430.3 + 2.7$$

$$m_1 = 213.96 \quad m_4 = 2.303$$

$$m_2 = 150.285 \quad m_5 = 2.324$$

$$m_3 = 61.257 \quad m_6 = 2.902$$

$$m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 = 433.03$$



**gaya tiap link pengaruh massanya ( $R_{oi}$ )**

UNIVERSITAS  
 GADJAH MADA

$${}^iR_{oi} = m_i \times {}^iR_{oi} \text{ ditulis } Ri0fi = mi \cdot Rioai$$

$$R60f6 := m6 \cdot R60a6$$

$$R50f5 := R56 \cdot R60f6 + m5 \cdot R50a5$$

$$R40f4 := R45 \cdot R50f5 + m4 \cdot R40a4$$

$$R30f3 := R34 \cdot R40f4 + m3 \cdot R30a3$$

$$R20f2 := R23 \cdot R30f3 + m2 \cdot R20a2$$

$$R10f1 := R12 \cdot R20f2 + m1 \cdot R10a1$$

$$R60f6 = \begin{bmatrix} 38.48 \\ 36.621 \\ 45.911 \end{bmatrix} \quad R50f5 = \begin{bmatrix} 78.62 \\ 81.43 \\ 70.975 \end{bmatrix} \quad R40f4 = \begin{bmatrix} -106.32 \\ 121.176 \\ -120.138 \end{bmatrix} \quad R30f3 = \begin{bmatrix} 976.232 \\ 1.082 \cdot 10^3 \\ 1.006 \cdot 10^3 \end{bmatrix}$$

$$R20f2 = \begin{bmatrix} 1.133 \cdot 10^3 \\ -1.44 \cdot 10^3 \\ -1.759 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \quad R10f1 = \begin{bmatrix} -1.792 \cdot 10^3 \\ 1.133 \cdot 10^3 \\ -1.409 \cdot 10^3 \end{bmatrix}$$

**matrik momen inersia link-i terhadap originnya (i) dalam kg.m<sup>2</sup>**

$$I_i = m_i \cdot s_i^2 \text{ ditulis } Ii = mi \cdot si^2$$

$$I1 := m1 \cdot s1^2 \quad I2 := m2 \cdot s2^2 \quad I3 := m3 \cdot s3^2 \quad I4 := m4 \cdot s4^2 \quad I5 := m5 \cdot s5^2 \quad I6 := m6 \cdot s6^2$$

$$I1 = \begin{bmatrix} 0.085 \\ 0.075 \\ 16.684 \end{bmatrix} \quad I2 = \begin{bmatrix} 19.916 \\ 4.571 \cdot 10^{-6} \\ 0.092 \end{bmatrix} \quad I3 = \begin{bmatrix} 0.059 \\ 0.209 \\ 7.921 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix} \quad I4 = \begin{bmatrix} 7.146 \cdot 10^{-9} \\ 8.491 \cdot 10^{-10} \\ 0.398 \end{bmatrix}$$

$$I5 = \begin{bmatrix} 0.239 \\ 0 \\ 0.05 \end{bmatrix} \quad I6 = \begin{bmatrix} 8.494 \cdot 10^{-8} \\ 2.902 \cdot 10^{-12} \\ 7.247 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$$

**matrik momen inersia link-i terhadap base**

$${}^iR_{oi} \cdot {}^iR_i = {}^iR_o \times I_i \times {}^oR_i \text{ ditulis } Ri0IiR0i$$

$$R10I1R01 := \begin{bmatrix} 15.105 & 0 & 0 \\ 0 & 4.71 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad R20I2R02 := \begin{bmatrix} 39.107 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad R30I3R03 := \begin{bmatrix} 0.284 & 0 & 0 \\ 0 & 9.969 \cdot 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 0.592 \end{bmatrix}$$

$$R40I4R04 := \begin{bmatrix} 1.598 \cdot 10^{-7} & 0 & 0 \\ 0 & 3.465 & 0 \\ 0 & 0 & 1.146 \end{bmatrix} \quad R50I5R05 := \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.141 \cdot 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 4.43 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$$R60I6R06 := \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.381 & 0 \\ 0 & 0 & 9.693 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$$



gaya luar eksternal tiap link ( ${}^iR_oF_i$ )

${}^iR_oF_i = m_i \times R_{0a_i}$  ditulis  $R0iFi = mi \cdot R0iai$

$$R10F1 := m1 \cdot R10a1 \quad R30F3 := m3 \cdot R30a3 \quad R50F5 := m5 \cdot R50a5$$

$$R20F2 := m2 \cdot R20a2 \quad R40F4 := m4 \cdot R40a4 \quad R60F6 := m6 \cdot R60a6$$

$$R10F1 = \begin{bmatrix} -33.152 \\ -1.912 \cdot 10^{-1} \\ 31.229 \end{bmatrix} \quad R20F2 = \begin{bmatrix} 156.727 \\ -358.438 \\ -752.992 \end{bmatrix} \quad R30F3 = \begin{bmatrix} 856.094 \\ 975.286 \\ 885.043 \end{bmatrix} \quad R40F4 = \begin{bmatrix} -35.345 \\ 42.556 \\ -38.708 \end{bmatrix}$$

$$R50F5 = \begin{bmatrix} 32.709 \\ 42.949 \\ 34.354 \end{bmatrix} \quad R60F6 = \begin{bmatrix} 38.48 \\ 36.621 \\ 45.911 \end{bmatrix}$$

momen tiap link yang terjadi ( ${}^iR_oN_i$ )

${}^iR_oN_i = {}^iR_{o_i} \cdot R_i \cdot iRowdot_i + iRowdot_i \times ({}^iR_{o_i} \cdot R_i \cdot iRowdot_i)$

$$R10N1 := R10I1R01 \cdot R10\dot{0}1 + R10\dot{0}1 \times (R10I1R01 \cdot R10\dot{0}1)$$

$$R20N2 := R20I2R02 \cdot R20\dot{0}2 + R20\dot{0}2 \times (R20I2R02 \cdot R20\dot{0}2)$$

$$R30N3 := R30I3R03 \cdot R30\dot{0}3 + R30\dot{0}3 \times (R30I3R03 \cdot R30\dot{0}3)$$

$$R40N4 := R40I4R04 \cdot R40\dot{0}4 + R40\dot{0}4 \times (R40I4R04 \cdot R40\dot{0}4)$$

$$R50N5 := R50I5R05 \cdot R50\dot{0}5 + R50\dot{0}5 \times (R50I5R05 \cdot R50\dot{0}5)$$

$$R60N6 := R60I6R06 \cdot R60\dot{0}6 + R60\dot{0}6 \times (R60I6R06 \cdot R60\dot{0}6)$$

$$R10N1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20N2 = \begin{bmatrix} 1.633 \cdot 10^{-14} \\ 1.114 \cdot 10^{-13} \\ 0 \end{bmatrix} \quad R30N3 = \begin{bmatrix} -29.539 \\ 14.329 \\ -19.138 \end{bmatrix} \quad R40N4 = \begin{bmatrix} 53.983 \\ -38.889 \\ -88.273 \end{bmatrix}$$

$$R50N5 = \begin{bmatrix} 0.14 \\ -0.738 \\ -0.031 \end{bmatrix} \quad R60N6 = \begin{bmatrix} -91.776 \\ -6.591 \\ 43.238 \end{bmatrix}$$

$$R60p5 := R56^T \cdot R50p5 \quad R50p4 := R45^T \cdot R40p4 \quad R40p3 := R34^T \cdot R30p3$$

$$R30p2 := R23^T \cdot R20p2 \quad R20p1 := R12^T \cdot R10p1$$

momen ( ${}^iR_o\tau_i$ ) :

${}^iR_o\tau_i = {}^iR_{i+1} \cdot ({}^{i+1}R_o\tau_{i+1} + ({}^{i+1}R_{o_i} \times {}^{i+1}R_{o_i} \cdot \tau_{i+1})) + (({}^iR_{o_i} \cdot p_i + {}^iR_{o_i} \cdot s_i) \times {}^iR_{o_i} \cdot F_i) + {}^iR_oN_i$

$$R60\tau_6 := ((R60p_6 + (R60 \cdot s_6)) \times R60F_6) + R60N_6$$

$$R50\tau_5 := R56 \cdot (R60\tau_6 + ((R60p_5) \times R60F_6)) + ((R50p_5 + (R50 \cdot s_5)) \times R50F_5) + R50N_5$$

$$R40\tau_4 := R45 \cdot (R50\tau_5 + ((R50p_4) \times R50F_5)) + ((R40p_4 + (R40 \cdot s_4)) \times R40F_4) + R40N_4$$

$$R30\tau_3 := R34 \cdot (R40\tau_4 + ((R40p_3) \times R40F_4)) + ((R30p_3 + (R30 \cdot s_3)) \times R30F_3) + R30N_3$$

$$R20\tau_2 := R23 \cdot (R30\tau_3 + ((R30p_2) \times R30F_3)) + ((R20p_2 + (R20 \cdot s_2)) \times R20F_2) + R20N_2$$

$$R10\tau_1 := R12 \cdot (R20\tau_2 + ((R20p_1) \times R20F_2)) + ((R10p_1 + (R10 \cdot s_1)) \times R10F_1) + R10N_1$$



$$R_{60n6} = \begin{bmatrix} -91.782 \\ -8.878 \\ 45.068 \end{bmatrix} \quad R_{50n5} = \begin{bmatrix} 40.177 \\ -81.503 \\ -17.892 \end{bmatrix} \quad R_{40n4} = \begin{bmatrix} 100.371 \\ 5.164 \\ -27.241 \end{bmatrix} \quad R_{30n3} = \begin{bmatrix} -23.643 \\ 843.55 \\ -991.852 \end{bmatrix}$$

$$R_{10n1} = \begin{bmatrix} 1.225 \cdot 10^3 \\ 106.71 \\ -1.06 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \quad R_{20n2} = \begin{bmatrix} 106.71 \\ -1.069 \cdot 10^3 \\ 1.217 \cdot 10^3 \end{bmatrix}$$

Torsi yang diperlukan link-i ( $\tau_i$ ) dalam Nm

$\tau_i = ({}^iR_o n_i)^T * {}^iR_{i-1} * z + b_i q_i$  faktor redaman b diabaikan, maka  $\tau_i = ({}^iR_o n_i)^T * {}^iR_{i-1} * z$

$$\tau_6 := (R_{60n6}^T) \cdot R_{65} \cdot z \quad \tau_5 := (R_{50n5}^T) \cdot R_{54} \cdot z \quad \tau_4 := (R_{40n4}^T) \cdot R_{43} \cdot z$$

$$\tau_3 := (R_{30n3}^T) \cdot R_{32} \cdot z \quad \tau_2 := (R_{20n2}^T) \cdot R_{21} \cdot z \quad \tau_1 := (R_{10n1}^T) \cdot R_{10} \cdot z$$

$$\tau_1 = (106.71)$$

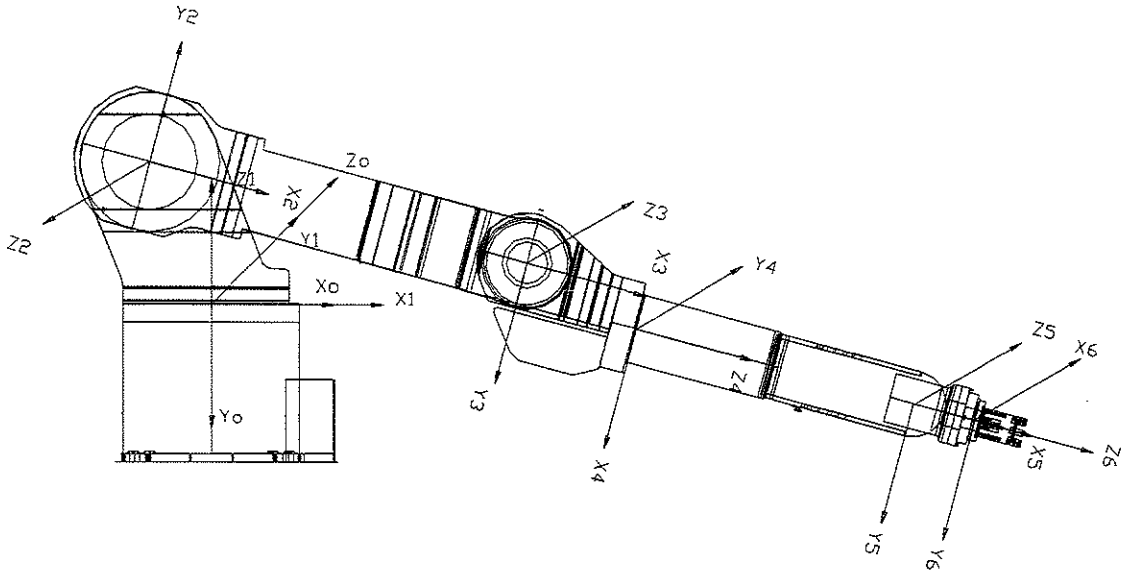
$$\tau_2 = [-1.069 \cdot 10^3]$$

$$\tau_3 = (991.852)$$

$$\tau_4 = (5.164)$$

$$\tau_5 = (81.503)$$

$$\tau_6 = (-8.878)$$



Gambar III.B.4. Posisi 2

$i$	$\theta_i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$
1	$0^\circ$	$90^\circ$	0	0
2	$-15^\circ$	$90^\circ$	0.15	0
3	0	$-180^\circ$	0.95	0
4	$-90^\circ$	$90^\circ$	0.09	0,09
5	$90^\circ$	$-90^\circ$	0	0
6	$90^\circ$	$90^\circ$	0	0



## POSISI 2

UNIVERSITAS  
 GADJAH MADA

i := 0..5

$$\theta := \begin{bmatrix} 0 \\ -15 \\ 0 \\ -90 \\ 90 \\ 90 \end{bmatrix} \cdot \frac{\pi}{180} \quad \alpha := \begin{bmatrix} 90 \\ 90 \\ -180 \\ 90 \\ -90 \\ 90 \end{bmatrix} \cdot \frac{\pi}{180} \quad a := \begin{bmatrix} 0 \\ 0.15 \\ 0.95 \\ 0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad d := \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\theta_i = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.262 \\ 0 \\ -1.571 \\ 1.571 \\ 1.571 \end{bmatrix} \quad \alpha_i = \begin{bmatrix} 1.571 \\ 1.571 \\ -3.142 \\ 1.571 \\ -1.571 \\ 1.571 \end{bmatrix} \quad a_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.15 \\ 0.95 \\ 0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad d_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

### Matrik Transformasi

$$A(i) := \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & a_i \cdot \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & a_i \cdot \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A01 := A(0)

$$A(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A12 := A(1)

$$A(1) = \begin{bmatrix} 0.966 & 0 & -0.259 & 0.145 \\ -0.259 & 0 & -0.966 & -0.039 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A23 := A(2)

$$A(2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0.95 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



$$A(3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -0.09 \\ 0 & 1 & 0 & 0.09 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A45 := A(4)$$

$$A(4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A56 := A(5)$$

$$A(5) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A06 := A01 \cdot A12 \cdot A23 \cdot A34 \cdot A45 \cdot A56$$

$$A06 = \begin{bmatrix} 0.966 & 0 & 0.259 & 1.086 \\ 0 & 1 & 0 & -0.09 \\ -0.259 & 0 & 0.966 & -0.198 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Letak ujung gripper terhadap body ( 0;0;0.1185)

$$Po := A06 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1185 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad Po = \begin{bmatrix} 1.086 \\ 0.028 \\ -0.198 \\ 1 \end{bmatrix}$$

### Matrik Rotasi

$$R(i) := \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) \end{bmatrix}$$

$$R01 := R(0)$$

$$R(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R(1) = \begin{bmatrix} 0.966 & 0 & -0.259 \\ -0.259 & 0 & -0.966 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R21 := R12^{-1}$$

$$R02 := R01 \cdot R12$$

$$R23 := R(2)$$

$$R(2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$R03 := R02 \cdot R23$$

$$R32 := R23^{-1}$$

$$R34 := R(3)$$

$$R(3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R04 := R03 \cdot R34$$

$$R43 := R34^{-1}$$

$$R45 := R(4)$$

$$R(4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R05 := R04 \cdot R45$$

$$R54 := R45^{-1}$$

$$R56 := R(5)$$

$$R(5) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R06 := R05 \cdot R56$$

$$R65 := R56^{-1}$$

$$R10 := R01^{-1}$$

$$R10 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R20 := R02^{-1}$$

$$R20 = \begin{bmatrix} 0.966 & 0 & -0.259 \\ 0 & -1 & 0 \\ -0.259 & 0 & -0.966 \end{bmatrix}$$

$$R30 := R03^{-1}$$

$$R30 = \begin{bmatrix} 0.966 & 0 & -0.259 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0.259 & 0 & 0.966 \end{bmatrix}$$

$$R40 := R04^{-1} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0.259 & 0 & 0.966 \\ -0.966 & 0 & 0.259 \end{bmatrix} \quad R50 := R05^{-1} \begin{bmatrix} 0.259 & 0 & 0.966 \\ 0.966 & 0 & -0.259 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad R60 := R06^{-1} \begin{bmatrix} 0.966 & 0 & -0.259 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0.259 & 0 & 0.966 \end{bmatrix}$$

### Kecepatan Sudut

$$\begin{aligned} \omega_0 &:= 0 & \omega_1 &:= 2.792 & \omega_2 &:= 2.443 & \omega_3 &:= 2.792 \\ \omega_4 &:= 4.189 & \omega_5 &:= 4.189 & \omega_6 &:= 5.934 & z &:= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R10\omega_1 &:= R10 \cdot (\omega_0 + z \cdot \omega_1) & R20\omega_2 &:= R21 \cdot (R10\omega_1 + z \cdot \omega_2) & R30\omega_3 &:= R32 \cdot (R20\omega_2 + z \cdot \omega_3) \\ R40\omega_4 &:= R43 \cdot (R30\omega_3 + z \cdot \omega_4) & R50\omega_5 &:= R54 \cdot (R40\omega_4 + z \cdot \omega_5) & R60\omega_6 &:= R65 \cdot (R50\omega_5 + z \cdot \omega_6) \end{aligned}$$

$$R10\omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.792 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20\omega_2 = \begin{bmatrix} -0.723 \\ 2.443 \\ -2.697 \end{bmatrix} \quad R30\omega_3 = \begin{bmatrix} -0.723 \\ -2.443 \\ -0.095 \end{bmatrix}$$

$$R40\omega_4 = \begin{bmatrix} 2.443 \\ 4.094 \\ 0.723 \end{bmatrix} \quad R50\omega_5 = \begin{bmatrix} 4.094 \\ -4.912 \\ -2.443 \end{bmatrix} \quad R60\omega_6 = \begin{bmatrix} -4.912 \\ 3.491 \\ 4.094 \end{bmatrix}$$

### Percepatan Sudut

$$\begin{aligned} \ddot{\omega}_0 &:= 0 & \ddot{\omega}_1 &:= 0.698 & \ddot{\omega}_2 &:= 0.611 & \ddot{\omega}_3 &:= 0.698 & R00 &:= 1 \\ \ddot{\omega}_4 &:= 1.047 & \ddot{\omega}_5 &:= 1.047 & \ddot{\omega}_6 &:= 1.4835 & R00\omega_0 &:= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \ddot{\omega}_1 &:= 0 & \ddot{\omega}_2 &:= 0 & \ddot{\omega}_3 &:= 0 & \ddot{\omega}_4 &:= 0 \\ \ddot{\omega}_5 &:= 0 & \ddot{\omega}_6 &:= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R10\ddot{\omega}_1 &:= R10 \cdot (R00 \cdot \ddot{\omega}_0 + z \cdot \ddot{\omega}_1 + (R00\omega_0 \times z \cdot \omega_0)) \\ R20\ddot{\omega}_2 &:= R21 \cdot (R10\ddot{\omega}_1 + z \cdot \ddot{\omega}_2 + R10\omega_1 \times z \cdot \omega_2) \\ R30\ddot{\omega}_3 &:= R32 \cdot (R20\ddot{\omega}_2 + z \cdot \ddot{\omega}_3 + (R20\omega_2) \times z \cdot \omega_3) \\ R40\ddot{\omega}_4 &:= R43 \cdot (R30\ddot{\omega}_3 + z \cdot \ddot{\omega}_4 + R30\omega_3 \times z \cdot \omega_4) \\ R50\ddot{\omega}_5 &:= R54 \cdot (R40\ddot{\omega}_4 + z \cdot \ddot{\omega}_5 + R40\omega_4 \times z \cdot \omega_5) \\ R60\ddot{\omega}_6 &:= R65 \cdot (R50\ddot{\omega}_5 + z \cdot \ddot{\omega}_6 + R50\omega_5 \times z \cdot \omega_6) \end{aligned}$$

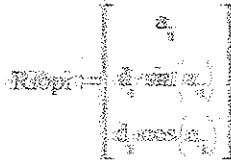
$$R10\ddot{\omega}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20\ddot{\omega}_2 = \begin{bmatrix} 6.588 \\ 0 \\ -1.765 \end{bmatrix} \quad R30\ddot{\omega}_3 = \begin{bmatrix} 13.409 \\ -2.018 \\ 1.765 \end{bmatrix} \quad R40\ddot{\omega}_4 = \begin{bmatrix} -1.01 \\ 1.765 \\ -3.176 \end{bmatrix}$$

$$R50\ddot{\omega}_5 = \begin{bmatrix} -8.468 \\ 3.176 \\ -16.14 \end{bmatrix} \quad R60\ddot{\omega}_6 = \begin{bmatrix} -21.117 \\ -16.14 \\ -37.614 \end{bmatrix}$$



## Percepatan Linier

$p_i$  : origin frame koordinat terhadap sistem koordinat (i-1)



$$R10p1 := \begin{bmatrix} a_0 \\ d_0 \cdot \sin(\alpha_0) \\ d_0 \cdot \cos(\alpha_0) \end{bmatrix} \quad R20p2 := \begin{bmatrix} a_1 \\ d_1 \cdot \sin(\alpha_1) \\ d_1 \cdot \cos(\alpha_1) \end{bmatrix} \quad R30p3 := \begin{bmatrix} a_2 \\ d_2 \cdot \sin(\alpha_2) \\ d_2 \cdot \cos(\alpha_2) \end{bmatrix}$$

$$R40p4 := \begin{bmatrix} a_3 \\ d_3 \cdot \sin(\alpha_3) \\ d_3 \cdot \cos(\alpha_3) \end{bmatrix} \quad R50p5 := \begin{bmatrix} a_4 \\ d_4 \cdot \sin(\alpha_4) \\ d_4 \cdot \cos(\alpha_4) \end{bmatrix} \quad R60p6 := \begin{bmatrix} a_5 \\ d_5 \cdot \sin(\alpha_5) \\ d_5 \cdot \cos(\alpha_5) \end{bmatrix}$$

$$R10p1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20p2 = \begin{bmatrix} 0.15 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R30p3 = \begin{bmatrix} 0.95 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R40p4 = \begin{bmatrix} 0.09 \\ 0.09 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R50p5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R60p6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^i R_0 \dot{v}_i = ({}^i R_0 \dot{\alpha}_i) \times ({}^i R_0 p_i^*) + ({}^i R_0 \alpha_i) \times [({}^i R_0 \alpha_i) \times ({}^i R_0 p_i^*)] + {}^i R_{i-1} \cdot ({}^{i-1} R_0 \dot{v}_{i-1})$$

$$R10vdot1 := (R10odot1 \times R10p1) + R10o1 \times (R10o1 \times R10p1) + 0$$

$$R20vdot2 := (R20odot2 \times R20p2) + R20o2 \times (R20o2 \times R20p2) + R21 \cdot R10vdot1$$

$$R30vdot3 := (R30odot3 \times R30p3) + (R30o3 \times (R30o3 \times R30p3)) + R32 \cdot R20vdot2$$

$$R40vdot4 := (R40odot4 \times R40p4) + R40o4 \times (R40o4 \times R40p4) + R43 \cdot R30vdot3$$

$$R50vdot5 := (R50odot5 \times R50p5) + (R50o5 \times (R50o5 \times R50p5)) + R54 \cdot R40vdot4$$

$$R60vdot6 := (R60odot6 \times R60p6) + (R60o6 \times (R60o6 \times R60p6)) + R65 \cdot R50vdot5$$

$$R10vdot1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20vdot2 = \begin{bmatrix} -1.986 \\ -0.53 \\ 0.292 \end{bmatrix} \quad R30vdot3 = \begin{bmatrix} -7.665 \\ 3.884 \\ 1.69 \end{bmatrix} \quad R40vdot4 = \begin{bmatrix} -4.253 \\ 1.72 \\ 7.84 \end{bmatrix}$$

$$R50vdot5 = \begin{bmatrix} 1.72 \\ -7.84 \\ 4.253 \end{bmatrix} \quad R60vdot6 = \begin{bmatrix} -7.84 \\ 4.253 \\ 1.72 \end{bmatrix}$$



## Percepatan Linier di Pusat Massa

$s_i$  : posisi pusat massa link- $i$  terhadap  $(x_i, y_i, z_i)$  dalam meter  
 ditentukan dengan bantuan Autocad

$$s1 := \begin{bmatrix} 0.0198769 \\ 0.0187241 \\ 0.2792426 \end{bmatrix} \quad s2 := \begin{bmatrix} 0.3640382 \\ -0.0001744 \\ -0.0247365 \end{bmatrix} \quad s3 := \begin{bmatrix} 0.0311122 \\ -0.0584025 \\ -0.0003596 \end{bmatrix} \quad s4 := \begin{bmatrix} -0.0000557 \\ -0.0000192 \\ 0.4155820 \end{bmatrix}$$

$$s5 := \begin{bmatrix} 0.3206769 \\ 0 \\ -0.1464595 \end{bmatrix} \quad s6 := \begin{bmatrix} -0.0001711 \\ 0.0000010 \\ 0.0499760 \end{bmatrix}$$

$${}^iRoa_i = {}^iRo \omega \dot{a}_i \times {}^iRos_i + {}^iRo \omega_i \times [ {}^iRow_i \times {}^iRos_i ] + {}^iRov \dot{a}_i$$

$$R10a1 := R10 \omega \dot{a}_1 \times (R10 \cdot s1) + R10 \omega_1 \times (R10 \omega_1 \times (R10 \cdot s1)) + R10 v \dot{a}_1$$

$$R20a2 := R20 \omega \dot{a}_2 \times (R20 \cdot s2) + R20 \omega_2 \times (R20 \omega_2 \times (R20 \cdot s2)) + R20 v \dot{a}_2$$

$$R30a3 := R30 \omega \dot{a}_3 \times (R30 \cdot s3) + R30 \omega_3 \times (R30 \omega_3 \times (R30 \cdot s3)) + R30 v \dot{a}_3$$

$$R40a4 := R40 \omega \dot{a}_4 \times (R40 \cdot s4) + R40 \omega_4 \times (R40 \omega_4 \times (R20 \cdot s4)) + R40 v \dot{a}_4$$

$$R50a5 := R50 \omega \dot{a}_5 \times (R50 \cdot s5) + R50 \omega_5 \times (R50 \omega_5 \times (R20 \cdot s5)) + R50 v \dot{a}_5$$

$$R60a6 := R60 \omega \dot{a}_6 \times (R60 \cdot s6) + R60 \omega_6 \times (R60 \omega_6 \times (R60 \cdot s6)) + R60 v \dot{a}_6$$

$$R10a1 = \begin{bmatrix} -0.155 \\ 0 \\ 0.146 \end{bmatrix} \quad R20a2 = \begin{bmatrix} -6.864 \\ -0.868 \\ 1.447 \end{bmatrix} \quad R30a3 = \begin{bmatrix} -7.86 \\ 3.92 \\ 0.906 \end{bmatrix} \quad R40a4 = \begin{bmatrix} -1.637 \\ -0.435 \\ 16.368 \end{bmatrix}$$

$$R50a5 = \begin{bmatrix} -3.716 \\ -13.185 \\ -4.373 \end{bmatrix} \quad R60a6 = \begin{bmatrix} -9.209 \\ 6.678 \\ 0.021 \end{bmatrix}$$

## Persamaan-persamaan Mundur

$m_i$  = massa tiap link ( kg )

$m_t$  = massa total ( data Autocad )

$$m_t := 0.1032072339473 + 0.0724924460640 + 0.0295482470174 + 0.0011111164060 + 0.0011211812428$$

$$m1 := \frac{0.1032072339473}{m_t} \cdot 430.3 \quad m2 := \frac{0.0724924460640}{m_t} \cdot 430.3 \quad m3 := \frac{0.0295482470174}{m_t} \cdot 430.3$$

$$m4 := \frac{0.0011111164060}{m_t} \cdot 430.3 \quad m5 := \frac{0.0011211812428}{m_t} \cdot 430.3 \quad m6 := \frac{0.0000827492909}{m_t} \cdot 430.3 + 2.73$$



$$m1 = 215.96$$

$$m2 = 150.185$$

$$m3 = 61.257$$

$$m5 = 2.324$$

$$m6 = 2.902$$

$$m1 + m2 + m3 + m4 + m5 + m6 = 433.03$$

gaya tiap link pengaruh massanya ( ${}^iR_0f_i$ )

$${}^iR_0f_i = m_i \times {}^iR_0a_i \text{ ditulis } Ri0fi = mi * Rioai$$

$$R60f6 := m6 \cdot R60a6$$

$$R50f5 := R56 \cdot R60f6 + m5 \cdot R50a5$$

$$R40f4 := R45 \cdot R50f5 + m4 \cdot R40a4$$

$$R30f3 := R34 \cdot R40f4 + m3 \cdot R30a3$$

$$R20f2 := R23 \cdot R30f3 + m2 \cdot R20a2$$

$$R10f1 := R12 \cdot R20f2 + m1 \cdot R10a1$$

$$R60f6 = \begin{bmatrix} -26.72 \\ 19.377 \\ 0.06 \end{bmatrix} \quad R50f5 = \begin{bmatrix} -8.577 \\ -57.367 \\ 9.214 \end{bmatrix} \quad R40f4 = \begin{bmatrix} -12.985 \\ -9.58 \\ 95.07 \end{bmatrix} \quad R30f3 = \begin{bmatrix} -576.537 \\ 253.095 \\ 45.909 \end{bmatrix}$$

$$R20f2 = \begin{bmatrix} -1.608 \cdot 10^3 \\ -383.605 \\ 171.48 \end{bmatrix} \quad R10f1 = \begin{bmatrix} -1.631 \cdot 10^3 \\ 250.572 \\ -352.376 \end{bmatrix}$$

matrik momen inersia link-i terhadap originnya (i) dalam kg.m<sup>2</sup>

$$I_i = m_i \cdot s_i^2 \text{ ditulis } Ii = mi * si^2$$

$$I1 := m1 \cdot s1^2 \quad I2 := m2 \cdot s2^2 \quad I3 := m3 \cdot s3^2 \quad I4 := m4 \cdot s4^2 \quad I5 := m5 \cdot s5^2 \quad I6 := m6 \cdot s6^2$$

$$I1 = \begin{bmatrix} 0.085 \\ 0.075 \\ 16.684 \end{bmatrix} \quad I2 = \begin{bmatrix} 19.916 \\ 4.571 \cdot 10^{-6} \\ 0.092 \end{bmatrix} \quad I3 = \begin{bmatrix} 0.059 \\ 0.209 \\ 7.921 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix} \quad I4 = \begin{bmatrix} 7.146 \cdot 10^{-9} \\ 8.491 \cdot 10^{-10} \\ 0.398 \end{bmatrix}$$

$$I5 = \begin{bmatrix} 0.239 \\ 0 \\ 0.05 \end{bmatrix} \quad I6 = \begin{bmatrix} 8.494 \cdot 10^{-8} \\ 2.902 \cdot 10^{-12} \\ 7.247 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$$

matrik momen inersia link-i terhadap base

$${}^iR_0I_iR_0I_i = {}^iR_0 \times I_i \times {}^iR_0 \text{ ditulis } Ri0IiR0I$$

$$R10I1R0I1 := \begin{bmatrix} 15.105 & 0 & 0 \\ 0 & 4.71 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad R20I2R0I2 := \begin{bmatrix} 39.107 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad R30I3R0I3 := \begin{bmatrix} 0.284 & 0 & 0 \\ 0 & 9.969 \cdot 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 0.592 \end{bmatrix}$$



$$R40I4R04 := \begin{bmatrix} 1.598 \cdot 10^0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.465 & 0 \\ 0 & 0 & 1.146 \end{bmatrix} \quad R50I5R05 := \begin{bmatrix} 0 & 2.141 \cdot 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 4.43 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$$R60I6R06 := \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.381 & 0 \\ 0 & 0 & 9.693 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$$

gaya luar eksternal tiap link ( ${}^iR_0F_i$ )

${}^iR_0F_i = m_i \times {}^iR_0a_i$  ditulis  $R0iFi = m_i \cdot R0iai$

$$R10F1 := m1 \cdot R10a1 \quad R30F3 := m3 \cdot R30a3 \quad R50F5 := m5 \cdot R50a5$$

$$R20F2 := m2 \cdot R20a2 \quad R40F4 := m4 \cdot R40a4 \quad R60F6 := m6 \cdot R60a6$$

$$R10F1 = \begin{bmatrix} -33.152 \\ -1.912 \cdot 10^{-1} \\ 31.229 \end{bmatrix} \quad R20F2 = \begin{bmatrix} -1.032 \cdot 10^3 \\ -130.51 \\ 217.389 \end{bmatrix} \quad R30F3 = \begin{bmatrix} -481.467 \\ 240.11 \\ 55.489 \end{bmatrix} \quad R40F4 = \begin{bmatrix} -3.771 \\ -1.003 \\ 37.703 \end{bmatrix}$$

$$R50F5 = \begin{bmatrix} -8.636 \\ -30.647 \\ -10.164 \end{bmatrix} \quad R60F6 = \begin{bmatrix} -26.72 \\ 19.377 \\ 0.06 \end{bmatrix}$$

momen tiap link yang terjadi ( ${}^iR_0n_i$ )

${}^iR_0N_i = {}^iR_0I_i \cdot {}^iR_0\dot{R}_i + iRowdoti + iRowdoti \times ({}^iR_0I_i \cdot {}^iR_0\dot{R}_i + iRowdoti)$

$$R10N1 := R10I1R01 \cdot R10\dot{0}dot1 + R10\dot{0}dot1 \times (R10I1R01 \cdot R10\dot{0}dot1)$$

$$R20N2 := R20I2R02 \cdot R20\dot{0}dot2 + R20\dot{0}dot2 \times (R20I2R02 \cdot R20\dot{0}dot2)$$

$$R30N3 := R30I3R03 \cdot R30\dot{0}dot3 + R30\dot{0}dot3 \times (R30I3R03 \cdot R30\dot{0}dot3)$$

$$R40N4 := R40I4R04 \cdot R40\dot{0}dot4 + R40\dot{0}dot4 \times (R40I4R04 \cdot R40\dot{0}dot4)$$

$$R50N5 := R50I5R05 \cdot R50\dot{0}dot5 + R50\dot{0}dot5 \times (R50I5R05 \cdot R50\dot{0}dot5)$$

$$R60N6 := R60I6R06 \cdot R60\dot{0}dot6 + R60\dot{0}dot6 \times (R60I6R06 \cdot R60\dot{0}dot6)$$

$$R10N1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20N2 = \begin{bmatrix} 257.654 \\ -454.854 \\ -2.785 \cdot 10^{-14} \end{bmatrix} \quad R30N3 = \begin{bmatrix} 1.7 \\ -7.291 \\ 8.728 \end{bmatrix} \quad R40N4 = \begin{bmatrix} 13 \\ 2.443 \\ -9.814 \end{bmatrix}$$

$$R50N5 = \begin{bmatrix} -0.216 \\ -0.605 \\ -0.077 \end{bmatrix} \quad R60N6 = \begin{bmatrix} -225.412 \\ -13.848 \\ 129.491 \end{bmatrix}$$



momen ( ${}^iR_o n_i$ ) :

$${}^iR_o n_i = {}^iR_{i+1} * ({}^{i+1}R_o n_{i+1} + ({}^{i+1}R_o p_i \times {}^{i+1}R_o f_{i+1})) + (({}^iR_o p_i + {}^iR_o s_i) \times {}^iR_o F_i) + {}^iR_o N_i$$

$$R60n6 := ((R60p6 + (R60 \cdot s6)) \times R60F6) + R60N6$$

$$R50n5 := R56 \cdot (R60n6 + ((R60p5) \times R60f6)) + ((R50p5 + (R50 \cdot s5)) \times R50F5) + R50N5$$

$$R40n4 := R45 \cdot (R50n5 + ((R50p4) \times R50f5)) + ((R40p4 + (R40 \cdot s4)) \times R40F4) + R40N4$$

$$R30n3 := R34 \cdot (R40n4 + ((R40p3) \times R40f4)) + ((R30p3 + (R30 \cdot s3)) \times R30F3) + R30N3$$

$$R20n2 := R23 \cdot (R30n3 + ((R30p2) \times R30f3)) + ((R20p2 + (R20 \cdot s2)) \times R20F2) + R20N2$$

$$R10n1 := R12 \cdot (R20n2 + ((R20p1) \times R20f2)) + ((R10p1 + (R10 \cdot s1)) \times R10F1) + R10N1$$

$$R60n6 = \begin{bmatrix} -226.347 \\ -15.136 \\ 129.237 \end{bmatrix} \quad R50n5 = \begin{bmatrix} 125.488 \\ -227.546 \\ -10.419 \end{bmatrix} \quad R40n4 = \begin{bmatrix} 47.218 \\ 118.968 \\ 219.552 \end{bmatrix} \quad R30n3 = \begin{bmatrix} -222.943 \\ -103.505 \\ 347.256 \end{bmatrix}$$

$$R10n1 = \begin{bmatrix} 150.237 \\ 429.347 \\ -373.1 \end{bmatrix} \quad R20n2 = \begin{bmatrix} 25.571 \\ -382.357 \\ -451.344 \end{bmatrix}$$

Torsi yang diperlukan link-i ( $\tau_i$ ) dalam Nm

$$\tau_i = ({}^iR_o n_i)^T * {}^iR_{i-1} * z + b_i q_i \quad \text{faktor redaman } b \text{ diabaikan, maka } \tau_i = ({}^iR_o n_i)^T * {}^iR_{i-1} * z$$

$$\tau_6 := (R60n6^T) \cdot R65 \cdot z$$

$$\tau_5 := (R50n5^T) \cdot R54 \cdot z$$

$$\tau_4 := (R40n4^T) \cdot R43 \cdot z$$

$$\tau_3 := (R30n3^T) \cdot R32 \cdot z$$

$$\tau_2 := (R20n2^T) \cdot R21 \cdot z$$

$$\tau_1 := (R10n1^T) \cdot R10 \cdot z$$

$$\tau_1 = (429.347)$$

$$\tau_2 = (-382.357)$$

$$\tau_3 = (-347.256)$$

$$\tau_4 = (118.968)$$

$$\tau_5 = (227.546)$$

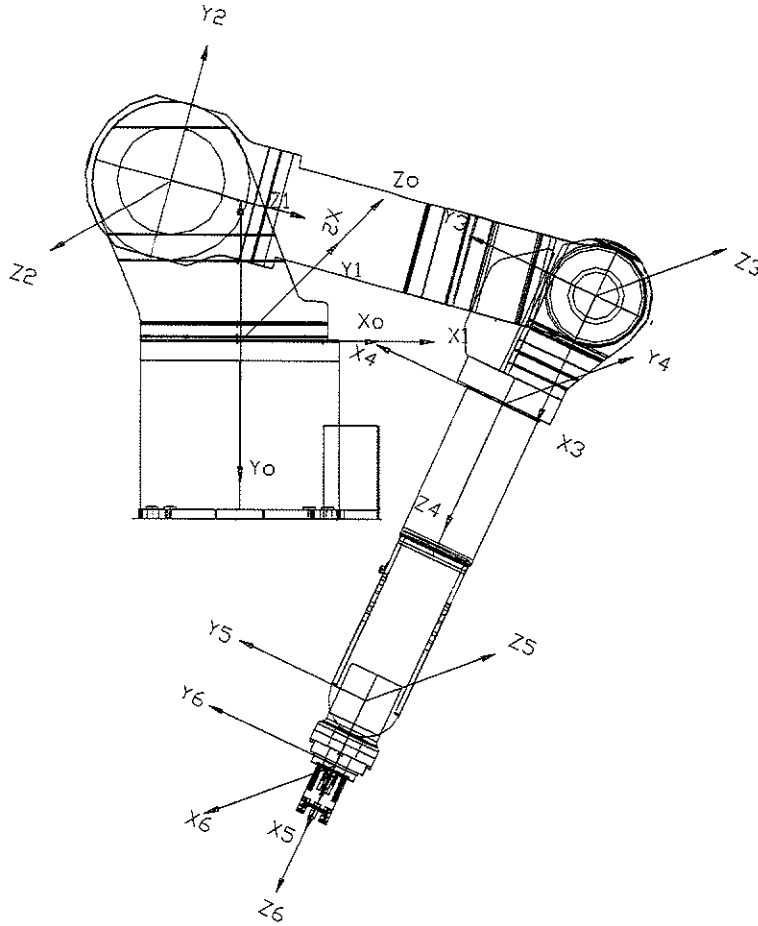
$$\tau_6 = (-15.136)$$



### III.B.3. Posisi 3

Redesign Industrial Robot Kawasaki FS30L For Polishing Application  
Farhan Shaumi Agustianto, Ir. Gregorius Harjanto  
Universitas Gadjah Mada, 2002 | Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

UNIVERSITAS  
GADJAH MADA



**Gambar III.B.5. Posisi 3**

<b>i</b>	<b><math>\theta_i</math></b>	<b><math>\alpha_{i-1}</math></b>	<b><math>a_{i-1}</math></b>	<b><math>d_i</math></b>
1	$0^\circ$	$90^\circ$	0	0
2	$-15^\circ$	$90^\circ$	0.15	0
3	0	$-100^\circ$	0.95	0
4	$-90^\circ$	$90^\circ$	0.09	0,09
5	$90^\circ$	$-90^\circ$	0	0
6	$90^\circ$	$90^\circ$	0	0



UNIVERSITAS  
 GADJAH MADA

$$\begin{aligned}
 \theta_i &:= \begin{bmatrix} 0 \\ -15 \\ 0 \\ -90 \\ 90 \\ 90 \end{bmatrix} \cdot \frac{\pi}{180} & \alpha_i &:= \begin{bmatrix} 90 \\ 90 \\ -100 \\ 90 \\ -90 \\ 90 \end{bmatrix} \cdot \frac{\pi}{180} & a_i &:= \begin{bmatrix} 0 \\ 0.15 \\ 0.95 \\ 0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & d_i &:= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 \theta_i &= \begin{bmatrix} 0 \\ -0.262 \\ 0 \\ -1.571 \\ 1.571 \\ 1.571 \end{bmatrix} & \alpha_i &= \begin{bmatrix} 1.571 \\ 1.571 \\ -1.745 \\ 1.571 \\ -1.571 \\ 1.571 \end{bmatrix} & a_i &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0.15 \\ 0.95 \\ 0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & d_i &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

### Matrik Transformasi

$$A(i) := \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & a_i \cdot \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & a_i \cdot \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A01 := A(0)$$

$$A(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A12 := A(1)$$

$$A(1) = \begin{bmatrix} 0.966 & 0 & -0.259 & 0.145 \\ -0.259 & 0 & -0.966 & -0.039 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A23 := A(2)$$

$$A(2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0.95 \\ 0 & -0.174 & 0.985 & 0 \\ 0 & -0.985 & -0.174 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



$$A(3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -0.09 \\ 0 & 1 & 0 & 0.09 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A45 := A(4)$$

$$A(4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A56 := A(5)$$

$$A(5) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A06 := A01 \cdot A12 \cdot A23 \cdot A34 \cdot A45 \cdot A56$$

$$A06 = \begin{bmatrix} 0.966 & 0.255 & 0.045 & 1.044 \\ 0 & 0.174 & -0.985 & -0.104 \\ -0.259 & 0.951 & 0.168 & -0.355 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Letak ujung gripper terhadap body ( 0;0;0.1185)

$$Po := A06 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1185 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad Po = \begin{bmatrix} 1.074 \\ -0.084 \\ -0.242 \\ 1 \end{bmatrix}$$

### Matrik Rotasi

$$R(i) := \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) \end{bmatrix}$$

$$R01 := R(0)$$

$$R(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$



$$R(1) = \begin{bmatrix} 0.966 & 0 & -0.259 \\ -0.259 & 0 & -0.966 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R21 := R12^{-1}$$

$$R02 := R01 \cdot R12$$

$$R23 := R(2)$$

$$R(2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.174 & 0.985 \\ 0 & -0.985 & -0.174 \end{bmatrix}$$

$$R03 := R02 \cdot R23$$

$$R32 := R23^{-1}$$

$$R34 := R(3)$$

$$R(3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R04 := R03 \cdot R34$$

$$R43 := R34^{-1}$$

$$R45 := R(4)$$

$$R(4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R05 := R04 \cdot R45$$

$$R54 := R45^{-1}$$

$$R56 := R(5)$$

$$R(5) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R06 := R05 \cdot R56$$

$$R65 := R56^{-1}$$

$$R10 := R01^{-1}$$

$$R10 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R20 := R02^{-1}$$

$$R20 = \begin{bmatrix} 0.966 & 0 & -0.259 \\ 0 & -1 & 0 \\ -0.259 & 0 & -0.966 \end{bmatrix}$$

$$R30 := R03^{-1}$$

$$R30 = \begin{bmatrix} 0.966 & 0 & -0.259 \\ 0.255 & 0.174 & 0.951 \\ 0.045 & -0.985 & 0.168 \end{bmatrix}$$

$$R40 := R04 \begin{bmatrix} 0.255 & -0.174 & -0.966 \\ 0.045 & -0.985 & 0 \\ -0.966 & 0 & 0.25 \end{bmatrix} \quad R50 := R05 \begin{bmatrix} 0.045 & -0.985 & 0.168 \\ 0.966 & 0 & -0.259 \\ 0.255 & 0.174 & 0.951 \end{bmatrix} \quad R60 := R06^{-1} \begin{bmatrix} 0.966 & 0 & -0.259 \\ 0.255 & 0.174 & 0.951 \\ 0.045 & -0.985 & 0.168 \end{bmatrix}$$

### Kecepatan Sudut

$$\begin{aligned} \omega_0 &:= 0 & \omega_1 &:= 2.792 & \omega_2 &:= 2.443 & \omega_3 &:= 2.792 \\ \omega_4 &:= 4.189 & \omega_5 &:= 4.189 & \omega_6 &:= 5.934 & z &:= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R10\omega_1 &:= R10 \cdot (\omega_0 + z \cdot \omega_1) & R20\omega_2 &:= R21 \cdot (R10\omega_1 + z \cdot \omega_2) & R30\omega_3 &:= R32 \cdot (R20\omega_2 + z \cdot \omega_3) \\ R40\omega_4 &:= R43 \cdot (R30\omega_3 + z \cdot \omega_4) & R50\omega_5 &:= R54 \cdot (R40\omega_4 + z \cdot \omega_5) & R60\omega_6 &:= R65 \cdot (R50\omega_5 + z \cdot \omega_6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R10\omega_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 2.792 \\ 0 \end{bmatrix} & R20\omega_2 &= \begin{bmatrix} -0.723 \\ 2.443 \\ -2.697 \end{bmatrix} & R30\omega_3 &= \begin{bmatrix} -0.723 \\ -0.518 \\ 2.389 \end{bmatrix} \\ R40\omega_4 &= \begin{bmatrix} 0.518 \\ 6.578 \\ 0.723 \end{bmatrix} & R50\omega_5 &= \begin{bmatrix} 6.578 \\ -4.912 \\ -0.518 \end{bmatrix} & R60\omega_6 &= \begin{bmatrix} -4.912 \\ 5.416 \\ 6.578 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

### Percepatan Sudut

$$\begin{aligned} \ddot{\omega}_0 &:= 0 & \ddot{\omega}_1 &:= 0.698 & \ddot{\omega}_2 &:= 0.611 & \ddot{\omega}_3 &:= 0.698 & R00 &:= 1 \\ \ddot{\omega}_4 &:= 1.047 & \ddot{\omega}_5 &:= 1.047 & \ddot{\omega}_6 &:= 1.4835 & R00\omega_0 &:= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \ddot{\omega}_1 &:= 0 & \ddot{\omega}_2 &:= 0 & \ddot{\omega}_3 &:= 0 & \ddot{\omega}_4 &:= 0 \\ \ddot{\omega}_5 &:= 0 & \ddot{\omega}_6 &:= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R10\ddot{\omega}_1 &:= R10 \cdot (R00 \cdot \ddot{\omega}_0 + z \cdot \ddot{\omega}_1 + (R00\omega_0 \times z \cdot \omega_0)) \\ R20\ddot{\omega}_2 &:= R21 \cdot (R10\ddot{\omega}_1 + z \cdot \ddot{\omega}_2 + R10\omega_1 \times z \cdot \omega_2) \\ R30\ddot{\omega}_3 &:= R32 \cdot (R20\ddot{\omega}_2 + z \cdot \ddot{\omega}_3 + (R20\omega_2) \times z \cdot \omega_3) \\ R40\ddot{\omega}_4 &:= R43 \cdot (R30\ddot{\omega}_3 + z \cdot \ddot{\omega}_4 + R30\omega_3 \times z \cdot \omega_4) \\ R50\ddot{\omega}_5 &:= R54 \cdot (R40\ddot{\omega}_4 + z \cdot \ddot{\omega}_5 + R40\omega_4 \times z \cdot \omega_5) \\ R60\ddot{\omega}_6 &:= R65 \cdot (R50\ddot{\omega}_5 + z \cdot \ddot{\omega}_6 + R50\omega_5 \times z \cdot \omega_6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R10\ddot{\omega}_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & R20\ddot{\omega}_2 &= \begin{bmatrix} 6.588 \\ 0 \\ -1.765 \end{bmatrix} & R30\ddot{\omega}_3 &= \begin{bmatrix} 13.409 \\ 1.388 \\ 2.293 \end{bmatrix} & R40\ddot{\omega}_4 &= \begin{bmatrix} -4.415 \\ 2.293 \\ -11.24 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$${}^0R_5 = \begin{bmatrix} 0.124 & & \\ & 11.24 & \\ & -23.142 & \end{bmatrix} \quad {}^0R_6 = \begin{bmatrix} 27.796 & & \\ & -23.142 & \\ & -29.022 & \end{bmatrix}$$

## Percepatan Linier

$p_i$  : origin frame koordinat terhadap sistem koordinat (i-1)

$${}^{i-1}R_i p_i := \begin{bmatrix} a_i \\ d_i \cdot \sin(\alpha_i) \\ d_i \cdot \cos(\alpha_i) \end{bmatrix}$$

$${}^0R_1 p_1 := \begin{bmatrix} a_0 \\ d_0 \cdot \sin(\alpha_0) \\ d_0 \cdot \cos(\alpha_0) \end{bmatrix} \quad {}^1R_2 p_2 := \begin{bmatrix} a_1 \\ d_1 \cdot \sin(\alpha_1) \\ d_1 \cdot \cos(\alpha_1) \end{bmatrix} \quad {}^2R_3 p_3 := \begin{bmatrix} a_2 \\ d_2 \cdot \sin(\alpha_2) \\ d_2 \cdot \cos(\alpha_2) \end{bmatrix}$$

$${}^3R_4 p_4 := \begin{bmatrix} a_3 \\ d_3 \cdot \sin(\alpha_3) \\ d_3 \cdot \cos(\alpha_3) \end{bmatrix} \quad {}^4R_5 p_5 := \begin{bmatrix} a_4 \\ d_4 \cdot \sin(\alpha_4) \\ d_4 \cdot \cos(\alpha_4) \end{bmatrix} \quad {}^5R_6 p_6 := \begin{bmatrix} a_5 \\ d_5 \cdot \sin(\alpha_5) \\ d_5 \cdot \cos(\alpha_5) \end{bmatrix}$$

$${}^0R_1 p_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad {}^1R_2 p_2 = \begin{bmatrix} 0.15 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad {}^2R_3 p_3 = \begin{bmatrix} 0.95 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad {}^3R_4 p_4 = \begin{bmatrix} 0.09 \\ 0.09 \\ 0 \end{bmatrix} \quad {}^4R_5 p_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad {}^5R_6 p_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^iR_0 \dot{v}_i = ({}^iR_0 \dot{\omega}_i) \times ({}^iR_0 p_i^*) + ({}^iR_0 \dot{\omega}_i) \times [({}^iR_0 \dot{\omega}_i) \times ({}^iR_0 p_i^*)] + {}^{i-1}R_i \cdot ({}^{i-1}R_0 \dot{v}_{i-1})$$

$$R_{10} \dot{v}_1 := (R_{10} \dot{\omega}_1 \times R_{10} p_1) + R_{10} \dot{\omega}_1 \times (R_{10} \dot{\omega}_1 \times R_{10} p_1) + 0$$

$$R_{20} \dot{v}_2 := (R_{20} \dot{\omega}_2 \times R_{20} p_2) + R_{20} \dot{\omega}_2 \times (R_{20} \dot{\omega}_2 \times R_{20} p_2) + R_{21} \cdot R_{10} \dot{v}_1$$

$$R_{30} \dot{v}_3 := (R_{30} \dot{\omega}_3 \times R_{30} p_3) + (R_{30} \dot{\omega}_3 \times (R_{30} \dot{\omega}_3 \times R_{30} p_3)) + R_{32} \cdot R_{20} \dot{v}_2$$

$$R_{40} \dot{v}_4 := (R_{40} \dot{\omega}_4 \times R_{40} p_4) + R_{40} \dot{\omega}_4 \times (R_{40} \dot{\omega}_4 \times R_{40} p_4) + R_{43} \cdot R_{30} \dot{v}_3$$

$$R_{50} \dot{v}_5 := (R_{50} \dot{\omega}_5 \times R_{50} p_5) + (R_{50} \dot{\omega}_5 \times (R_{50} \dot{\omega}_5 \times R_{50} p_5)) + R_{54} \cdot R_{40} \dot{v}_4$$

$$R_{60} \dot{v}_6 := (R_{60} \dot{\omega}_6 \times R_{60} p_6) + (R_{60} \dot{\omega}_6 \times (R_{60} \dot{\omega}_6 \times R_{60} p_6)) + R_{65} \cdot R_{50} \dot{v}_5$$

$$R_{10} \dot{v}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R_{20} \dot{v}_2 = \begin{bmatrix} -1.986 \\ -0.53 \\ 0.292 \end{bmatrix} \quad R_{30} \dot{v}_3 = \begin{bmatrix} -7.665 \\ 2.338 \\ -3.531 \end{bmatrix} \quad R_{40} \dot{v}_4 = \begin{bmatrix} -4.962 \\ -4.307 \\ 7.522 \end{bmatrix}$$

$$R_{50} \dot{v}_5 = \begin{bmatrix} -4.307 \\ -7.522 \\ 4.962 \end{bmatrix} \quad R_{60} \dot{v}_6 = \begin{bmatrix} -7.522 \\ 4.962 \\ -4.307 \end{bmatrix}$$



## Percepatan Linier di Pusat Massa

$s_i$  : posisi pusat massa link- $i$  terhadap  $(x_i, y_i, z_i)$  dalam meter  
ditentukan dengan bantuan Autocad

$$s_1 := \begin{bmatrix} 0.0198769 \\ 0.0187241 \\ 0.2792426 \end{bmatrix} \quad s_2 := \begin{bmatrix} 0.3640382 \\ -0.0001744 \\ -0.0247365 \end{bmatrix} \quad s_3 := \begin{bmatrix} 0.0311122 \\ -0.0584025 \\ -0.0003596 \end{bmatrix} \quad s_4 := \begin{bmatrix} -0.0000557 \\ -0.0000192 \\ 0.4155820 \end{bmatrix}$$

$$s_5 := \begin{bmatrix} 0.3206769 \\ 0 \\ -0.1464595 \end{bmatrix} \quad s_6 := \begin{bmatrix} -0.00000761 \\ 0.0000049 \\ 0.0071273 \end{bmatrix}$$

$${}^iR_{o a_i} = {}^iR_{o \omega_i} \cdot {}^iR_{o s_i} + {}^iR_{o \omega_i} \times [ {}^iR_{o \omega_i} \times {}^iR_{o s_i} ] + {}^iR_{o v_i} \cdot {}^iR_{o s_i}$$

$$R_{10a1} := R_{10\omega1} \times (R_{10s1}) + R_{10\omega1} \times (R_{10\omega1} \times (R_{10s1})) + R_{10v1} \cdot R_{10s1}$$

$$R_{20a2} := R_{20\omega2} \times (R_{20s2}) + R_{20\omega2} \times (R_{20\omega2} \times (R_{20s2})) + R_{20v2} \cdot R_{20s2}$$

$$R_{30a3} := R_{30\omega3} \times (R_{30s3}) + R_{30\omega3} \times (R_{30\omega3} \times (R_{30s3})) + R_{30v3} \cdot R_{30s3}$$

$$R_{40a4} := R_{40\omega4} \times (R_{40s4}) + R_{40\omega4} \times (R_{40\omega4} \times (R_{40s4})) + R_{40v4} \cdot R_{40s4}$$

$$R_{50a5} := R_{50\omega5} \times (R_{50s5}) + R_{50\omega5} \times (R_{50\omega5} \times (R_{50s5})) + R_{50v5} \cdot R_{50s5}$$

$$R_{60a6} := R_{60\omega6} \times (R_{60s6}) + R_{60\omega6} \times (R_{60\omega6} \times (R_{60s6})) + R_{60v6} \cdot R_{60s6}$$

$$R_{10a1} = \begin{bmatrix} -0.155 \\ 0 \\ 0.146 \end{bmatrix} \quad R_{20a2} = \begin{bmatrix} -6.864 \\ -0.868 \\ 1.447 \end{bmatrix} \quad R_{30a3} = \begin{bmatrix} -7.86 \\ 1.573 \\ -3.703 \end{bmatrix} \quad R_{40a4} = \begin{bmatrix} 0.632 \\ -1.664 \\ 25.559 \end{bmatrix}$$

$$R_{50a5} = \begin{bmatrix} -5.585 \\ -18.36 \\ -6.251 \end{bmatrix} \quad R_{60a6} = \begin{bmatrix} -7.437 \\ 4.684 \\ -4.301 \end{bmatrix}$$

## Persamaan-persamaan Mundur

$m_i$  = massa tiap link ( kg )

$m_t$  = massa total ( data Autocad )

$$m_t := 0.1032072339473 + 0.0724924460640 + 0.0295482470174 + 0.0011111164060 + 0.0011211812428$$

$$m_1 := \frac{0.1032072339473}{m_t} \cdot 430.3 \quad m_2 := \frac{0.0724924460640}{m_t} \cdot 430.3 \quad m_3 := \frac{0.0295482470174}{m_t} \cdot 430.3$$

$$m_4 := \frac{0.0011111164060}{m_t} \cdot 430.3 \quad m_5 := \frac{0.0011211812428}{m_t} \cdot 430.3 \quad m_6 := \frac{0.0000827492909}{m_t} \cdot 430.3 + 2.73$$



$$m1 = 213.96$$

$$m4 = 2.315$$

$$m2 = 150.785$$

$$m5 = 2.324$$

$$m3 = 61.257$$

$$m6 = 2.902$$

$$m1 + m2 + m3 + m4 + m5 + m6 = 433.03$$

gaya tiap link pengaruh massanya ( ${}^iR_{0f_i}$ )

$${}^iR_{0f_i} = m_i \times {}^iR_{0a_i} \text{ ditulis } Ri0fi = mi * Rioai$$

$$R60f6 := m6 \cdot R60a6$$

$$R50f5 := R56 \cdot R60f6 + m5 \cdot R50a5$$

$$R40f4 := R45 \cdot R50f5 + m4 \cdot R40a4$$

$$R30f3 := R34 \cdot R40f4 + m3 \cdot R30a3$$

$$R20f2 := R23 \cdot R30f3 + m2 \cdot R20a2$$

$$R10f1 := R12 \cdot R20f2 + m1 \cdot R10a1$$

$$R60f6 = \begin{bmatrix} -21.58 \\ 13.59 \\ -12.48 \end{bmatrix} \quad R50f5 = \begin{bmatrix} -25.47 \\ -64.265 \\ 13.575 \end{bmatrix} \quad R40f4 = \begin{bmatrix} -12.12 \\ -29.303 \\ 123.141 \end{bmatrix} \quad R30f3 = \begin{bmatrix} -604.608 \\ 108.461 \\ -256.129 \end{bmatrix}$$

$$R20f2 = \begin{bmatrix} -1.636 \cdot 10^3 \\ -401.582 \\ 155.052 \end{bmatrix} \quad R10f1 = \begin{bmatrix} -1.654 \cdot 10^3 \\ 273.705 \\ -370.353 \end{bmatrix}$$

matrik momen inersia link-i terhadap originnya (i) dalam kg.m<sup>2</sup>

$$I_i = m_i \cdot s_i^2 \text{ ditulis } Ii = mi * si^2$$

$$I1 := m1 \cdot s1^2 \quad I2 := m2 \cdot s2^2 \quad I3 := m3 \cdot s3^2 \quad I4 := m4 \cdot s4^2 \quad I5 := m5 \cdot s5^2 \quad I6 := m6 \cdot s6^2$$

$$I1 = \begin{bmatrix} 0.085 \\ 0.075 \\ 16.684 \end{bmatrix} \quad I2 = \begin{bmatrix} 19.916 \\ 4.571 \cdot 10^{-6} \\ 0.092 \end{bmatrix} \quad I3 = \begin{bmatrix} 0.059 \\ 0.209 \\ 7.921 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix} \quad I4 = \begin{bmatrix} 7.146 \cdot 10^{-9} \\ 8.491 \cdot 10^{-10} \\ 0.398 \end{bmatrix}$$

$$I5 = \begin{bmatrix} 0.239 \\ 0 \\ 0.05 \end{bmatrix} \quad I6 = \begin{bmatrix} 1.68 \cdot 10^{-10} \\ 6.967 \cdot 10^{-11} \\ 1.474 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}$$

matrik momen inersia link-i terhadap base

$${}^iR_{0i} \circ R_i = {}^iR_{0i} \times I_i \times {}^iR_{0i} \text{ ditulis } Ri0iR0i$$

$$R10i1R01 := \begin{bmatrix} 15.105 & 0 & 0 \\ 0 & 4.71 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad R20i2R02 := \begin{bmatrix} 39.107 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad R30i3R03 := \begin{bmatrix} 0.284 & 0 & 0 \\ 0 & 9.969 \cdot 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 0.592 \end{bmatrix}$$



$$R40I4R04 := \begin{bmatrix} 1.598 \cdot 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 3.465 & 0 \\ 0 & 0 & 1.146 \end{bmatrix} \quad R50I5R05 := \begin{bmatrix} 0 & 2.141 \cdot 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 4.43 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$$R60I6R06 := \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.381 & 0 \\ 0 & 0 & 9.693 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$$

gaya luar eksternal tiap link ( ${}^iR_oF_i$ )

${}^iR_oF_i = m_i \times {}^iR_oa_i$  ditulis  $R0iFi = mi \cdot R0iai$

$$R10F1 := m1 \cdot R10a1 \quad R30F3 := m3 \cdot R30a3 \quad R50F5 := m5 \cdot R50a5$$

$$R20F2 := m2 \cdot R20a2 \quad R40F4 := m4 \cdot R40a4 \quad R60F6 := m6 \cdot R60a6$$

$$R10F1 = \begin{bmatrix} -33.152 \\ -1.912 \cdot 10^{-1} \\ 31.229 \end{bmatrix} \quad R20F2 = \begin{bmatrix} -1.032 \cdot 10^3 \\ -130.51 \\ 217.389 \end{bmatrix} \quad R30F3 = \begin{bmatrix} -481.467 \\ 96.341 \\ -226.827 \end{bmatrix} \quad R40F4 = \begin{bmatrix} 1.455 \\ -3.833 \\ 58.875 \end{bmatrix}$$

$$R50F5 = \begin{bmatrix} -12.99 \\ -42.685 \\ -0.015 \end{bmatrix} \quad R60F6 = \begin{bmatrix} -21.58 \\ 13.59 \\ -12.48 \end{bmatrix}$$

momen tiap link yang terjadi ( ${}^iR_oN_i$ )

${}^iR_oN_i = {}^iR_oI_i \cdot {}^iR_i \cdot {}^iR_{owdot} + {}^iR_{owdot} \times ({}^iR_oI_i \cdot {}^iR_i \cdot {}^iR_{owdot})$

$$R10N1 := R10I1R01 \cdot R10\dot{0}1 + R10\dot{0}1 \times (R10I1R01 \cdot R10\dot{0}1)$$

$$R20N2 := R20I2R02 \cdot R20\dot{0}2 + R20\dot{0}2 \times (R20I2R02 \cdot R20\dot{0}2)$$

$$R30N3 := R30I3R03 \cdot R30\dot{0}3 + R30\dot{0}3 \times (R30I3R03 \cdot R30\dot{0}3)$$

$$R40N4 := R40I4R04 \cdot R40\dot{0}4 + R40\dot{0}4 \times (R40I4R04 \cdot R40\dot{0}4)$$

$$R50N5 := R50I5R05 \cdot R50\dot{0}5 + R50\dot{0}5 \times (R50I5R05 \cdot R50\dot{0}5)$$

$$R60N6 := R60I6R06 \cdot R60\dot{0}6 + R60\dot{0}6 \times (R60I6R06 \cdot R60\dot{0}6)$$

$$R10N1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20N2 = \begin{bmatrix} 257.654 \\ -454.854 \\ -2.785 \cdot 10^{-14} \end{bmatrix} \quad R30N3 = \begin{bmatrix} 5.693 \\ -9.472 \\ -3.929 \end{bmatrix} \quad R40N4 = \begin{bmatrix} 59.779 \\ -48.925 \\ -47.968 \end{bmatrix}$$

$$R50N5 = \begin{bmatrix} -1.097 \\ 0.015 \\ -0.102 \end{bmatrix} \quad R60N6 = \begin{bmatrix} -249.371 \\ -16.636 \\ 244.796 \end{bmatrix}$$



$$R60p5 := R56 \cdot R50p5 \quad R50p4 := R45 \cdot R40p4 \quad R40p3 := R34 \cdot R30p3$$

$$R30p2 := R23 \cdot R20p2 \quad R20p1 := R12 \cdot R10p1$$

momen ( ${}^iR_0n_i$ ) :

$${}^iR_0n_i = {}^iR_{i+1} * ({}^{i+1}R_0n_{i+1} + ({}^{i+1}R_0p_i \times {}^{i+1}R_0f_{i+1})) + (({}^iR_0p_i + {}^iR_0s_i) \times {}^iR_0F_i) + {}^iR_0N_i$$

$$R60n6 := ((R60p6 + (R60s6)) \times R60F6) + R60N6$$

$$R50n5 := R56(R60n6 + ((R60p5) \times R60f6)) + ((R50p5 + (R50s5)) \times R50F5) + R50N5$$

$$R40n4 := R45(R50n5 + ((R50p4) \times R50f5)) + ((R40p4 + (R40s4)) \times R40F4) + R40N4$$

$$R30n3 := R34(R40n4 + ((R40p3) \times R40f4)) + ((R30p3 + (R30s3)) \times R30F3) + R30N3$$

$$R20n2 := R23(R30n3 + ((R30p2) \times R30f3)) + ((R20p2 + (R20s2)) \times R20F2) + R20N2$$

$$R10n1 := R12(R20n2 + ((R20p1) \times R20f2)) + ((R10p1 + (R10s1)) \times R10F1) + R10N1$$

$$R60n6 = \begin{bmatrix} -249.472 \\ -16.685 \\ 244.917 \end{bmatrix} \quad R50n5 = \begin{bmatrix} 241.357 \\ -248.709 \\ -11.838 \end{bmatrix} \quad R40n4 = \begin{bmatrix} 87.217 \\ 204.78 \\ 200.608 \end{bmatrix} \quad R30n3 = \begin{bmatrix} -200.006 \\ 125.136 \\ 305.564 \end{bmatrix}$$

$$R10n1 = \begin{bmatrix} 128.842 \\ 260.879 \\ -194.949 \end{bmatrix} \quad R20n2 = \begin{bmatrix} 48.508 \\ -204.206 \\ -283.08 \end{bmatrix}$$

Torsi yang diperlukan link-i ( $\tau_i$ ) dalam Nm

$$\tau_i = ({}^iR_0n_i)^T * {}^iR_{i-1} * z + b_i q_i \quad \text{faktor redaman } b \text{ diabaikan, maka } \tau_i = ({}^iR_0n_i)^T * {}^iR_{i-1} * z$$

$$\tau_6 := (R60n6^T) \cdot R65z \quad \tau_5 := (R50n5^T) \cdot R54z \quad \tau_4 := (R40n4^T) \cdot R43z$$

$$\tau_3 := (R30n3^T) \cdot R32z \quad \tau_2 := (R20n2^T) \cdot R21z \quad \tau_1 := (R10n1^T) \cdot R10z$$

$$\tau_1 = [ 260.879 ]$$

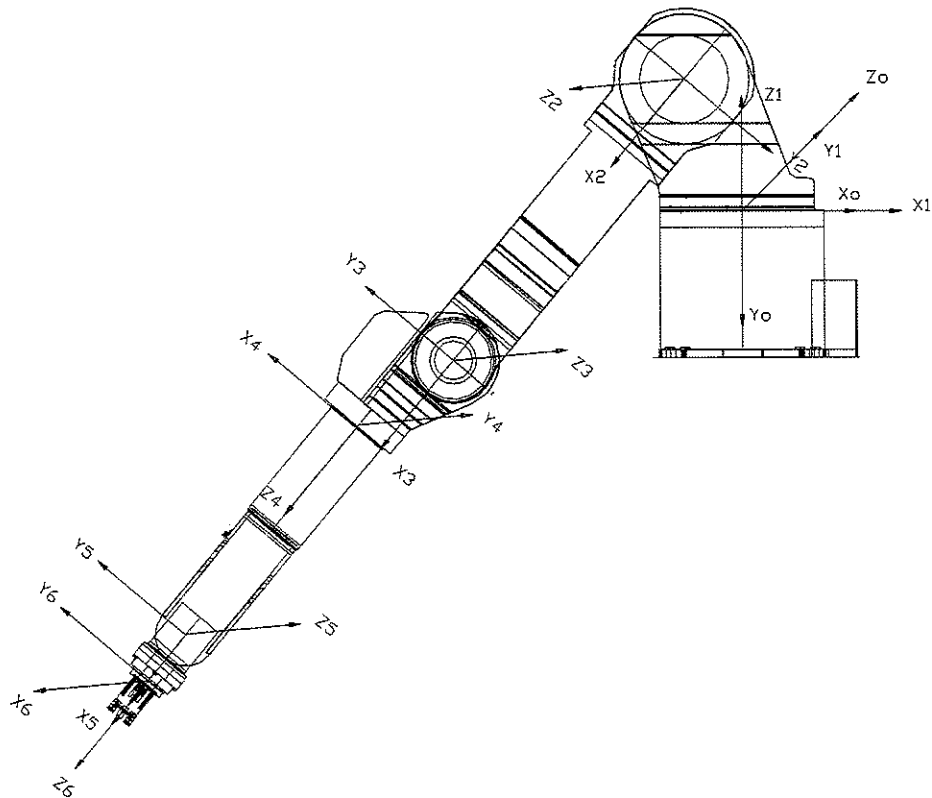
$$\tau_2 = [-204.206 ]$$

$$\tau_3 = (-176.295 )$$

$$\tau_4 = ( 204.78 )$$

$$\tau_5 = ( 248.709 )$$

$$\tau_6 = (-116.685 )$$



**Gambar III.B.6. Posisi 4**

<b>i</b>	<b><math>\theta_i</math></b>	<b><math>\alpha_{i-1}</math></b>	<b><math>a_{i-1}</math></b>	<b><math>d_i</math></b>
1	$0^\circ$	$90^\circ$	0	0
2	$230^\circ$	$90^\circ$	-0.15	0
3	0	$-180^\circ$	-0.95	0
4	$-90^\circ$	$90^\circ$	-0.09	-0,09
5	$90^\circ$	$-90^\circ$	0	0
6	$90^\circ$	$90^\circ$	0	0



$i := 0..5$

$$\theta := \begin{bmatrix} 0 \\ 230 \\ 0 \\ -90 \\ 90 \\ 90 \end{bmatrix} \cdot \frac{\pi}{180} \quad \alpha := \begin{bmatrix} 90 \\ 90 \\ -180 \\ 90 \\ -90 \\ 90 \end{bmatrix} \cdot \frac{\pi}{180} \quad a := \begin{bmatrix} 0 \\ -0.15 \\ -0.95 \\ -0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad d := \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\theta_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 4.014 \\ 0 \\ -1.571 \\ 1.571 \\ 1.571 \end{bmatrix} \quad \alpha_i = \begin{bmatrix} 1.571 \\ 1.571 \\ -3.142 \\ 1.571 \\ -1.571 \\ 1.571 \end{bmatrix} \quad a_i = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.15 \\ -0.95 \\ -0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad d_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

**Matrik Transformasi**

$$A(i) := \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & a_i \cdot \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & a_i \cdot \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A01 := A(0)

$$A(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A12 := A(1)

$$A(1) = \begin{bmatrix} -0.643 & 0 & -0.766 & 0.096 \\ -0.766 & 0 & 0.643 & 0.115 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A23 := A(2)

$$A(2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -0.95 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A(3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0.09 \\ 0 & 1 & 0 & -0.09 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A45 := A(4)

$$A(4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A56 := A(5)

$$A(5) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A06 := A01 · A12 · A23 · A34 · A45 · A56

$$A06 = \begin{bmatrix} -0.643 & 0 & 0.766 & 0.638 \\ 0 & 1 & 0 & 0.09 \\ -0.766 & 0 & -0.643 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Letak ujung gripper terhadap body ( 0;0;0.1185)

$$Po := A06 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1185 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad Po = \begin{bmatrix} 0.638 \\ 0.209 \\ 0.9 \\ 1 \end{bmatrix}$$

### Matrik Rotasi

$$R(i) := \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) \end{bmatrix}$$

R01 := R(0)

$$R(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R(1) = \begin{bmatrix} -0.643 & 0 & -0.766 \\ -0.766 & 0 & 0.643 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R21 := R12^{-1}$$

$$R02 := R01 \cdot R12$$

$$R23 := R(2)$$

$$R(2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$R03 := R02 \cdot R23$$

$$R32 := R23^{-1}$$

$$R34 := R(3)$$

$$R(3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R04 := R03 \cdot R34$$

$$R43 := R34^{-1}$$

$$R45 := R(4)$$

$$R(4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R05 := R04 \cdot R45$$

$$R54 := R45^{-1}$$

$$R56 := R(5)$$

$$R(5) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R06 := R05 \cdot R56$$

$$R65 := R56^{-1}$$

$$R10 := R01^{-1}$$

$$R10 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R20 := R02^{-1}$$

$$R20 = \begin{bmatrix} -0.643 & 0 & -0.766 \\ 0 & -1 & 0 \\ -0.766 & 0 & 0.643 \end{bmatrix}$$

$$R30 := R03^{-1}$$

$$R30 = \begin{bmatrix} -0.643 & 0 & -0.766 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0.766 & 0 & -0.643 \end{bmatrix}$$

$$R40 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \\ 0.766 & 0 & -0.643 \\ 0.643 & 0 & 0.766 \end{bmatrix} \quad R50 = \begin{bmatrix} 0.766 & 0 & -0.643 \\ -0.643 & 0 & -0.766 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad R60 = \begin{bmatrix} -0.643 & 0 & -0.766 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0.766 & 0 & -0.643 \end{bmatrix}$$

### Kecepatan Sudut

$$\begin{aligned} \omega_0 &:= 0 & \omega_1 &:= 2.792 & \omega_2 &:= 2.443 & \omega_3 &:= 2.792 \\ \omega_4 &:= 4.189 & \omega_5 &:= 4.189 & \omega_6 &:= 5.934 & z &:= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$R10\omega_1 := R10 \cdot (\omega_0 + z \cdot \omega_1) \quad R20\omega_2 := R21 \cdot (R10\omega_1 + z \cdot \omega_2) \quad R30\omega_3 := R32 \cdot (R20\omega_2 + z \cdot \omega_3)$$

$$R40\omega_4 := R43 \cdot (R30\omega_3 + z \cdot \omega_4) \quad R50\omega_5 := R54 \cdot (R40\omega_4 + z \cdot \omega_5) \quad R60\omega_6 := R65 \cdot (R50\omega_5 + z \cdot \omega_6)$$

$$R10\omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.792 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20\omega_2 = \begin{bmatrix} -2.139 \\ 2.443 \\ 1.795 \end{bmatrix} \quad R30\omega_3 = \begin{bmatrix} -2.139 \\ -2.443 \\ -4.587 \end{bmatrix}$$

$$R40\omega_4 = \begin{bmatrix} 2.443 \\ -0.398 \\ 2.139 \end{bmatrix} \quad R50\omega_5 = \begin{bmatrix} -0.398 \\ -6.328 \\ -2.443 \end{bmatrix} \quad R60\omega_6 = \begin{bmatrix} -6.328 \\ 3.491 \\ -0.398 \end{bmatrix}$$

### Percepatan Sudut

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_0 &:= 0 & \dot{\omega}_1 &:= 0.698 & \dot{\omega}_2 &:= 0.611 & \dot{\omega}_3 &:= 0.698 & R00 &:= 1 \\ \dot{\omega}_4 &:= 1.047 & \dot{\omega}_5 &:= 1.047 & \dot{\omega}_6 &:= 1.4835 & R00\omega_0 &:= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\ddot{\omega}_1 := 0 \quad \ddot{\omega}_2 := 0 \quad \ddot{\omega}_3 := 0 \quad \ddot{\omega}_4 := 0$$

$$\ddot{\omega}_5 := 0 \quad \ddot{\omega}_6 := 0$$

$$R10\dot{\omega}_1 := R10 \cdot (R00 \cdot \dot{\omega}_0 + z \cdot \ddot{\omega}_1 + (R00\omega_0 \times z \cdot \omega_0))$$

$$R20\dot{\omega}_2 := R21 \cdot (R10\dot{\omega}_1 + z \cdot \ddot{\omega}_2 + R10\omega_1 \times z \cdot \omega_2)$$

$$R30\dot{\omega}_3 := R32 \cdot (R20\dot{\omega}_2 + z \cdot \ddot{\omega}_3 + (R20\omega_2) \times z \cdot \omega_3)$$

$$R40\dot{\omega}_4 := R43 \cdot (R30\dot{\omega}_3 + z \cdot \ddot{\omega}_4 + R30\omega_3 \times z \cdot \omega_4)$$

$$R50\dot{\omega}_5 := R54 \cdot (R40\dot{\omega}_4 + z \cdot \ddot{\omega}_5 + R40\omega_4 \times z \cdot \omega_5)$$

$$R60\dot{\omega}_6 := R65 \cdot (R50\dot{\omega}_5 + z \cdot \ddot{\omega}_6 + R50\omega_5 \times z \cdot \omega_6)$$

$$R10\dot{\omega}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20\dot{\omega}_2 = \begin{bmatrix} -4.384 \\ 0 \\ -5.225 \end{bmatrix} \quad R30\dot{\omega}_3 = \begin{bmatrix} 2.436 \\ -5.972 \\ 5.225 \end{bmatrix} \quad R40\dot{\omega}_4 = \begin{bmatrix} -2.988 \\ 5.225 \\ 7.797 \end{bmatrix}$$



$$R50\dot{0}5 = \begin{bmatrix} -5.009 \\ -7.797 \\ 4.654 \end{bmatrix} \quad R60\dot{0}6 = \begin{bmatrix} -5.438 \\ 4.654 \\ -42.558 \end{bmatrix}$$

### Percepatan Linier

$p_i$  : origin frame koordinat terhadap sistem koordinat (i-1)

$$Ri0pi := \begin{bmatrix} a_i \\ d_i \cdot \sin(\alpha_i) \\ d_i \cdot \cos(\alpha_i) \end{bmatrix}$$

$$R10p1 := \begin{bmatrix} a_0 \\ d_0 \cdot \sin(\alpha_0) \\ d_0 \cdot \cos(\alpha_0) \\ a_3 \\ d_3 \cdot \sin(\alpha_3) \\ d_3 \cdot \cos(\alpha_3) \end{bmatrix}$$

$$R20p2 := \begin{bmatrix} a_1 \\ d_1 \cdot \sin(\alpha_1) \\ d_1 \cdot \cos(\alpha_1) \\ a_4 \\ d_4 \cdot \sin(\alpha_4) \\ d_4 \cdot \cos(\alpha_4) \end{bmatrix}$$

$$R30p3 := \begin{bmatrix} a_2 \\ d_2 \cdot \sin(\alpha_2) \\ d_2 \cdot \cos(\alpha_2) \\ a_5 \\ d_5 \cdot \sin(\alpha_5) \\ d_5 \cdot \cos(\alpha_5) \end{bmatrix}$$

$$R10p1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20p2 = \begin{bmatrix} -0.15 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R30p3 = \begin{bmatrix} -0.95 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R40p4 = \begin{bmatrix} -0.09 \\ -0.09 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R50p5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R60p6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^iR_0\dot{v}_i = ({}^iR_0\dot{\omega}_i) \times ({}^iR_0p_i^*) + ({}^iR_0\dot{\omega}_i) \times [({}^iR_0\dot{\omega}_i) \times ({}^iR_0p_i^*)] + {}^iR_{i-1} \cdot ({}^{i-1}R_0\dot{v}_{i-1})$$

$$R10vdot1 := (R10\dot{0}1 \times R10p1) + R10\dot{0}1 \times (R10\dot{0}1 \times R10p1) + 0$$

$$R20vdot2 := (R20\dot{0}2 \times R20p2) + R20\dot{0}2 \times (R20\dot{0}2 \times R20p2) + R21 \cdot R10vdot1$$

$$R30vdot3 := (R30\dot{0}3 \times R30p3) + (R30\dot{0}3 \times (R30\dot{0}3 \times R30p3)) + R32 \cdot R20vdot2$$

$$R40vdot4 := (R40\dot{0}4 \times R40p4) + R40\dot{0}4 \times (R40\dot{0}4 \times R40p4) + R43 \cdot R30vdot3$$

$$R50vdot5 := (R50\dot{0}5 \times R50p5) + (R50\dot{0}5 \times (R50\dot{0}5 \times R50p5)) + R54 \cdot R40vdot4$$

$$R60vdot6 := (R60\dot{0}6 \times R60p6) + (R60\dot{0}6 \times (R60\dot{0}6 \times R60p6)) + R65 \cdot R50vdot5$$

$$R10vdot1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20vdot2 = \begin{bmatrix} 1.378 \\ 1.568 \\ 0.576 \end{bmatrix} \quad R30vdot3 = \begin{bmatrix} 27.034 \\ -11.495 \\ -15.568 \end{bmatrix} \quad R40vdot4 = \begin{bmatrix} 12.71 \\ -15.234 \\ -26.688 \end{bmatrix}$$

$$R50vdot5 = \begin{bmatrix} -15.234 \\ 26.688 \\ -12.71 \end{bmatrix} \quad R60vdot6 = \begin{bmatrix} 26.688 \\ -12.71 \\ -15.234 \end{bmatrix}$$



### Percepatan Linier di Pusat Massa

$s_i$  : posisi pusat massa link- $i$  terhadap  $(x_i, y_i, z_i)$  dalam meter  
 ditentukan dengan bantuan Autocad

$$s1 := \begin{bmatrix} 0.0198769 \\ 0.0187241 \\ 0.2792426 \end{bmatrix} \quad s2 := \begin{bmatrix} 0.3640382 \\ -0.0001744 \\ -0.0247365 \end{bmatrix} \quad s3 := \begin{bmatrix} 0.0311122 \\ -0.0584025 \\ -0.0003596 \end{bmatrix} \quad s4 := \begin{bmatrix} -0.0000557 \\ -0.0000192 \\ 0.4155820 \end{bmatrix}$$

$$s5 := \begin{bmatrix} 0.3206769 \\ 0 \\ -0.1464595 \end{bmatrix} \quad s6 := \begin{bmatrix} -0.0001711 \\ 0.0000010 \\ 0.0499760 \end{bmatrix}$$

$${}^iR_{oa} = {}^iR_o \omega \dot{t} \times {}^iR_{osi} + {}^iR_o \omega_i \times [ {}^iR_{owi} \times {}^iR_{osi} ] + {}^iR_{ov} \dot{t}$$

$$R10a1 := R10\omega \dot{t} \times (R10 \cdot s1) + R10\omega1 \times (R10\omega1 \times (R10 \cdot s1)) + R10v \dot{t}1$$

$$R20a2 := R20\omega \dot{t} \times (R20 \cdot s2) + R20\omega2 \times (R20\omega2 \times (R20 \cdot s2)) + R20v \dot{t}2$$

$$R30a3 := R30\omega \dot{t} \times (R30 \cdot s3) + R30\omega3 \times (R30\omega3 \times (R30 \cdot s3)) + R30v \dot{t}3$$

$$R40a4 := R40\omega \dot{t} \times (R40 \cdot s4) + R40\omega4 \times (R40\omega4 \times (R20 \cdot s4)) + R40v \dot{t}4$$

$$R50a5 := R50\omega \dot{t} \times (R50 \cdot s5) + R50\omega5 \times (R50\omega5 \times (R20 \cdot s5)) + R50v \dot{t}5$$

$$R60a6 := R60\omega \dot{t} \times (R60 \cdot s6) + R60\omega6 \times (R60\omega6 \times (R60 \cdot s6)) + R60v \dot{t}6$$

$$R10a1 = \begin{bmatrix} -0.155 \\ 0 \\ 0.146 \end{bmatrix} \quad R20a2 = \begin{bmatrix} 4.486 \\ 1.229 \\ 4.509 \end{bmatrix} \quad R30a3 = \begin{bmatrix} 27.659 \\ -9.994 \\ -16.93 \end{bmatrix} \quad R40a4 = \begin{bmatrix} 19.359 \\ -14.201 \\ -29.19 \end{bmatrix}$$

$$R50a5 = \begin{bmatrix} -10.805 \\ 22.78 \\ 3.978 \end{bmatrix} \quad R60a6 = \begin{bmatrix} 26.928 \\ -10.373 \\ -13.467 \end{bmatrix}$$

### Persamaan-persamaan Mundur

$m_i$  = massa tiap link ( kg )  
 $m_t$  = massa total ( data Autocad )

$$m_t := 0.1032072339473 + 0.0724924460640 + 0.0295482470174 + 0.0011111164060 + 0.0011211812428$$

$$m1 := \frac{0.1032072339473}{m_t} \cdot 430.3 \quad m2 := \frac{0.0724924460640}{m_t} \cdot 430.3 \quad m3 := \frac{0.0295482470174}{m_t} \cdot 430.3$$

$$m4 := \frac{0.0011111164060}{m_t} \cdot 430.3 \quad m5 := \frac{0.0011211812428}{m_t} \cdot 430.3 \quad m6 := \frac{0.0000827492909}{m_t} \cdot 430.3 + 2.73$$



$m1 = 213.96$   
 $m2 = 150.285$   
 $m3 = 61.257$

$m4 = 2.303$   
 $m5 = 2.324$   
 $m6 = 2.902$

$m1 + m2 + m3 + m4 + m5 + m6 = 433.03$

gaya tiap link pengaruh massanya ( ${}^iR_0f_i$ )

${}^iR_0f_i = m_i \times {}^iR_0a_i$  ditulis  $Ri0fi = mi \cdot Rioai$

$R60f6 := m6 \cdot R60a6$

$R50f5 := R56 \cdot R60f6 + m5 \cdot R50a5$

$R40f4 := R45 \cdot R50f5 + m4 \cdot R40a4$

$R30f3 := R34 \cdot R40f4 + m3 \cdot R30a3$

$R20f2 := R23 \cdot R30f3 + m2 \cdot R20a2$

$R10f1 := R12 \cdot R20f2 + m1 \cdot R10a1$

$$R60f6 = \begin{bmatrix} 78.134 \\ -30.098 \\ -39.076 \end{bmatrix} \quad R50f5 = \begin{bmatrix} -64.19 \\ 131.083 \\ -20.852 \end{bmatrix} \quad R40f4 = \begin{bmatrix} 65.445 \\ -96.901 \\ -198.322 \end{bmatrix} \quad R30f3 = \begin{bmatrix} 1.893 \cdot 10^3 \\ -677.673 \\ -1.134 \cdot 10^3 \end{bmatrix}$$

$$R20f2 = \begin{bmatrix} 2.567 \cdot 10^3 \\ 862.33 \\ 1.812 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \quad R10f1 = \begin{bmatrix} -3.071 \cdot 10^3 \\ -801.8 \\ 893.559 \end{bmatrix}$$

matrik momen inersia link-i terhadap originnya (i) dalam kg.m<sup>2</sup>

$I_i = m_i \cdot s_i^2$  ditulis  $li = mi \cdot si^2$

$I1 := m1 \cdot s1^2 \quad I2 := m2 \cdot s2^2 \quad I3 := m3 \cdot s3^2 \quad I4 := m4 \cdot s4^2 \quad I5 := m5 \cdot s5^2 \quad I6 := m6 \cdot s6^2$

$$I1 = \begin{bmatrix} 0.085 \\ 0.075 \\ 16.684 \end{bmatrix} \quad I2 = \begin{bmatrix} 19.916 \\ 4.571 \cdot 10^{-6} \\ 0.092 \end{bmatrix} \quad I3 = \begin{bmatrix} 0.059 \\ 0.209 \\ 7.921 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix} \quad I4 = \begin{bmatrix} 7.146 \cdot 10^{-9} \\ 8.491 \cdot 10^{-10} \\ 0.398 \end{bmatrix}$$

$$I5 = \begin{bmatrix} 0.239 \\ 0 \\ 0.05 \end{bmatrix} \quad I6 = \begin{bmatrix} 8.494 \cdot 10^{-8} \\ 2.902 \cdot 10^{-12} \\ 7.247 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$$

matrik momen inersia link-i terhadap base

${}^iR_0I_iR_0i = {}^iR_0 \times I_i \times {}^0R_i$  ditulis  $Ri0IiR0i$

$$R10I1R01 := \begin{bmatrix} 15.105 & 0 & 0 \\ 0 & 4.71 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad R20I2R02 := \begin{bmatrix} 39.107 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad R30I3R03 := \begin{bmatrix} 0.284 & 0 & 0 \\ 0 & 9.969 \cdot 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 0.592 \end{bmatrix}$$



UNIVERSITAS  
 GADJAH MADA

$$R40I4R04 := \begin{bmatrix} 1.598 \cdot 10^{-7} & 0 & 0 \\ 0 & 3.465 & 0 \\ 0 & 0 & 1.146 \end{bmatrix} \quad R50I5R05 := \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.141 \cdot 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 4.43 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$$R60I6R06 := \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.381 & 0 \\ 0 & 0 & 9.693 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$$

gaya luar eksternal tiap link ( ${}^iR_oF_i$ )

${}^iR_oF_i = m_i \times {}^iR_oa_i$  ditulis  $R0iFi = mi \cdot R0iai$

$$R10F1 := m1 \cdot R10a1 \quad R30F3 := m3 \cdot R30a3 \quad R50F5 := m5 \cdot R50a5$$

$$R20F2 := m2 \cdot R20a2 \quad R40F4 := m4 \cdot R40a4 \quad R60F6 := m6 \cdot R60a6$$

$$R10F1 = \begin{bmatrix} -33.152 \\ -1.912 \cdot 10^{-1} \\ 31.229 \end{bmatrix} \quad R20F2 = \begin{bmatrix} 674.164 \\ 184.657 \\ 677.615 \end{bmatrix} \quad R30F3 = \begin{bmatrix} 1.694 \cdot 10^3 \\ -612.228 \\ -1.037 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \quad R40F4 = \begin{bmatrix} 44.593 \\ -32.71 \\ -67.239 \end{bmatrix}$$

$$R50F5 = \begin{bmatrix} -25.114 \\ 52.949 \\ 9.246 \end{bmatrix} \quad R60F6 = \begin{bmatrix} 78.134 \\ -30.098 \\ -39.076 \end{bmatrix}$$

momen tiap link yang terjadi ( ${}^iR_o\tau_i$ )

${}^iR_o\tau_i = {}^iR_oI_i \cdot {}^iR_o\ddot{r}_i + iRowdoti \times ({}^iR_oI_i \cdot {}^iR_o\dot{r}_i + iRowdoti)$

$$R10N1 := R10I1R01 \cdot R10\ddot{r}01 + R10\dot{r}01 \times (R10I1R01 \cdot R10\dot{r}01)$$

$$R20N2 := R20I2R02 \cdot R20\ddot{r}02 + R20\dot{r}02 \times (R20I2R02 \cdot R20\dot{r}02)$$

$$R30N3 := R30I3R03 \cdot R30\ddot{r}03 + R30\dot{r}03 \times (R30I3R03 \cdot R30\dot{r}03)$$

$$R40N4 := R40I4R04 \cdot R40\ddot{r}04 + R40\dot{r}04 \times (R40I4R04 \cdot R40\dot{r}04)$$

$$R50N5 := R50I5R05 \cdot R50\ddot{r}05 + R50\dot{r}05 \times (R50I5R05 \cdot R50\dot{r}05)$$

$$R60N6 := R60I6R06 \cdot R60\ddot{r}06 + R60\dot{r}06 \times (R60I6R06 \cdot R60\dot{r}06)$$

$$R10N1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20N2 = \begin{bmatrix} -171.459 \\ 895.888 \\ 5.486 \cdot 10^{-14} \end{bmatrix} \quad R30N3 = \begin{bmatrix} -17.779 \\ -3.921 \\ 7.225 \end{bmatrix} \quad R40N4 = \begin{bmatrix} -94.479 \\ 44.804 \\ -45.16 \end{bmatrix}$$

$$R50N5 = \begin{bmatrix} -0.153 \\ 0.102 \\ 0.029 \end{bmatrix} \quad R60N6 = \begin{bmatrix} 73.538 \\ -0.47 \\ -10.054 \end{bmatrix}$$



$$R_{60p5} := R_{56}^T \cdot R_{50p5}$$

$$R_{50p4} := R_{45}^T \cdot R_{40p4}$$

$$R_{40p3} := R_{34}^T \cdot R_{30p3}$$

$$R_{30p2} := R_{23}^T \cdot R_{20p2}$$

$$R_{20p1} := R_{12}^T \cdot R_{10p1}$$

momen ( ${}^iR_o n_i$ ) :

$${}^iR_o n_i = {}^iR_{i+1} * ({}^{i+1}R_o n_{i+1} + ({}^{i+1}R_o p_i \times {}^{i+1}R_o f_{i+1})) + (({}^iR_o p_i + {}_iR_o s_i) \times {}^iR_o F_i) + {}^iR_o N_i$$

$$R_{60n6} := ((R_{60p6} + (R_{60s6})) \times R_{60F6}) + R_{60N6}$$

$$R_{50n5} := R_{56}(R_{60n6} + ((R_{60p5}) \times R_{60f6})) + ((R_{50p5} + (R_{50s5})) \times R_{50F5}) + R_{50N5}$$

$$R_{40n4} := R_{45}(R_{50n5} + ((R_{50p4}) \times R_{50f5})) + ((R_{40p4} + (R_{40s4})) \times R_{40F4}) + R_{40N4}$$

$$R_{30n3} := R_{34}(R_{40n4} + ((R_{40p3}) \times R_{40f4})) + ((R_{30p3} + (R_{30s3})) \times R_{30F3}) + R_{30N3}$$

$$R_{20n2} := R_{23}(R_{30n3} + ((R_{30p2}) \times R_{30f3})) + ((R_{20p2} + (R_{20s2})) \times R_{20F2}) + R_{20N2}$$

$$R_{10n1} := R_{12}(R_{20n2} + ((R_{20p1}) \times R_{20f2})) + ((R_{10p1} + (R_{10s1})) \times R_{10F1}) + R_{10N1}$$

$$R_{60n6} = \begin{bmatrix} 72.567 \\ -4.482 \\ -8.905 \end{bmatrix}$$

$$R_{50n5} = \begin{bmatrix} -9.926 \\ 69.527 \\ 11.18 \end{bmatrix}$$

$$R_{40n4} = \begin{bmatrix} -59.433 \\ 31.225 \\ -88.162 \end{bmatrix}$$

$$R_{30n3} = \begin{bmatrix} 145.683 \\ -1.00110^3 \\ 793.265 \end{bmatrix}$$

$$R_{10n1} = \begin{bmatrix} 727.499 \\ -640.688 \\ 2.12510^3 \end{bmatrix}$$

$$R_{20n2} = \begin{bmatrix} 28.773 \\ 2.11610^3 \\ -962.442 \end{bmatrix}$$

Torsi yang diperlukan link-i ( $\tau_i$ ) dalam Nm

$$\tau_i = ({}^iR_o n_i)^T * {}^iR_{i-1} * z + b_i q_i \text{ faktor redaman } b \text{ diabaikan, maka } \tau_i = ({}^iR_o n_i)^T * {}^iR_{i-1} * z$$

$$\tau_6 := (R_{60n6}^T) \cdot R_{65z}$$

$$\tau_5 := (R_{50n5}^T) \cdot R_{54z}$$

$$\tau_4 := (R_{40n4}^T) \cdot R_{43z}$$

$$\tau_3 := (R_{30n3}^T) \cdot R_{32z}$$

$$\tau_2 := (R_{20n2}^T) \cdot R_{21z}$$

$$\tau_1 := (R_{10n1}^T) \cdot R_{10z}$$

$$\tau_1 = [ 640.688 ]$$

$$\tau_2 = [ 1.127 \cdot 10^3 ]$$

$$\tau_3 = (793.265)$$

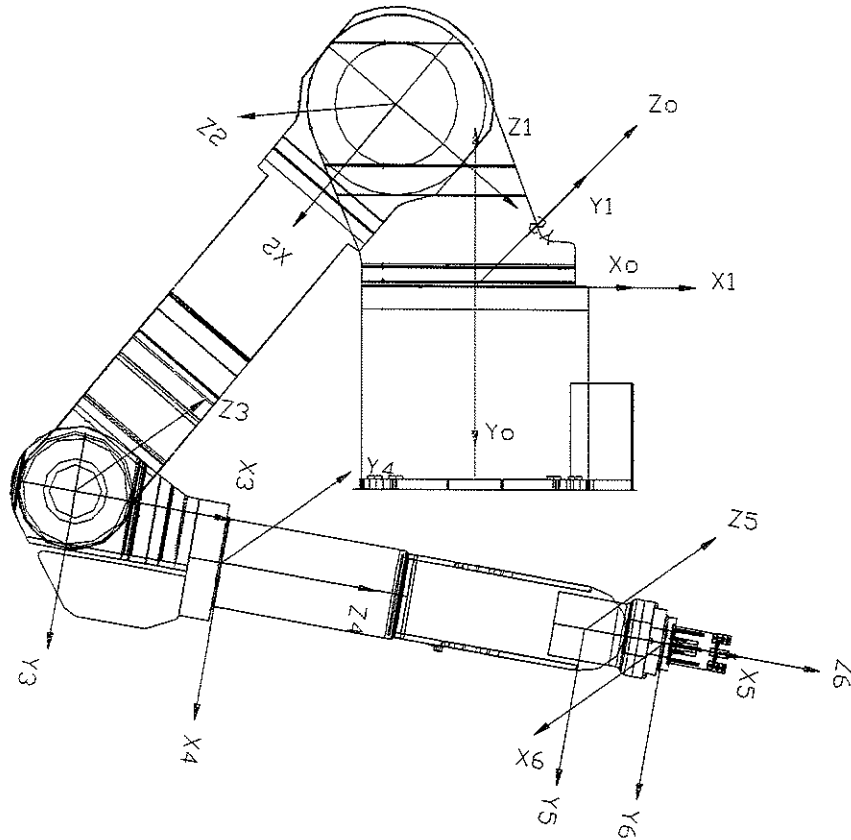
$$\tau_4 = (31.225)$$

$$\tau_5 = (-65.527)$$

$$\tau_6 = (-4.482)$$



III.B.5. Posisi 5



Gambar III.B.7. Posisi 5

$i$	$\theta_i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$
1	$0^\circ$	$90^\circ$	0	0
2	$230^\circ$	$90^\circ$	-0.15	0
3	$120^\circ$	$-180^\circ$	-0.95	0
4	$-90^\circ$	$90^\circ$	-0.09	-0,09
5	$90^\circ$	$-90^\circ$	0	0
6	$90^\circ$	$90^\circ$	0	0



**POSISI 5**

i := 0..5

$$\theta := \begin{bmatrix} 0 \\ 230 \\ 120 \\ -90 \\ 90 \\ 90 \end{bmatrix} \cdot \frac{\pi}{180} \quad \alpha := \begin{bmatrix} 90 \\ 90 \\ -180 \\ 90 \\ -90 \\ 90 \end{bmatrix} \cdot \frac{\pi}{180} \quad a := \begin{bmatrix} 0 \\ -0.15 \\ -0.95 \\ -0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad d := \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\theta_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 4.014 \\ 2.094 \\ -1.571 \\ 1.571 \\ 1.571 \end{bmatrix} \quad \alpha_i = \begin{bmatrix} 1.571 \\ 1.571 \\ -3.142 \\ 1.571 \\ -1.571 \\ 1.571 \end{bmatrix} \quad a_i = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.15 \\ -0.95 \\ -0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad d_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

**Matrik Transformasi**

$$A(i) := \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & a_i \cdot \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & a_i \cdot \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A01 := A(0)

$$A(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A12 := A(1)

$$A(1) = \begin{bmatrix} -0.643 & 0 & -0.766 & 0.096 \\ -0.766 & 0 & 0.643 & 0.115 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A23 := A(2)

$$A(2) = \begin{bmatrix} -0.5 & 0.866 & 0 & 0.475 \\ 0.866 & 0.5 & 0 & -0.823 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



A34 = A(3)

$$A(3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0.09 \\ 0 & 1 & 0 & -0.09 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A45 := A(4)

$$A(4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A56 := A(5)

$$A(5) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A06 := A01 · A12 · A23 · A34 · A45 · A56

$$A06 = \begin{bmatrix} 0.321 & -0.557 & 0.766 & -0.328 \\ -0.866 & -0.5 & 0 & 0.778 \\ 0.383 & -0.663 & -0.643 & -0.251 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Letak ujung gripper terhadap body ( 0;0;0.1185)

$$P_0 := A06 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.1185 \\ 1 \end{bmatrix} \quad P_0 = \begin{bmatrix} -0.237 \\ 0.778 \\ -0.327 \\ 1 \end{bmatrix}$$

### Matrik Rotasi

$$R(i) := \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) \end{bmatrix}$$

R01 := R(0)

$$R(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$



UNIVERSITAS  
 GADJAH MADA

$$R(1) = \begin{bmatrix} -0.643 & 0 & -0.766 \\ -0.766 & 0 & 0.643 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R21 := R12^{-1}$$

$$R02 := R01 \cdot R12$$

$$R23 := R(2)$$

$$R(2) = \begin{bmatrix} -0.5 & 0.866 & 0 \\ 0.866 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$R03 := R02 \cdot R23$$

$$R32 := R23^{-1}$$

$$R34 := R(3)$$

$$R(3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R04 := R03 \cdot R34$$

$$R43 := R34^{-1}$$

$$R45 := R(4)$$

$$R(4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R05 := R04 \cdot R45$$

$$R54 := R45^{-1}$$

$$R56 := R(5)$$

$$R(5) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R06 := R05 \cdot R56$$

$$R65 := R56^{-1}$$

$$R10 := R01^{-1}$$

$$R20 := R02^{-1}$$

$$R30 := R03^{-1}$$

$$R10 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R20 = \begin{bmatrix} -0.643 & 0 & -0.766 \\ 0 & -1 & 0 \\ -0.766 & 0 & 0.643 \end{bmatrix}$$

$$R30 = \begin{bmatrix} 0.321 & -0.866 & 0.383 \\ -0.557 & -0.5 & -0.663 \\ 0.766 & 0 & -0.643 \end{bmatrix}$$



UNIVERSITAS  
 GADJAH MADA - 1

$$R40 := R04^{-1}$$

$$R50 := R05^{-1}$$

$$R60 := R06^{-1}$$

$$R40 = \begin{bmatrix} 0.557 & 0.5 & 0.663 \\ 0.766 & 0 & -0.64 \\ -0.321 & 0.866 & -0.383 \end{bmatrix} \quad R50 = \begin{bmatrix} 0.766 & 0 & -0.643 \\ 0.321 & -0.866 & 0.383 \\ -0.557 & -0.5 & -0.663 \end{bmatrix} \quad R60 = \begin{bmatrix} 0.321 & -0.866 & 0.383 \\ -0.557 & -0.5 & -0.663 \\ 0.766 & 0 & -0.643 \end{bmatrix}$$

### Kecepatan Sudut

$$\begin{aligned} \omega_0 &:= 0 & \omega_1 &:= 2.792 & \omega_2 &:= 2.443 & \omega_3 &:= 2.792 \\ \omega_4 &:= 4.189 & \omega_5 &:= 4.189 & \omega_6 &:= 5.934 & z &:= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$R10\omega_1 := R10 \cdot (\omega_0 + z \cdot \omega_1) \quad R20\omega_2 := R21 \cdot (R10\omega_1 + z \cdot \omega_2) \quad R30\omega_3 := R32 \cdot (R20\omega_2 + z \cdot \omega_3)$$

$$R40\omega_4 := R43 \cdot (R30\omega_3 + z \cdot \omega_4) \quad R50\omega_5 := R54 \cdot (R40\omega_4 + z \cdot \omega_5) \quad R60\omega_6 := R65 \cdot (R50\omega_5 + z \cdot \omega_6)$$

$$\begin{aligned} R10\omega_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 2.792 \\ 0 \end{bmatrix} & R20\omega_2 &= \begin{bmatrix} -2.139 \\ 2.443 \\ 1.795 \end{bmatrix} & R30\omega_3 &= \begin{bmatrix} 3.185 \\ -0.631 \\ -4.587 \end{bmatrix} \\ R40\omega_4 &= \begin{bmatrix} 0.631 \\ -0.398 \\ -3.185 \end{bmatrix} & R50\omega_5 &= \begin{bmatrix} -0.398 \\ -1.004 \\ -0.631 \end{bmatrix} & R60\omega_6 &= \begin{bmatrix} -1.004 \\ 5.303 \\ -0.398 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

### Percepatan Sudut

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_0 &:= 0 & \dot{\omega}_1 &:= 0.698 & \dot{\omega}_2 &:= 0.611 & \dot{\omega}_3 &:= 0.698 & R00 &:= 1 \\ \dot{\omega}_4 &:= 1.047 & \dot{\omega}_5 &:= 1.047 & \dot{\omega}_6 &:= 1.4835 & R00\dot{\omega}_0 &:= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \ddot{\omega}_1 &:= 0 & \ddot{\omega}_2 &:= 0 & \ddot{\omega}_3 &:= 0 & \ddot{\omega}_4 &:= 0 \\ \ddot{\omega}_5 &:= 0 & \ddot{\omega}_6 &:= 0 & & & & \end{aligned}$$

$$R10\dot{\omega}_1 := R10 \cdot (R00 \cdot \dot{\omega}_0 + z \cdot \ddot{\omega}_1 + (R00\omega_0 \times z \cdot \omega_0))$$

$$R20\dot{\omega}_2 := R21 \cdot (R10\dot{\omega}_1 + z \cdot \ddot{\omega}_2 + R10\omega_1 \times z \cdot \omega_2)$$

$$R30\dot{\omega}_3 := R32 \cdot (R20\dot{\omega}_2 + z \cdot \ddot{\omega}_3 + (R20\omega_2) \times z \cdot \omega_3)$$

$$R40\dot{\omega}_4 := R43 \cdot (R30\dot{\omega}_3 + z \cdot \ddot{\omega}_4 + R30\omega_3 \times z \cdot \omega_4)$$

$$R50\dot{\omega}_5 := R54 \cdot (R40\dot{\omega}_4 + z \cdot \ddot{\omega}_5 + R40\omega_4 \times z \cdot \omega_5)$$

$$R60\dot{\omega}_6 := R65 \cdot (R50\dot{\omega}_5 + z \cdot \ddot{\omega}_6 + R50\omega_5 \times z \cdot \omega_6)$$

$$\begin{aligned} R10\dot{\omega}_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & R20\dot{\omega}_2 &= \begin{bmatrix} -4.384 \\ 0 \\ -5.225 \end{bmatrix} & R30\dot{\omega}_3 &= \begin{bmatrix} 3.953 \\ 5.096 \\ 5.225 \end{bmatrix} & R40\dot{\omega}_4 &= \begin{bmatrix} 8.247 \\ 5.225 \\ -1.311 \end{bmatrix} \end{aligned}$$



$$R50\dot{0}5 = \begin{bmatrix} 2.583 \\ 1.311 \\ -6.581 \end{bmatrix} \quad R60\dot{0}6 = \begin{bmatrix} 3.671 \\ -6.581 \\ -3.374 \end{bmatrix}$$

### Percepatan Linier

$p_i$  : origin frame koordinat terhadap sistem koordinat (i-1)

$$Ri0pi := \begin{bmatrix} a_i \\ d_i \cdot \sin(\alpha_i) \\ d_i \cdot \cos(\alpha_i) \end{bmatrix}$$

$$R10p1 := \begin{bmatrix} a_0 \\ d_0 \cdot \sin(\alpha_0) \\ d_0 \cdot \cos(\alpha_0) \end{bmatrix} \quad R20p2 := \begin{bmatrix} a_1 \\ d_1 \cdot \sin(\alpha_1) \\ d_1 \cdot \cos(\alpha_1) \end{bmatrix} \quad R30p3 := \begin{bmatrix} a_2 \\ d_2 \cdot \sin(\alpha_2) \\ d_2 \cdot \cos(\alpha_2) \end{bmatrix}$$

$$R40p4 := \begin{bmatrix} a_3 \\ d_3 \cdot \sin(\alpha_3) \\ d_3 \cdot \cos(\alpha_3) \end{bmatrix} \quad R50p5 := \begin{bmatrix} a_4 \\ d_4 \cdot \sin(\alpha_4) \\ d_4 \cdot \cos(\alpha_4) \end{bmatrix} \quad R60p6 := \begin{bmatrix} a_5 \\ d_5 \cdot \sin(\alpha_5) \\ d_5 \cdot \cos(\alpha_5) \end{bmatrix}$$

$$R10p1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20p2 = \begin{bmatrix} -0.15 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R30p3 = \begin{bmatrix} -0.95 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R40p4 = \begin{bmatrix} -0.09 \\ -0.09 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R50p5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R60p6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^iR_0\dot{v}_i = ({}^iR_0\dot{\alpha}_i) \times ({}^iR_0p_i^*) + ({}^iR_0\alpha_i) \times [({}^iR_0\alpha_i) \times ({}^iR_0p_i^*)] + {}^iR_{i-1} \cdot ({}^{i-1}R_0\dot{v}_{i-1})$$

$$R10vdot1 := (R10\dot{0}1 \times R10p1) + R10\omega1 \times (R10\omega1 \times R10p1) + 0$$

$$R20vdot2 := (R20\dot{0}2 \times R20p2) + R20\omega2 \times (R20\omega2 \times R20p2) + R21 \cdot R10vdot1$$

$$R30vdot3 := (R30\dot{0}3 \times R30p3) + (R30\omega3 \times (R30\omega3 \times R30p3)) + R32 \cdot R20vdot2$$

$$R40vdot4 := (R40\dot{0}4 \times R40p4) + R40\omega4 \times (R40\omega4 \times R40p4) + R43 \cdot R30vdot3$$

$$R50vdot5 := (R50\dot{0}5 \times R50p5) + (R50\omega5 \times (R50\omega5 \times R50p5)) + R54 \cdot R40vdot4$$

$$R60vdot6 := (R60\dot{0}6 \times R60p6) + (R60\omega6 \times (R60\omega6 \times R60p6)) + R65 \cdot R50vdot5$$

$$R10vdot1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20vdot2 = \begin{bmatrix} 1.378 \\ 1.568 \\ 0.576 \end{bmatrix} \quad R30vdot3 = \begin{bmatrix} 21.032 \\ -1.078 \\ 18.144 \end{bmatrix} \quad R40vdot4 = \begin{bmatrix} 1.91 \\ 19.233 \\ -21.237 \end{bmatrix}$$

$$R50vdot5 = \begin{bmatrix} 19.233 \\ 21.237 \\ -1.91 \end{bmatrix} \quad R60vdot6 = \begin{bmatrix} 21.237 \\ -1.91 \\ 19.233 \end{bmatrix}$$



### Percepatan Linier di Pusat Massa

$s_i$  : posisi pusat massa link-i terhadap  $(x_i, y_i, z_i)$  dalam meter  
 ditentukan dengan bantuan Autocad

$$s_1 := \begin{bmatrix} 0.0198769 \\ 0.0187241 \\ 0.2792426 \end{bmatrix} \quad s_2 := \begin{bmatrix} 0.3640382 \\ -0.0001744 \\ -0.0247365 \end{bmatrix} \quad s_3 := \begin{bmatrix} 0.0311122 \\ -0.0584025 \\ -0.0003596 \end{bmatrix} \quad s_4 := \begin{bmatrix} -0.0000557 \\ -0.0000192 \\ 0.4155820 \end{bmatrix}$$

$$s_5 := \begin{bmatrix} 0.3206769 \\ 0 \\ -0.1464595 \end{bmatrix} \quad s_6 := \begin{bmatrix} -0.0001711 \\ 0.0000010 \\ 0.0499760 \end{bmatrix}$$

$${}^iRo_a = {}^iRo_{\omega} \text{dot} i \times {}^iRosi + {}^iRo_{\omega} i \times [ {}^iRowi \times {}^iRosi ] + {}^iRov \text{dot} i$$

$$R10a1 := R10\omega \text{dot} 1 \times (R10 \cdot s_1) + R10\omega 1 \times (R10\omega 1 \times (R10 \cdot s_1)) + R10v \text{dot} 1$$

$$R20a2 := R20\omega \text{dot} 2 \times (R20 \cdot s_2) + R20\omega 2 \times (R20\omega 2 \times (R20 \cdot s_2)) + R20v \text{dot} 2$$

$$R30a3 := R30\omega \text{dot} 3 \times (R30 \cdot s_3) + R30\omega 3 \times (R30\omega 3 \times (R30 \cdot s_3)) + R30v \text{dot} 3$$

$$R40a4 := R40\omega \text{dot} 4 \times (R40 \cdot s_4) + R40\omega 4 \times (R40\omega 4 \times (R20 \cdot s_4)) + R40v \text{dot} 4$$

$$R50a5 := R50\omega \text{dot} 5 \times (R50 \cdot s_5) + R50\omega 5 \times (R50\omega 5 \times (R20 \cdot s_5)) + R50v \text{dot} 5$$

$$R60a6 := R60\omega \text{dot} 6 \times (R60 \cdot s_6) + R60\omega 6 \times (R60\omega 6 \times (R60 \cdot s_6)) + R60v \text{dot} 6$$

$$R10a1 = \begin{bmatrix} -0.155 \\ 0 \\ 0.146 \end{bmatrix} \quad R20a2 = \begin{bmatrix} 4.486 \\ 1.229 \\ 4.509 \end{bmatrix} \quad R30a3 = \begin{bmatrix} 19.42 \\ -1.287 \\ 16.782 \end{bmatrix} \quad R40a4 = \begin{bmatrix} 3.471 \\ 20.602 \\ -24.39 \end{bmatrix}$$

$$R50a5 = \begin{bmatrix} 19.482 \\ 18.958 \\ -1.861 \end{bmatrix} \quad R60a6 = \begin{bmatrix} 20.961 \\ -1.851 \\ 20.254 \end{bmatrix}$$

### Persamaan-persamaan Mundur

$m_i$  = massa tiap link ( kg )

$m_t$  = massa total ( data Autocad )

$$m_t := 0.1032072339473 + 0.0724924460640 + 0.0295482470174 + 0.0011111164060 + 0.0011211812428$$

$$m_1 := \frac{0.1032072339473}{m_t} \cdot 430.3 \quad m_2 := \frac{0.0724924460640}{m_t} \cdot 430.3 \quad m_3 := \frac{0.0295482470174}{m_t} \cdot 430.3$$

$$m_4 := \frac{0.0011111164060}{m_t} \cdot 430.3 \quad m_5 := \frac{0.0011211812428}{m_t} \cdot 430.3 \quad m_6 := \frac{0.0000827492909}{m_t} \cdot 430.3 + 2.73$$



$$\begin{aligned}
 m1 &= 213.96 & m4 &= 2.303 \\
 m2 &= 150.285 & m5 &= 2.324 \\
 m3 &= 61.257 & m6 &= 2.902
 \end{aligned}$$

$$m1 + m2 + m3 + m4 + m5 + m6 = 433.03$$

gaya tiap link pengaruh massanya ( ${}^iR_{0f_i}$ )

$${}^iR_{0f_i} = m_i \times {}^iR_{0a_i} \text{ ditulis } R_{i0f_i} = m_i \cdot R_{i0a_i}$$

$$R_{60f6} := m6 \cdot R_{60a6}$$

$$R_{50f5} := R_{56} \cdot R_{60f6} + m5 \cdot R_{50a5}$$

$$R_{40f4} := R_{45} \cdot R_{50f5} + m4 \cdot R_{40a4}$$

$$R_{30f3} := R_{34} \cdot R_{40f4} + m3 \cdot R_{30a3}$$

$$R_{20f2} := R_{23} \cdot R_{30f3} + m2 \cdot R_{20a2}$$

$$R_{10f1} := R_{12} \cdot R_{20f2} + m1 \cdot R_{10a1}$$

$$\begin{aligned}
 R_{60f6} &= \begin{bmatrix} 60.819 \\ -5.37 \\ 58.769 \end{bmatrix} & R_{50f5} &= \begin{bmatrix} 104.053 \\ 104.885 \\ -9.696 \end{bmatrix} & R_{40f4} &= \begin{bmatrix} 17.69 \\ 151.51 \\ -161.066 \end{bmatrix} & R_{30f3} &= \begin{bmatrix} 1.351 \cdot 10^3 \\ -96.521 \\ 1.18 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \\
 R_{20f2} &= \begin{bmatrix} -84.753 \\ 1.306 \cdot 10^3 \\ -501.911 \end{bmatrix} & R_{10f1} &= \begin{bmatrix} 405.812 \\ -257.698 \\ 1.337 \cdot 10^3 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

matrik momen inersia link-i terhadap originnya (i) dalam kg.m<sup>2</sup>

$$I_i = m_i \cdot s_i^2 \text{ ditulis } I_i = m_i \cdot s_i^2$$

$$I1 := m1 \cdot s1^2 \quad I2 := m2 \cdot s2^2 \quad I3 := m3 \cdot s3^2 \quad I4 := m4 \cdot s4^2 \quad I5 := m5 \cdot s5^2 \quad I6 := m6 \cdot s6^2$$

$$\begin{aligned}
 I1 &= \begin{bmatrix} 0.085 \\ 0.075 \\ 16.684 \end{bmatrix} & I2 &= \begin{bmatrix} 19.916 \\ 4.571 \cdot 10^{-6} \\ 0.092 \end{bmatrix} & I3 &= \begin{bmatrix} 0.059 \\ 0.209 \\ 7.921 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix} & I4 &= \begin{bmatrix} 7.146 \cdot 10^{-9} \\ 8.491 \cdot 10^{-10} \\ 0.398 \end{bmatrix} \\
 I5 &= \begin{bmatrix} 0.239 \\ 0 \\ 0.05 \end{bmatrix} & I6 &= \begin{bmatrix} 8.494 \cdot 10^{-8} \\ 2.902 \cdot 10^{-12} \\ 7.247 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

matrik momen inersia link-i terhadap base

$${}^iR_{0i} \cdot I_i = {}^iR_{0i} \times I_i \times {}^iR_{0i} \text{ ditulis } R_{i0I_i} R_{i0i}$$

$$\begin{aligned}
 R_{10I1} R_{10i} &:= \begin{bmatrix} 15.105 & 0 & 0 \\ 0 & 4.71 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & R_{20I2} R_{20i} &:= \begin{bmatrix} 39.107 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & R_{30I3} R_{30i} &:= \begin{bmatrix} 0.284 & 0 & 0 \\ 0 & 9.969 \cdot 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 0.592 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$



UNIVERSITAS  
 GADJAH MADA

$$R40I4R04 := \begin{bmatrix} 1.598 \cdot 10^{-7} & 0 & 0 \\ 0 & 3.465 & 0 \\ 0 & 0 & 1.146 \end{bmatrix} \quad R50I5R05 := \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.141 \cdot 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 4.43 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$$R60I6R06 := \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.381 & 0 \\ 0 & 0 & 9.693 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$$

gaya luar eksternal tiap link ( ${}^iR_oF_i$ )

${}^iR_oF_i = m_i \times {}^iR_oa_i$  ditulis  $R0iFi = mi \cdot R0iai$

$R10F1 := m1 \cdot R10a1 \quad R30F3 := m3 \cdot R30a3 \quad R50F5 := m5 \cdot R50a5$

$R20F2 := m2 \cdot R20a2 \quad R40F4 := m4 \cdot R40a4 \quad R60F6 := m6 \cdot R60a6$

$$R10F1 = \begin{bmatrix} -33.152 \\ -1.912 \cdot 10^{-1} \\ 31.229 \end{bmatrix} \quad R20F2 = \begin{bmatrix} 674.164 \\ 184.657 \\ 677.615 \end{bmatrix} \quad R30F3 = \begin{bmatrix} 1.19 \cdot 10^3 \\ -78.831 \\ 1.028 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \quad R40F4 = \begin{bmatrix} 7.994 \\ 47.457 \\ -56.181 \end{bmatrix}$$

$$R50F5 = \begin{bmatrix} 45.284 \\ 44.065 \\ -4.326 \end{bmatrix} \quad R60F6 = \begin{bmatrix} 60.819 \\ -5.37 \\ 58.769 \end{bmatrix}$$

momen tiap link yang terjadi ( ${}^iR_oN_i$ )

${}^iR_oN_i = {}^iR_oJ_i \cdot R_i \cdot iRowdot_i + iRowdot_i \times ({}^iR_oJ_i \cdot R_i \cdot iRowdot_i)$

$R10N1 := R10I1R01 \cdot R10\dot{0}1 + R10\dot{0}1 \times (R10I1R01 \cdot R10\dot{0}1)$

$R20N2 := R20I2R02 \cdot R20\dot{0}2 + R20\dot{0}2 \times (R20I2R02 \cdot R20\dot{0}2)$

$R30N3 := R30I3R03 \cdot R30\dot{0}3 + R30\dot{0}3 \times (R30I3R03 \cdot R30\dot{0}3)$

$R40N4 := R40I4R04 \cdot R40\dot{0}4 + R40\dot{0}4 \times (R40I4R04 \cdot R40\dot{0}4)$

$R50N5 := R50I5R05 \cdot R50\dot{0}5 + R50\dot{0}5 \times (R50I5R05 \cdot R50\dot{0}5)$

$R60N6 := R60I6R06 \cdot R60\dot{0}6 + R60\dot{0}6 \times (R60I6R06 \cdot R60\dot{0}6)$

$$R10N1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20N2 = \begin{bmatrix} -171.459 \\ 895.888 \\ 5.486 \cdot 10^{-14} \end{bmatrix} \quad R30N3 = \begin{bmatrix} 16.885 \\ -6.362 \\ -2.628 \end{bmatrix} \quad R40N4 = \begin{bmatrix} 15.886 \\ 30.495 \\ 147.801 \end{bmatrix}$$

$$R50N5 = \begin{bmatrix} -0.036 \\ 0.076 \\ -0.028 \end{bmatrix} \quad R60N6 = \begin{bmatrix} -8.245 \\ -2.387 \\ -9.236 \end{bmatrix}$$



$$R60p5 := R56^T \cdot R50p5 \quad R50p4 := R45^T \cdot R40p4 \quad R40p3 := R34^T \cdot R30p3$$

$$R30p2 := R23^T \cdot R20p2 \quad R20p1 := R12^T \cdot R10p1$$

momen ( ${}^iR_o n_i$ ) :

$${}^iR_o n_i = {}^iR_{i+1} * ({}^{i+1}R_o n_{i+1} + ({}^{i+1}R_o p_i \times {}^{i+1}R_o f_{i+1})) + (({}^iR_o p_i + {}^iR_o s_i) \times {}^iR_o F_i) + {}^iR_o N_i$$

$$R60n6 := ((R60p6 + (R60 \cdot s6)) \times R60F6) + R60N6$$

$$R50n5 := R56 \cdot (R60n6 + ((R60p5) \times R60f6)) + ((R50p5 + (R50 \cdot s5)) \times R50F5) + R50N5$$

$$R40n4 := R45 \cdot (R50n5 + ((R50p4) \times R50f5)) + ((R40p4 + (R40 \cdot s4)) \times R40F4) + R40N4$$

$$R30n3 := R34 \cdot (R40n4 + ((R40p3) \times R40f4)) + ((R30p3 + (R30 \cdot s3)) \times R30F3) + R30N3$$

$$R20n2 := R23 \cdot (R30n3 + ((R30p2) \times R30f3)) + ((R20p2 + (R20 \cdot s2)) \times R20F2) + R20N2$$

$$R10n1 := R12 \cdot (R20n2 + ((R20p1) \times R20f2)) + ((R10p1 + (R10 \cdot s1)) \times R10F1) + R10N1$$

$$R60n6 = \begin{bmatrix} -10.361 \\ -5.471 \\ -7.328 \end{bmatrix} \quad R50n5 = \begin{bmatrix} -3.983 \\ -12.499 \\ 7.347 \end{bmatrix} \quad R40n4 = \begin{bmatrix} 45.598 \\ 26.23 \\ 163.474 \end{bmatrix} \quad R30n3 = \begin{bmatrix} -132.232 \\ 1.035 \cdot 10^3 \\ 96.115 \end{bmatrix}$$

$$R10n1 = \begin{bmatrix} -280.613 \\ -861.092 \\ 1.18 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \quad R20n2 = \begin{bmatrix} 845.615 \\ 1.171 \cdot 10^3 \\ -331.857 \end{bmatrix}$$

Torsi yang diperlukan link-i ( $\tau_i$ ) dalam Nm

$\tau_i = ({}^iR_o n_i)^T * {}^iR_{i-1} * z + b_i$  faktor redaman b diabaikan, maka  $\tau_i = ({}^iR_o n_i)^T * {}^iR_{i-1} * z$

$$\tau_6 := (R60n6^T) \cdot R65 \cdot z \quad \tau_5 := (R50n5^T) \cdot R54 \cdot z \quad \tau_4 := (R40n4^T) \cdot R43 \cdot z$$

$$\tau_3 := (R30n3^T) \cdot R32 \cdot z \quad \tau_2 := (R20n2^T) \cdot R21 \cdot z \quad \tau_1 := (R10n1^T) \cdot R10 \cdot z$$

$$\tau_1 = (-861.092)$$

$$\tau_2 = [1.171 \cdot 10^3]$$

$$\tau_3 = (-96.115)$$

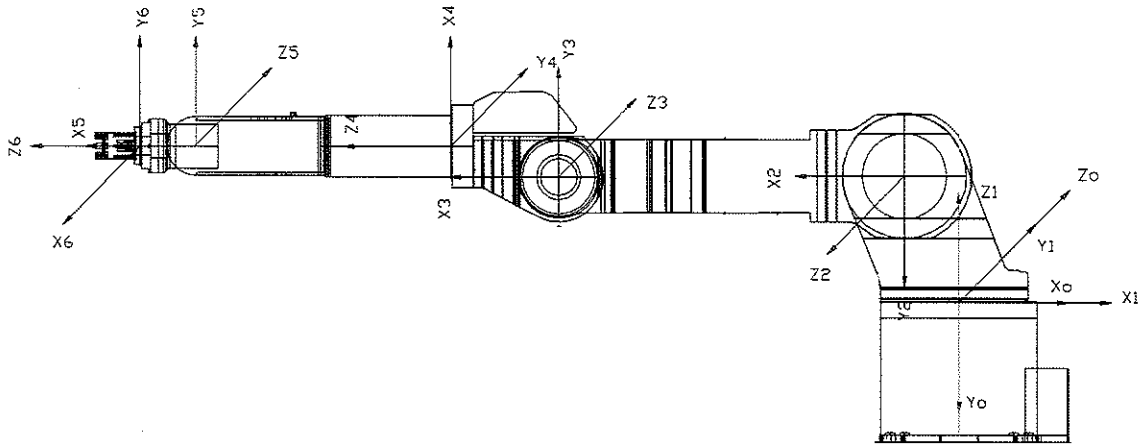
$$\tau_4 = (26.23)$$

$$\tau_5 = (12.499)$$

$$\tau_6 = (-5.471)$$



**III.B.6 Posisi 6**  
 GADJAH MADA



**Gambar III.B.8. Posisi 6**

<b>i</b>	$\theta_i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$
1	$0^\circ$	$90^\circ$	0	0
2	$180^\circ$	$90^\circ$	-0.15	-0.354
3	$0^\circ$	$-180^\circ$	-0.95	0
4	$-90^\circ$	$90^\circ$	-0.09	-0,09
5	$90^\circ$	$-90^\circ$	0	0
6	$90^\circ$	$90^\circ$	0	0



## POSISI 6

$i := 0..5$

$$\theta := \begin{bmatrix} 0 \\ 180 \\ 0 \\ -90 \\ 90 \\ 90 \end{bmatrix} \cdot \frac{\pi}{180} \quad \alpha := \begin{bmatrix} 90 \\ 90 \\ -180 \\ 90 \\ -90 \\ 90 \end{bmatrix} \cdot \frac{\pi}{180} \quad a := \begin{bmatrix} 0 \\ -0.15 \\ -0.95 \\ -0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad d := \begin{bmatrix} 0 \\ -0.354 \\ 0 \\ -0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\theta_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 3.142 \\ 0 \\ -1.571 \\ 1.571 \\ 1.571 \end{bmatrix} \quad \alpha_i = \begin{bmatrix} 1.571 \\ 1.571 \\ -3.142 \\ 1.571 \\ -1.571 \\ 1.571 \end{bmatrix} \quad a_i = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.15 \\ -0.95 \\ -0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad d_i = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.354 \\ 0 \\ -0.09 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

### Matrik Transformasi

$$A(i) := \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & a_i \cdot \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & a_i \cdot \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$A01 := A(0)$

$$A(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$A12 := A(1)$

$$A(1) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0.15 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -0.354 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$A23 := A(2)$

$$A(2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -0.95 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



UNIVERSITAS  
 GADJAH MADA

$$A(3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0.09 \\ 0 & 1 & 0 & -0.09 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A45 := A(4)

$$A(4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A56 := A(5)

$$A(5) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A06 := A01 · A12 · A23 · A34 · A45 · A56

$$A06 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1.1 \\ 0 & 1 & 0 & 0.444 \\ 0 & 0 & -1 & 0.09 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Letak ujung gripper terhadap body ( 0;0;0.1185)

$$Po := A06 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1185 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad Po = \begin{bmatrix} 1.1 \\ 0.562 \\ 0.09 \\ 1 \end{bmatrix}$$

### Matrik Rotasi

$$R(i) := \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) \end{bmatrix}$$

R01 := R(0)

$$R(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$



R12 := R(1)  
 GADJAH MADA

$$R(1) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

R21 := R12<sup>-1</sup>

R02 := R01 · R12

R23 := R(2)

$$R(2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

R03 := R02 · R23

R32 := R23<sup>-1</sup>

R34 := R(3)

$$R(3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

R04 := R03 · R34

R43 := R34<sup>-1</sup>

R45 := R(4)

$$R(4) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

R05 := R04 · R45

R54 := R45<sup>-1</sup>

R56 := R(5)

$$R(5) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

R06 := R05 · R56

R65 := R56<sup>-1</sup>

R10 := R01<sup>-1</sup>

$$R10 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

R20 := R02<sup>-1</sup>

$$R20 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

R30 := R03<sup>-1</sup>

$$R30 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$



R40 := R04<sup>-1</sup>  
 GADJAH MADA

R50 := R05<sup>-1</sup>

R60 := R06<sup>-1</sup>

$$R40 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R50 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R60 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

### Kecepatan Sudut

$$\begin{aligned} \omega_0 &:= 0 & \omega_1 &:= 2.792 & \omega_2 &:= 2.443 & \omega_3 &:= 2.792 & z &:= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \omega_4 &:= 4.189 & \omega_5 &:= 4.189 & \omega_6 &:= 5.934 & & & & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R10\omega_1 &:= R10 \cdot (\omega_0 + z \cdot \omega_1) & R20\omega_2 &:= R21 \cdot (R10\omega_1 + z \cdot \omega_2) & R30\omega_3 &:= R32 \cdot (R20\omega_2 + z \cdot \omega_3) \\ R40\omega_4 &:= R43 \cdot (R30\omega_3 + z \cdot \omega_4) & R50\omega_5 &:= R54 \cdot (R40\omega_4 + z \cdot \omega_5) & R60\omega_6 &:= R65 \cdot (R50\omega_5 + z \cdot \omega_6) \end{aligned}$$

$$R10\omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.792 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$R20\omega_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.443 \\ 2.792 \end{bmatrix}$$

$$R30\omega_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ -2.443 \\ -5.584 \end{bmatrix}$$

$$R40\omega_4 = \begin{bmatrix} 2.443 \\ -1.395 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$R50\omega_5 = \begin{bmatrix} -1.395 \\ -4.189 \\ -2.443 \end{bmatrix}$$

$$R60\omega_6 = \begin{bmatrix} -4.189 \\ 3.491 \\ -1.395 \end{bmatrix}$$

### Percepatan Sudut

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_0 &:= 0 & \dot{\omega}_1 &:= 0.698 & \dot{\omega}_2 &:= 0.611 & \dot{\omega}_3 &:= 0.698 & R00 &:= 1 \\ \dot{\omega}_4 &:= 1.047 & \dot{\omega}_5 &:= 1.047 & \dot{\omega}_6 &:= 1.4835 & R00\omega_0 &:= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \ddot{\omega}_1 &:= 0 & \ddot{\omega}_2 &:= 0 & \ddot{\omega}_3 &:= 0 & \ddot{\omega}_4 &:= 0 \\ \ddot{\omega}_5 &:= 0 & \ddot{\omega}_6 &:= 0 & & & & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R10\dot{\omega}_1 &:= R10 \cdot (R00 \cdot \dot{\omega}_0 + z \cdot \ddot{\omega}_1 + (R00\omega_0 \times z \cdot \omega_0)) \\ R20\dot{\omega}_2 &:= R21 \cdot (R10\dot{\omega}_1 + z \cdot \ddot{\omega}_2 + R10\omega_1 \times z \cdot \omega_2) \\ R30\dot{\omega}_3 &:= R32 \cdot (R20\dot{\omega}_2 + z \cdot \ddot{\omega}_3 + (R20\omega_2) \times z \cdot \omega_3) \\ R40\dot{\omega}_4 &:= R43 \cdot (R30\dot{\omega}_3 + z \cdot \ddot{\omega}_4 + R30\omega_3 \times z \cdot \omega_4) \\ R50\dot{\omega}_5 &:= R54 \cdot (R40\dot{\omega}_4 + z \cdot \ddot{\omega}_5 + R40\omega_4 \times z \cdot \omega_5) \\ R60\dot{\omega}_6 &:= R65 \cdot (R50\dot{\omega}_5 + z \cdot \ddot{\omega}_6 + R50\omega_5 \times z \cdot \omega_6) \end{aligned}$$

$$R10\dot{\omega}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20\dot{\omega}_2 = \begin{bmatrix} -6.821 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R30\dot{\omega}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$R40\dot{\omega}_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1.462 \cdot 10^{-15} \\ 10.234 \end{bmatrix}$$



$$R50\dot{0}5 = \begin{bmatrix} -10.234 \\ -10.234 \\ 5.844 \end{bmatrix} \quad R60\dot{0}6 = \begin{bmatrix} -1.956 \\ 5.844 \\ -35.091 \end{bmatrix}$$

### Percepatan Linier

$p_i$  : origin frame koordinat terhadap sistem koordinat (i-1)

$$Ri0pi := \begin{bmatrix} a_i \\ d_i \cdot \sin(\alpha_i) \\ d_i \cdot \cos(\alpha_i) \end{bmatrix}$$

$$R10p1 := \begin{bmatrix} a_0 \\ d_0 \cdot \sin(\alpha_0) \\ d_0 \cdot \cos(\alpha_0) \end{bmatrix}$$

$$R40p4 := \begin{bmatrix} a_3 \\ d_3 \cdot \sin(\alpha_3) \\ d_3 \cdot \cos(\alpha_3) \end{bmatrix}$$

$$R20p2 := \begin{bmatrix} a_1 \\ d_1 \cdot \sin(\alpha_1) \\ d_1 \cdot \cos(\alpha_1) \end{bmatrix}$$

$$R50p5 := \begin{bmatrix} a_4 \\ d_4 \cdot \sin(\alpha_4) \\ d_4 \cdot \cos(\alpha_4) \end{bmatrix}$$

$$R30p3 := \begin{bmatrix} a_2 \\ d_2 \cdot \sin(\alpha_2) \\ d_2 \cdot \cos(\alpha_2) \end{bmatrix}$$

$$R60p6 := \begin{bmatrix} a_5 \\ d_5 \cdot \sin(\alpha_5) \\ d_5 \cdot \cos(\alpha_5) \end{bmatrix}$$

$$R10p1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20p2 = \begin{bmatrix} -0.15 \\ -0.354 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R30p3 = \begin{bmatrix} -0.95 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R40p4 = \begin{bmatrix} -0.09 \\ -0.09 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R50p5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R60p6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^iR_0\dot{v}_i = ({}^iR_0\dot{\omega}_i) \times ({}^iR_0p_i^*) + ({}^iR_0\dot{\omega}_i) \times [({}^iR_0\dot{\omega}_i) \times ({}^iR_0p_i^*)] + {}^iR_{i-1} \cdot ({}^{i-1}R_0\dot{v}_{i-1})$$

$$R10vdot1 := (R10\dot{0}1 \times R10p1) + R10\omega1 \times (R10\omega1 \times R10p1) + 0$$

$$R20vdot2 := (R20\dot{0}2 \times R20p2) + R20\omega2 \times (R20\omega2 \times R20p2) + R21 \cdot R10vdot1$$

$$R30vdot3 := (R30\dot{0}3 \times R30p3) + (R30\omega3 \times (R30\omega3 \times R30p3)) + R32 \cdot R20vdot2$$

$$R40vdot4 := (R40\dot{0}4 \times R40p4) + R40\omega4 \times (R40\omega4 \times R40p4) + R43 \cdot R30vdot3$$

$$R50vdot5 := (R50\dot{0}5 \times R50p5) + (R50\omega5 \times (R50\omega5 \times R50p5)) + R54 \cdot R40vdot4$$

$$R60vdot6 := (R60\dot{0}6 \times R60p6) + (R60\omega6 \times (R60\omega6 \times R60p6)) + R65 \cdot R50vdot5$$

$$R10vdot1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20vdot2 = \begin{bmatrix} 2.065 \\ 2.76 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R30vdot3 = \begin{bmatrix} 37.356 \\ -2.76 \\ 3.059 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix} \quad R40vdot4 = \begin{bmatrix} 4.162 \\ -0.077 \\ -37.356 \end{bmatrix}$$

$$R50vdot5 = \begin{bmatrix} -0.077 \\ 37.356 \\ -4.162 \end{bmatrix} \quad R60vdot6 = \begin{bmatrix} 37.356 \\ -4.162 \\ -0.077 \end{bmatrix}$$



### Percepatan Linier di Pusat Massa

$s_j$  : posisi pusat massa link-i terhadap  $(x_i, y_i, z_i)$  dalam meter  
 ditentukan dengan bantuan Autocad

$$s_1 := \begin{bmatrix} 0.0198769 \\ 0.0187241 \\ 0.2792426 \end{bmatrix} \quad s_2 := \begin{bmatrix} 0.3640382 \\ -0.0001744 \\ -0.0247365 \end{bmatrix} \quad s_3 := \begin{bmatrix} 0.0311122 \\ -0.0584025 \\ -0.0003596 \end{bmatrix} \quad s_4 := \begin{bmatrix} -0.0000557 \\ -0.0000192 \\ 0.4155820 \end{bmatrix}$$

$$s_5 := \begin{bmatrix} 0.3206769 \\ 0 \\ -0.1464595 \end{bmatrix} \quad s_6 := \begin{bmatrix} -0.0001711 \\ 0.0000010 \\ 0.0499760 \end{bmatrix}$$

$${}^iR_{o a_i} = {}^iR_o \omega_{dot i} \times {}^iR_{o s_i} + {}^iR_o \omega_i \times [ {}^iR_{o w_i} \times {}^iR_{o s_i} ] + {}^iR_{o v_{dot i}}$$

$$R_{10a1} := R_{10 \dot{o}1} \times (R_{10} \cdot s_1) + R_{10 \omega_1} \times (R_{10 \omega_1} \times (R_{10} \cdot s_1)) + R_{10 v_{dot 1}}$$

$$R_{20a2} := R_{20 \dot{o}2} \times (R_{20} \cdot s_2) + R_{20 \omega_2} \times (R_{20 \omega_2} \times (R_{20} \cdot s_2)) + R_{20 v_{dot 2}}$$

$$R_{30a3} := R_{30 \dot{o}3} \times (R_{30} \cdot s_3) + R_{30 \omega_3} \times (R_{30 \omega_3} \times (R_{30} \cdot s_3)) + R_{30 v_{dot 3}}$$

$$R_{40a4} := R_{40 \dot{o}4} \times (R_{40} \cdot s_4) + R_{40 \omega_4} \times (R_{40 \omega_4} \times (R_{40} \cdot s_4)) + R_{40 v_{dot 4}}$$

$$R_{50a5} := R_{50 \dot{o}5} \times (R_{50} \cdot s_5) + R_{50 \omega_5} \times (R_{50 \omega_5} \times (R_{50} \cdot s_5)) + R_{50 v_{dot 5}}$$

$$R_{60a6} := R_{60 \dot{o}6} \times (R_{60} \cdot s_6) + R_{60 \omega_6} \times (R_{60 \omega_6} \times (R_{60} \cdot s_6)) + R_{60 v_{dot 6}}$$

$$R_{10a1} = \begin{bmatrix} -0.155 \\ 0 \\ 0.146 \end{bmatrix} \quad R_{20a2} = \begin{bmatrix} 7.075 \\ 2.421 \\ 0.148 \end{bmatrix} \quad R_{30a3} = \begin{bmatrix} 38.512 \\ -0.934 \\ -0.799 \end{bmatrix} \quad R_{40a4} = \begin{bmatrix} 8.415 \\ -0.077 \\ -40.645 \end{bmatrix}$$

$$R_{50a5} = \begin{bmatrix} 8.839 \\ 34.839 \\ 2.38 \end{bmatrix} \quad R_{60a6} = \begin{bmatrix} 36.77 \\ -4.025 \\ 1.409 \end{bmatrix}$$

### Persamaan-persamaan Mundur

$m_i$  = massa tiap link ( kg )  
 $m_t$  = massa total ( data Autocad )

$$m_t := 0.1032072339473 + 0.0724924460640 + 0.0295482470174 + 0.0011111164060 + 0.0011211812428$$

$$m_1 := \frac{0.1032072339473}{m_t} \cdot 430.3 \quad m_2 := \frac{0.0724924460640}{m_t} \cdot 430.3 \quad m_3 := \frac{0.0295482470174}{m_t} \cdot 430.3$$

$$m_4 := \frac{0.0011111164060}{m_t} \cdot 430.3 \quad m_5 := \frac{0.0011211812428}{m_t} \cdot 430.3 \quad m_6 := \frac{0.0000827492909}{m_t} \cdot 430.3 + 2.73$$



$$\begin{aligned} m1 &= 213.96 & m4 &= 2.303 \\ m2 &= 150.285 & m5 &= 2.324 \\ m3 &= 61.257 & m6 &= 2.902 \end{aligned}$$

$$m1 + m2 + m3 + m4 + m5 + m6 = 433.03$$

gaya tiap link pengaruh massanya ( ${}^iR_0f_i$ )

$${}^iR_0f_i = m_i \times {}^iR_0a_i \text{ ditulis } Ri0fi = mi \cdot Rioai$$

$$R60f6 := m6 \cdot R60a6$$

$$R50f5 := R56 \cdot R60f6 + m5 \cdot R50a5$$

$$R40f4 := R45 \cdot R50f5 + m4 \cdot R40a4$$

$$R30f3 := R34 \cdot R40f4 + m3 \cdot R30a3$$

$$R20f2 := R23 \cdot R30f3 + m2 \cdot R20a2$$

$$R10f1 := R12 \cdot R20f2 + m1 \cdot R10a1$$

$$\begin{aligned} R60f6 &= \begin{bmatrix} 106.69 \\ -11.68 \\ 4.088 \end{bmatrix} & R50f5 &= \begin{bmatrix} 24.632 \\ 187.668 \\ -6.147 \end{bmatrix} & R40f4 &= \begin{bmatrix} 25.531 \\ 24.454 \\ -281.293 \end{bmatrix} & R30f3 &= \begin{bmatrix} 2.64 \cdot 10^3 \\ -82.718 \\ -24.482 \end{bmatrix} \\ R20f2 &= \begin{bmatrix} 3.704 \cdot 10^3 \\ 446.514 \\ 46.669 \end{bmatrix} & R10f1 &= \begin{bmatrix} -3.737 \cdot 10^3 \\ 46.669 \\ 477.744 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

matrik momen inersia link-i terhadap originnya (i) dalam kg.m<sup>2</sup>

$$I_i = m_i \cdot s_i^2 \text{ ditulis } Ii = mi \cdot si^2$$

$$I1 := m1 \cdot s1^2 \quad I2 := m2 \cdot s2^2 \quad I3 := m3 \cdot s3^2 \quad I4 := m4 \cdot s4^2 \quad I5 := m5 \cdot s5^2 \quad I6 := m6 \cdot s6^2$$

$$\begin{aligned} I1 &= \begin{bmatrix} 0.085 \\ 0.075 \\ 16.684 \end{bmatrix} & I2 &= \begin{bmatrix} 19.916 \\ 4.571 \cdot 10^{-6} \\ 0.092 \end{bmatrix} & I3 &= \begin{bmatrix} 0.059 \\ 0.209 \\ 7.921 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix} & I4 &= \begin{bmatrix} 7.146 \cdot 10^{-9} \\ 8.491 \cdot 10^{-10} \\ 0.398 \end{bmatrix} \\ I5 &= \begin{bmatrix} 0.239 \\ 0 \\ 0.05 \end{bmatrix} & I6 &= \begin{bmatrix} 8.494 \cdot 10^{-8} \\ 2.902 \cdot 10^{-12} \\ 7.247 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

matrik momen inersia link-i terhadap base

$${}^iR_0I_i {}^0R_i = {}^iR_0 \times I_i \times {}^0R_i \text{ ditulis } Ri0IiR0i$$

$$\begin{aligned} R10I1R01 &:= \begin{bmatrix} 15.105 & 0 & 0 \\ 0 & 4.71 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & R20I2R02 &:= \begin{bmatrix} 39.107 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & R30I3R03 &:= \begin{bmatrix} 0.284 & 0 & 0 \\ 0 & 9.969 \cdot 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 0.592 \end{bmatrix} \end{aligned}$$



$$R40I4R04 := \begin{bmatrix} 1.598 \cdot 10^{-7} & 0 & 0 \\ 0 & 3.465 & 0 \\ 0 & 0 & 1.146 \end{bmatrix} \quad R50I5R05 := \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.141 \cdot 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 4.43 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$$R60I6R06 := \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.381 & 0 \\ 0 & 0 & 9.693 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$$

gaya luar eksternal tiap link ( ${}^iR_oF_i$ )

$${}^iR_oF_i = m_i \times {}^iR_oa_i \text{ ditulis } R0iFi = mi \cdot R0iai$$

$$R10F1 := m1 \cdot R10a1 \quad R30F3 := m3 \cdot R30a3 \quad R50F5 := m5 \cdot R50a5$$

$$R20F2 := m2 \cdot R20a2 \quad R40F4 := m4 \cdot R40a4 \quad R60F6 := m6 \cdot R60a6$$

$$R10F1 = \begin{bmatrix} -33.152 \\ -1.912 \cdot 10^{-1} \\ 31.229 \end{bmatrix} \quad R20F2 = \begin{bmatrix} 1.063 \cdot 10^3 \\ 363.796 \\ 22.187 \end{bmatrix} \quad R30F3 = \begin{bmatrix} 2.359 \cdot 10^3 \\ -57.187 \\ -48.935 \end{bmatrix} \quad R40F4 = \begin{bmatrix} 19.384 \\ -0.178 \\ -93.625 \end{bmatrix}$$

$$R50F5 = \begin{bmatrix} 20.544 \\ 80.978 \\ 5.533 \end{bmatrix} \quad R60F6 = \begin{bmatrix} 106.69 \\ -11.68 \\ 4.088 \end{bmatrix}$$

momen tiap link yang terjadi ( ${}^iR_o\tau_i$ )

$${}^iR_oN_i = {}^iR_oJ_i \cdot {}^iR_i \cdot iRowdot_i + iRowdot_i \times ({}^iR_oJ_i \cdot {}^iR_i \cdot iRowdot_i)$$

$$R10N1 := R10I1R01 \cdot R10\dot{d}1 + R10\dot{d}1 \times (R10I1R01 \cdot R10\dot{d}1)$$

$$R20N2 := R20I2R02 \cdot R20\dot{d}2 + R20\dot{d}2 \times (R20I2R02 \cdot R20\dot{d}2)$$

$$R30N3 := R30I3R03 \cdot R30\dot{d}3 + R30\dot{d}3 \times (R30I3R03 \cdot R30\dot{d}3)$$

$$R40N4 := R40I4R04 \cdot R40\dot{d}4 + R40\dot{d}4 \times (R40I4R04 \cdot R40\dot{d}4)$$

$$R50N5 := R50I5R05 \cdot R50\dot{d}5 + R50\dot{d}5 \times (R50I5R05 \cdot R50\dot{d}5)$$

$$R60N6 := R60I6R06 \cdot R60\dot{d}6 + R60\dot{d}6 \times (R60I6R06 \cdot R60\dot{d}6)$$

$$R10N1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R20N2 = \begin{bmatrix} -266.743 \\ -2.228 \cdot 10^{-13} \\ 0 \end{bmatrix} \quad R30N3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad R40N4 = \begin{bmatrix} 3.469 \cdot 10^{-14} \\ -3.318 \cdot 10^{-15} \\ 11.728 \end{bmatrix}$$

$$R50N5 = \begin{bmatrix} -0.252 \\ 0.263 \\ 0.048 \end{bmatrix} \quad R60N6 = \begin{bmatrix} 76.141 \\ 1.561 \\ -4.695 \end{bmatrix}$$



$$R_{60p5} := R_{56}^T \cdot R_{50p5} \quad R_{50p4} := R_{45}^T \cdot R_{40p4} \quad R_{40p3} := R_{34}^T \cdot R_{30p3}$$

$$R_{30p2} := R_{23}^T \cdot R_{20p2} \quad R_{20p1} := R_{12}^T \cdot R_{10p1}$$

momen ( ${}^iR_o n_i$ ) :

$${}^iR_o n_i = {}^iR_{i+1} * ({}^{i+1}R_o n_{i+1} + ({}^{i+1}R_o p_i \times {}^{i+1}R_o f_{i+1})) + (({}^iR_o p_i + {}_iR_o s_i) \times {}^iR_o F_i) + {}^iR_o N_i$$

$$R_{60n6} := ((R_{60p6} + (R_{60s6})) \times R_{60F6}) + R_{60N6}$$

$$R_{50n5} := R_{56}(R_{60n6} + ((R_{60p5}) \times R_{60f6})) + ((R_{50p5} + (R_{50s5})) \times R_{50F5}) + R_{50N5}$$

$$R_{40n4} := R_{45}(R_{50n5} + ((R_{50p4}) \times R_{50f5})) + ((R_{40p4} + (R_{40s4})) \times R_{40F4}) + R_{40N4}$$

$$R_{30n3} := R_{34}(R_{40n4} + ((R_{40p3}) \times R_{40f4})) + ((R_{30p3} + (R_{30s3})) \times R_{30F3}) + R_{30N3}$$

$$R_{20n2} := R_{23}(R_{30n3} + ((R_{30p2}) \times R_{30f3})) + ((R_{20p2} + (R_{20s2})) \times R_{20F2}) + R_{20N2}$$

$$R_{10n1} := R_{12}(R_{20n2} + ((R_{20p1}) \times R_{20f2})) + ((R_{10p1} + (R_{10s1})) \times R_{10F1}) + R_{10N1}$$

$$R_{60n6} = \begin{bmatrix} 75.557 \\ -3.771 \\ -4.697 \end{bmatrix} \quad R_{50n5} = \begin{bmatrix} -6.723 \\ 75.009 \\ 14.725 \end{bmatrix} \quad R_{40n4} = \begin{bmatrix} 49.5 \\ -32.039 \\ -55.129 \end{bmatrix} \quad R_{30n3} = \begin{bmatrix} 58.007 \\ -73.432 \\ 186.102 \end{bmatrix}$$

$$R_{10n1} = \begin{bmatrix} 224.974 \\ 925.402 \\ 71.465 \end{bmatrix} \quad R_{20n2} = \begin{bmatrix} -216.254 \\ 62.208 \\ 925.402 \end{bmatrix}$$

Torsi yang diperlukan link-i ( $\tau_i$ ) dalam Nm

$$\tau_i = ({}^iR_o n_i)^T * {}^iR_{i-1} * z + b_i q_i \text{ faktor redaman } b \text{ diabaikan, maka } \tau_i = ({}^iR_o n_i)^T * {}^iR_{i-1} * z$$

$$\tau_6 := (R_{60n6}^T) \cdot R_{65}z \quad \tau_5 := (R_{50n5}^T) \cdot R_{54}z \quad \tau_4 := (R_{40n4}^T) \cdot R_{43}z$$

$$\tau_3 := (R_{30n3}^T) \cdot R_{32}z \quad \tau_2 := (R_{20n2}^T) \cdot R_{21}z \quad \tau_1 := (R_{10n1}^T) \cdot R_{10}z$$

$$\tau_1 = [1.291.10^3]$$

$$\tau_2 = [1.183.10^3]$$

$$\tau_3 = (-993.572)$$

$$\tau_4 = (-32.039)$$

$$\tau_5 = (-75.009)$$

$$\tau_6 = (-3.771)$$

### III.C. Motor Listrik dan Kontroller

Pada perancangan ulang Robot Kawasaki FS30L ini, motor listrik yang dipakai ditentukan terlebih dahulu sesuai dengan data yang diambil dari Kawasaki untuk kemudian dijadikan acuan dalam melakukan perhitungan sistem transmisi yang akan digunakan. Data tersebut dapat kita lihat pada tabel III.C.1. dibawah ini.

**Tabel III.C.1. FS30L-series Servo Motors**

Motor model No.	Rating	Joint No.	Cont.Torque @ Max.Speed N-m (kg-cm)	Max. Speed (RPM)	Weight
P80B22450RCX2A	4.2 kW	1,2	16.66 (170.0)	2730	30.6
P60B13200LCX23	3.1 kW	3	9.80 (100.0)	3000	13.2
P50B08100VCXS9	1.0 kW	4,5,6	3.19 (32.5)	4000	5.7

Dari tabel diatas terlihat bahwa Robot FS30L ini menggunakan Servo Motor untuk menggerakkan manipulatornya. Tipe servomotor yang digunakan adalah tipe AC Brushless Servo Motor, yang memiliki kelebihan akurasi dan ketelitian yang tinggi karena posisi motor selalu dikontrol oleh *absolut encoder* yang memberikan *feedback* dalam suatu sistem tertutup (*close-loop system*).

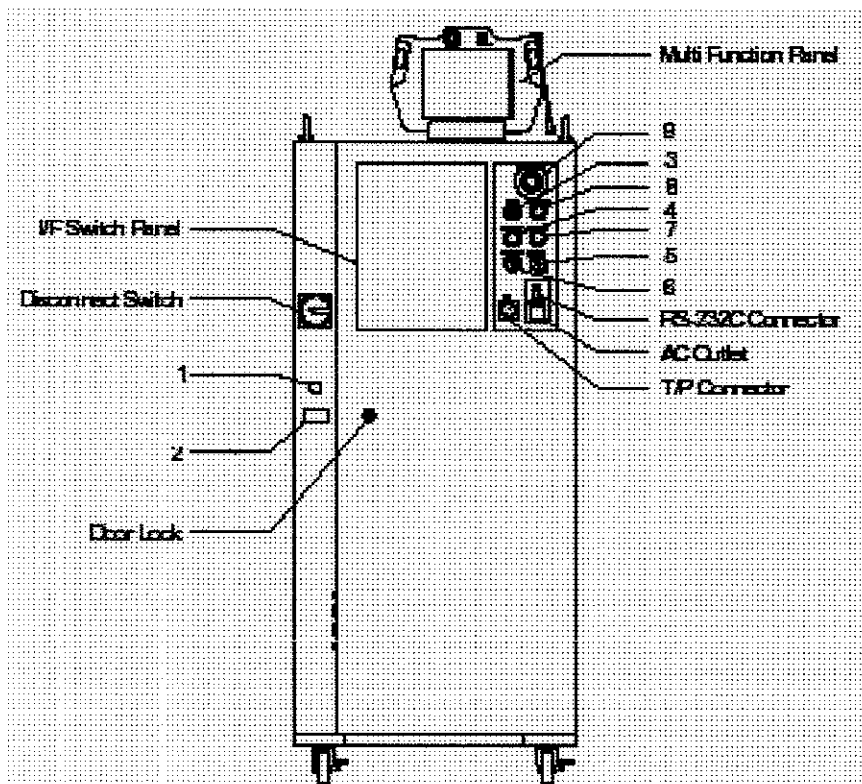
Kelebihan dari AC servomotor ini adalah tidak memerlukan penggantian sikat seperti Brushless motor sehingga perawatannya lebih mudah, serta panas yang timbul dapat lebih mudah keluar dikarenakan kumparan jangkar berada diluar.



Kontroller yang dipakai oleh Robot FS30L ini adalah tipe C-Controller yang dikombinasikan dengan *teach pendant* dan *display unit*. Kelebihan yang dimiliki oleh kontroller ini adalah<sup>14</sup>:

### 1. Compact Size

C controller memiliki bentuk yang kecil dan ramping dengan dimensi lebar 550 mm, tinggi 1.250 mm dan tebal 500 mm, sehingga hanya memerlukan ruang yang kecil dengan perawatan dapat dilakukan hanya dari depan.

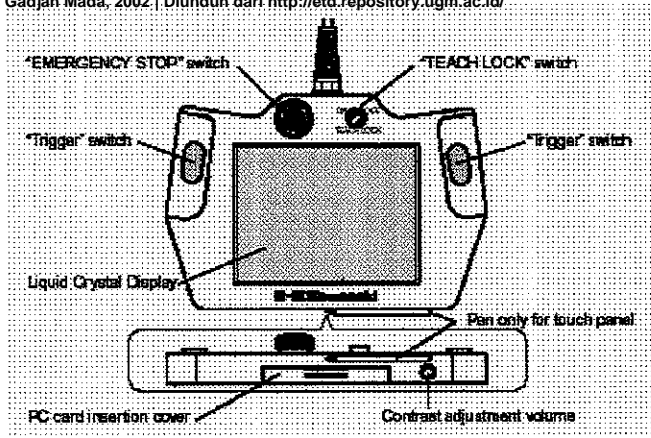


Gambar III.C.1. C-Controller

### 2. Multifunctional Panel

Dapat digunakan sebagai *teach pendant* pada saat melakukan *teaching*, sebagai *input/output screen* saat *data setting* atau *display screen* pada saat *running*.

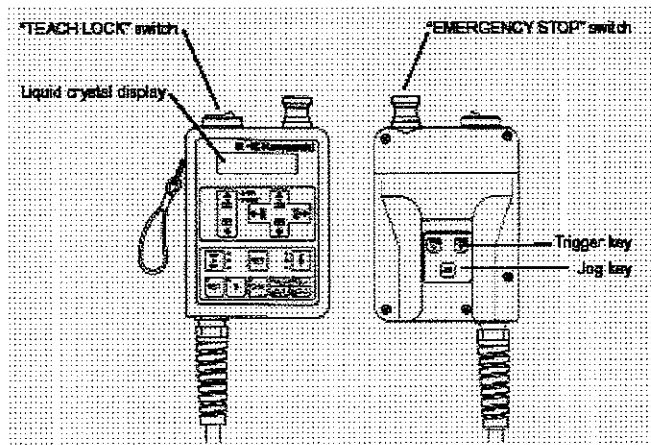
<sup>14</sup> Katalog Kawasaki Robot F-Series, Kawasaki Heavy Industries.Ltd.



**Gambar III.C.2. Multi Function Panel**

3. *Small Sized Teach-Pendant*

*Small sized Teach-Pendant* sangat cocok untuk proses *teaching*, *modifying* dan *checking* dari gerakan tergantung kebutuhan.



**Gambar III.C.3. Small Sized Teach Pendant**

4. *High Performance Vision Available*

*High performance vision board* dapat dipasang pada kontroler sebagai peralatan tambahan.

5. *High Level Function*

C controller menggunakan bahasa “As” untuk aplikasi yang luas yang tidak memerlukan PLC untuk program yang sederhana.



## 6. *Deadman Switch*

Merupakan peralatan keamanan standar yang akan mematikan motor secara otomatis ketika *switch panel* atau *teach pendant* terlepas.

## 7. *Variety of Optional Functions*

C controller memiliki bermacam-macam fungsi tambahan seperti *software program*, *dedicated arc welding devices* dan *communication buses*.

Ac servomotor terdiri dari beberapa bagian utama yakni:

- *Permanent magnet rotor*
- *Stator windings*
- *24 VDC brake Assembly*
- *Encoder Assembly*

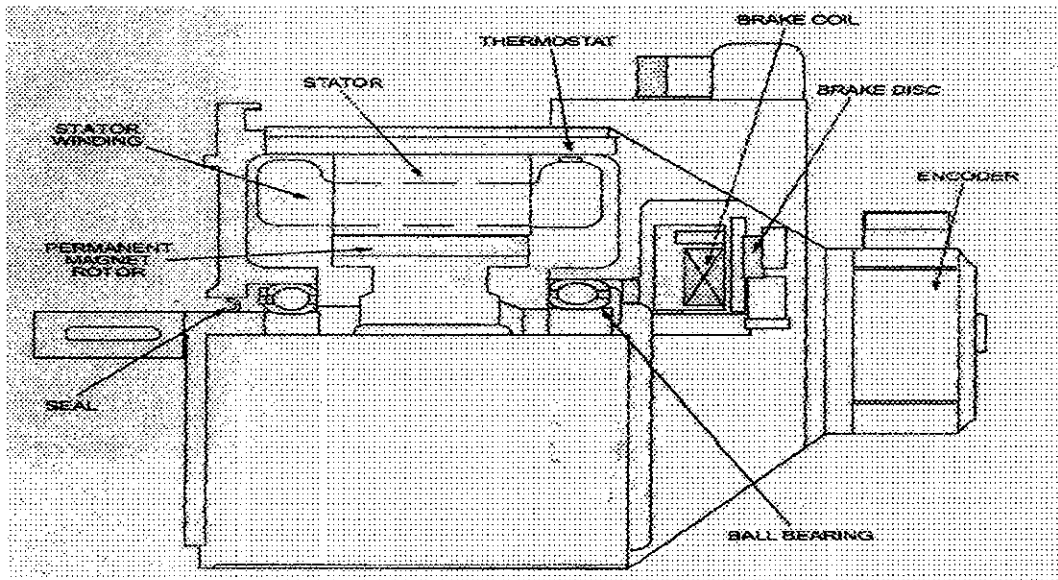
Rotor merupakan bagian berputar yang terbuat dari magnet permanen, dengan 6 kutub terbuat dari *rare-earth* (re-CO) atau Neodymium-iron (Ne-Fe). Sedangkan stator merupakan bagian yang diam mengelilingi rotor dan menerima sinyal elektrik 3 fase (U, V, W) dari *power modules*.

Motor menerima *pulsed electrical drive signal* dari *power block* IPMs dan berputar sesuai dengan sinyal yang masuk, untuk kemudian mengirimkan *velocity feedback signals* kepada 1GB *servo Board* melalui Encoder yang terpasang pada poros motor.

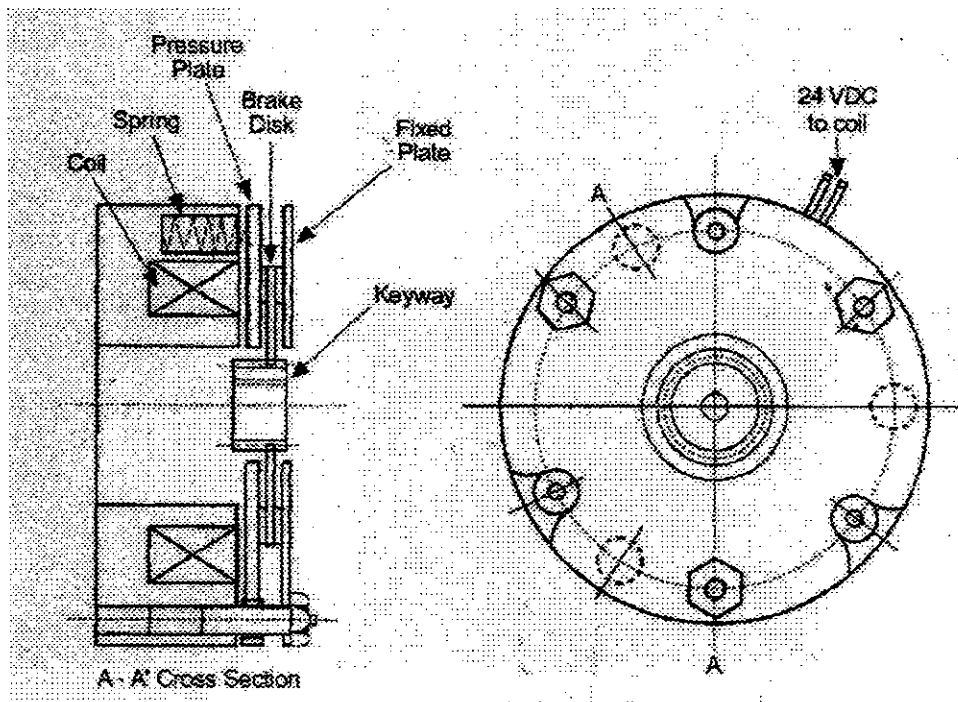
Mekanisme pengereman yang terdapat pada AC servomotor ini menggunakan sistem elektromagnetik dimana sistem pengereman menggunakan *spring*, *brake disc*, *pressure plate* dan *brake coil*. Sistem pengereman elektromagnetik dikontrol oleh 1GB Board, 1GB Board menghasilkan RGSO signal untuk menggerakkan servomotor, dan /BRK\_REQ signal untuk menghentikan pengereman. Sebelum melepaskan rem, RGSO signal membangkitkan servomotor untuk menjaga posisi poros. Kemudian brake release signal diteruskan kepada solid state relays pada 1GB board, yang membangkitkan tegangan 24 VDC kepada brake coil. Ketika arus listrik 24 VDC mengalir kedalam *coil* untuk seterusnya membuat magnet induksi sehingga menarik *pressure plate* menjauhi



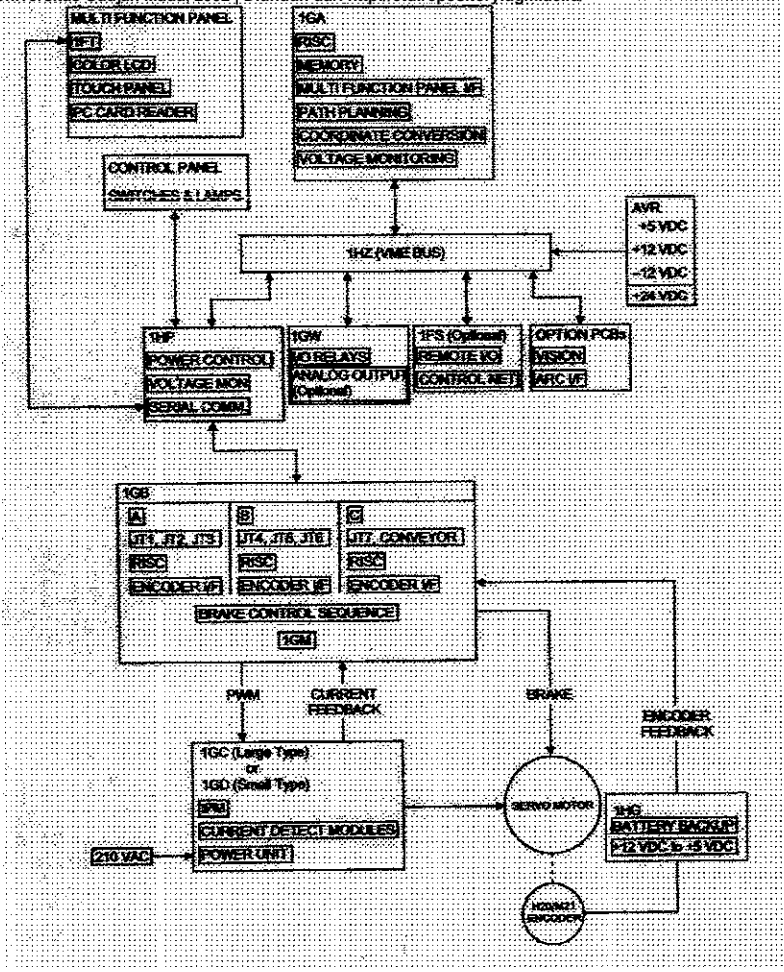
*brake disc* yang terhubung dengan poros motor. Pengereman dilakukan pada saat *emergency stop, hold condition* atau pada saat akhir gerakan.



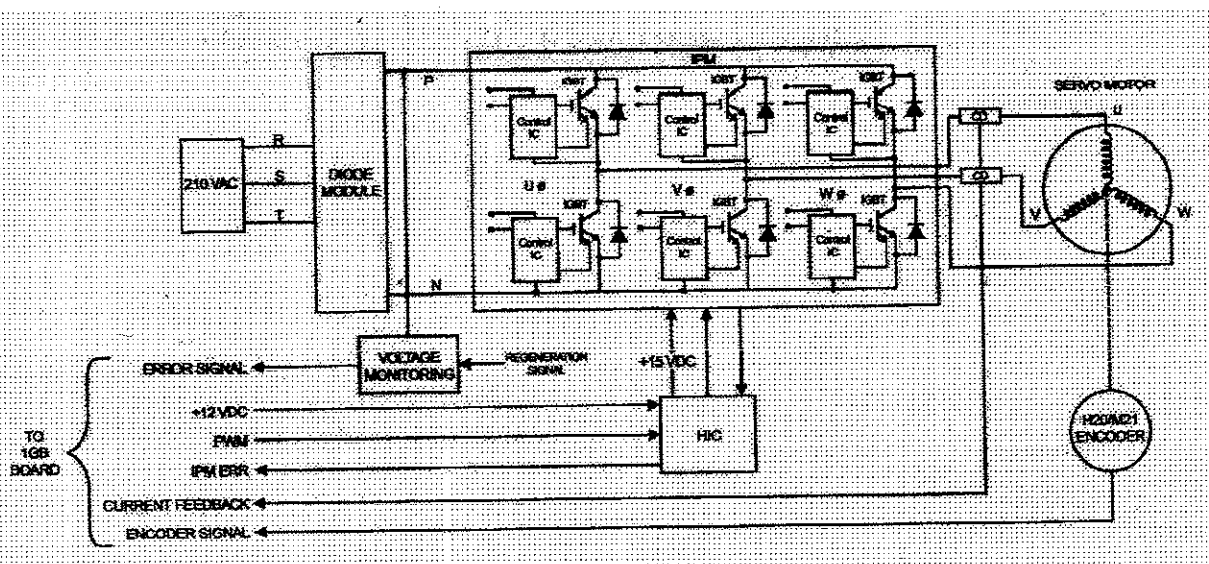
**Gambar III.C.4. AC-Servomotor**



**Gambar III.C.5. Brake Assembly**



Gambar III.C.6. Circuit Block Diagram



Gambar III.C.7. Servo Amplifier Block Diagram



Motor listrik juga memiliki sistem pengaman panas yakni thermostat, yang akan membuka pada suhu  $130^{\circ}\text{C}$  ( $266^{\circ}\text{F}$ ) sehingga motor listrik akan berhenti dan akan menutup kembali ketika motor telah kembali dingin.

Encoder yang digunakan pada AC servomotor ini menggunakan seri H20 Encoder dengan spesifikasinya terlihat pada tabel III.C.2. dibawah ini.

**Tabel III.C.2. Spesifikasi Encoder**

Electrical Spesification	Optical Encoder	Magnetic Encoder
Type	Optical Disk	Magnetic Incremental
Power	5 DC $\pm$ 0.25 V	3.6 VDC or more
Current Consumption	180 mA	25 $\mu$ A
Resolution	2 <sup>13</sup> (8,192) Revolutions	1/Revolution
Response	6000 RPM	
Countable Rotations	2 <sup>16</sup> (65,536) Revolutions	
Operating Temperature	-20 <sup>0</sup> - +80 <sup>0</sup> C	
Storage Temperature	-20 <sup>0</sup> - +80 <sup>0</sup> C	
Humidity	95 % RH or less, no dew condensation	
Vibration	10G, 6 ms or less	
Impact	100G, 6 ms or less	
Miscellaneous	Dustproof, water and oil resistant	

Fungsi dari encoder adalah untuk mengetahui putaran motor dan waktu untuk pembalikan arus. Data yang diperoleh encoder berupa *absolute position*, *speed*, *direction of rotation*, dan *elignment* dari *rotor magnets* dengan kutub stator. Encoder memberikan 48 bits data lewat *half duplex serial communications* kepada 1GB board dengan kecepatan 1 MB/sec.

**III.D. Perhitungan Sistem Transmisi pada Tiap Joint**

Pada perhitungan dinamik untuk masing-masing *joint* pada posisi kritisnya guna mengetahui torsi maksimum yang dialami tiap-tiap *joint*, kemudian untuk masing-masing *joint* dipilih harga torsi terbesar dari keenam posisi tersebut, didapatkan hasil :

$$\tau_1 = 1291 \text{ N.m}$$

$$\tau_2 = 1183 \text{ N.m}$$

$$\tau_3 = 993,572 \text{ N.m}$$

$$\tau_4 = 204,78 \text{ N.m}$$

$$\tau_5 = 248,709 \text{ N.m}$$

$$\tau_6 = 116,685 \text{ N.m}$$

Torsi yang didapatkan dari hasil perhitungan ini selanjutnya akan digunakan sebagai acuan dalam merancang sistem transmisi robot. Torsi tersebut akan digunakan sebagai penggerak untuk masing-masing *link* yang menggunakan sumber tenaga dari motor listrik.

Putaran maksimum yang dialami tiap-tiap *joint* juga akan menjadi dasar pertimbangan dalam pemilihan sistem transmisi robot. Dari data spesifikasi robot yang tertera pada katalog, kita dapat menghitung putaran maksimum yang dialami tiap-tiap *joint* dengan hasil sebagai berikut :

$$n_1 = 26,667 \text{ rpm}$$

$$n_2 = 23,333 \text{ rpm}$$

$$n_3 = 26,667 \text{ rpm}$$

$$n_4 = 40 \text{ rpm}$$

$$n_5 = 40 \text{ rpm}$$

$$n_6 = 56,667 \text{ rpm}$$

pada perancangan sistem transmisi ini yang perlu diperhatikan adalah efisiensi daya yang akan diberikan oleh motor listrik, sehingga perlu diperhatikan dimensi roda gigi yang tepat untuk dapat menggerakkan masing-masing *link*.

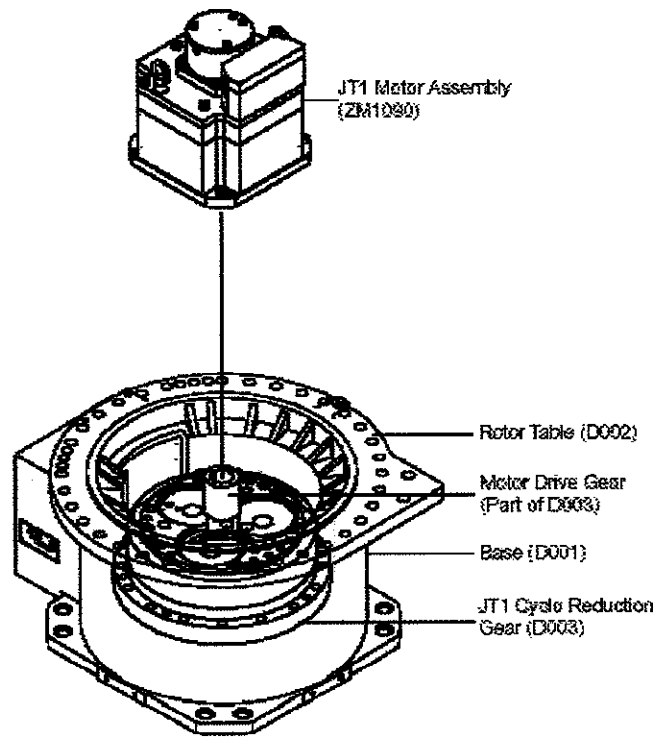
**III.D.1. Perancangan transmisi joint 1**

Sistem transmisi untuk *joint* 1 diperhitungkan menggunakan *Reduction Gear* dalam hal ini adalah *Planetary Gear* 3 tingkat guna menggerakkan *link* 1 dengan gerak



rotasi horizontal terhadap *base*. Pemilihan *Planetary Gear* 3 tingkat untuk *joint* 1 didasarkan pada fakta bahwa torsi yang akan digerakkan cukup besar sedangkan motor yang dipakai harus seringan dan sekecil mungkin untuk menggerakkan *link* 1 dengan kecepatan angular yang cukup baik. *Planetary Gear* ini juga memiliki keunggulan dalam hal kekakuan, karena dapat menghindari adanya putaran balik dari poros *output* ke poros *input* dikarenakan adanya tiga buah pinion gear.

Sketsa gambar roda gigi tersebut dapat terlihat dibawah ini :



Gambar III.D.1. Sistem transmisi joint 1

Dari gambar diatas terlihat *Cyclo Reduction Gear/Planetary Gear* yang terdiri dari 5 buah roda gigi, masing-masing adalah tiga buah sun gear (1,3,5), 9 buah pinion gear (2,4,6), dan tiga buah ring gear (7,8,9). 15 buah roda gigi tersebut merupakan roda gigi lurus standar.



*Sun gear* (1) terhubung dengan *motor drive gear* yang langsung digerakkan oleh motor listrik, yang selanjutnya menggerakkan 3 buah roda gigi pinion (2), untuk itu berlaku persamaan umum untuk roda gigi lurus:

$$i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{n_1}{n_2} \text{ atau } d_1 \cdot n_1 = d_2 \cdot n_2$$

*Pinion gear* (2) selanjutnya akan berusaha memutar *ring gear* (7), namun karena pada konstruksi ini *ring gear* tidak berevolusi, maka *pinion gear* berputar berevolusi terhadap sun gear, putaran evolusi tersebut merupakan output putaran tingkat 1 dari reduction unit dan menjadi putaran input untuk tingkat selanjutnya, demikian seterusnya.

### Perhitungan Roda gigi

Ring gear dan pinion gear merupakan roda gigi lurus, dan untuk lebih memudahkan perhitungan diasumsikan bahwa ring gear merupakan roda gigi lurus biasa (outer gear), kemudian diperhitungkan variabel utama sebagai berikut :

- Torsi joint 1 merupakan torsi arm, maka  $T_{\text{arm}} = \tau_1 = 1291 \text{ N.m}$ , dengan putaran  $n_{\text{arm}} = 26,667 \text{ rpm}$

Faktor keamanan  $f_c = 1,25$ , maka Torsi untuk perencanaan, ( $T_d$ )

$$T_d = f_c \times \tau_1$$

$$T_d = 1,25 \times 1291 \text{ N.m} = 1613,75 \text{ N.m}$$

Dari Spesifikasi motor<sup>14</sup> yang dipilih diketahui :

Motor Model	: P80B22450RCX2A
Daya Output	: 4,2 kW
Torsi	: 16660 N.mm (1700 kg.mm)
Kecepatan max	: 2730 rpm

<sup>14</sup> Lampiran



Rasio kecepatan,

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1}$$

$$i = \frac{2730}{26,667} = 102,375$$

$$T = T_d \cdot i$$

$$\text{Cek Torsi } T = 16660 \cdot 102,375 = 1705567,5 \text{ N.mm} = 1705,5675 \text{ N.m}$$

Karena  $T > T_d$ , motor listrik dapat digunakan.

- Modul,  $m = 5$  dan sudut kontak,  $\alpha_0 = 20^\circ$

$$d_o = z \cdot m$$

Diameter lingkaran jarak bagi *Ring Gear*  $d_{o7} = d_{o8} = d_{o9} = 385 \text{ mm}$

Jumlah gigi *Ring Gear*  $z_7 = z_8 = z_9 = 385/5 = 77$

Jumlah gigi *Sun Gear*  $z_1 = z_3 = z_5 = 27$

$$z_{\text{planet Gear}} = (z_{\text{ring Gear}} - z_{\text{sun Gear}})/2$$

Jumlah gigi *Planet Gear*  $z_2 = z_4 = z_6 = (77 - 27)/2 = 25$

- $$i = \left( 1 + \frac{z_{\text{ring Gear}}}{z_{\text{sun Gear}}} \right)$$

Cek rasio kecepatan setiap *Planetary Gear*  $i_r = \left( 1 + \frac{77}{27} \right) = 3,852$

Cek rasio kecepatan *Reduction Unit*  $i = \left( 1 + \frac{77}{27} \right)^3 = 57,149$

- Cek torsi output  $T_{out} = 16660 \cdot 57,149 = 952102,5372 \text{ N.mm} = 952,1025 \text{ N.m}$

- Diameter lingkaran jarak bagi (mm)  $d_o = z \cdot m$

Diameter lingkaran jarak bagi *Sun Gear*  $d_{o1} = d_{o3} = d_{o5} = 27 \cdot 5 = 135 \text{ mm}$

Diameter lingkaran jarak bagi *Planet Gear*  $d_{o7} = d_{o8} = d_{o9} = 25 \cdot 5 = 125 \text{ mm}$

Kelonggaran sisi,  $C_o = 0$  dan kelonggaran puncak,  $c_k = 0,25 \cdot 5 = 1,25 \text{ mm}$



Diameter lingkaran kepala (mm)  $d_k = (z + 2)m$

Diameter lingkaran kepala *Sun Gear*  $d_{k1} = d_{k3} = d_{k5} = (27 + 2) \cdot 5 = 145 \text{ mm}$

Diameter lingkaran kepala *Planet Gear*  $d_{k2} = d_{k4} = d_{k6} = (25 + 2) \cdot 5 = 135 \text{ mm}$

Diameter kepala (mm)  $d_k = (z - 2)m$

Diameter lingkaran kepala *Ring Gear*  $d_{k7} = d_{k8} = d_{k9} = (77 - 2) \cdot 5 = 375 \text{ mm}$

- Diameter kaki (mm)  $d_f = (z - 2)m - 2c_k$

Diameter lingkaran kaki *Sun Gear*  $d_{f1} = d_{f3} = d_{f5} = (27 - 2) \cdot 5 - 2 \cdot 1,25 = 122,5 \text{ mm}$

Diameter lingkaran. kaki *Planet Gear*  $d_{f2} = d_{f4} = d_{f6} = (25 - 2) \cdot 5 - 2 \cdot 1,25 = 112,5 \text{ mm}$

Diameter kaki (mm)  $d_f = (z + 2)m + 2c_k$

Diameter lingkaran. kaki *Sun Gear*  $d_{f7} = d_{f8} = d_{f9} = (77 + 2) \cdot 5 + 2 \cdot 1,25 = 397,5 \text{ mm}$

- Faktor bentuk<sup>15</sup>  $Y_1=Y_3=Y_5 = 0,349$  ;  $Y_2=Y_4=Y_6 = 0,339$  ;  $Y_7=Y_8=Y_9 = 0,435$

- Kecepatan roda gigi *Ring Gear*  $n_7 = n_8 = n_9 = 0$

Kecepatan roda gigi 1 (*Sun Gear*)  $n_1 = 2730 \text{ rpm}$

Kecepatan roda gigi 2 (*Planet Gear*)  $n_2 = 2730 \cdot 27/25 = 2948,4 \text{ rpm}$

Kecepatan roda gigi 3 (*Sun Gear*)  $n_3 = 2730 \cdot (1 + 27/77) = 708,75 \text{ rpm}$

Kecepatan roda gigi 4 (*Planet Gear*)  $n_4 = 708,75 \cdot 27/25 = 765,45 \text{ rpm}$

Kecepatan roda gigi 5 (*Sun Gear*)  $n_5 = 708,75 \cdot (1 + 27/77) = 184,002 \text{ rpm}$

Kecepatan roda gigi 6 (*Planet Gear*)  $n_6 = 184,002 \cdot 27/25 = 198,722 \text{ rpm}$

- Kecepatan keliling (m/s)  $v = \frac{\pi d_o n}{60 \cdot 1000}$

Kecepatan keliling roda gigi 1  $v_1 = \pi \cdot 135 \cdot 2730 / 60 / 1000 = 19,297 \text{ m/s}$

Kecepatan keliling roda gigi 2  $v_2 = \pi \cdot 125 \cdot 2948,4 / 60 / 1000 = 19,297 \text{ m/s}$

<sup>15</sup> Lampiran



UNIVERSITAS  
 GADJAH MADA

Kecepatan keliling roda gigi 3  $v_3 = \pi.135.708,75/60/1000 = 5,009 \text{ m/s}$

Kecepatan keliling roda gigi 4  $v_4 = \pi.125.765,45/60/1000 = 5,009 \text{ m/s}$

Kecepatan keliling roda gigi 5  $v_5 = \pi.135.184,002/60/1000 = 1,3 \text{ m/s}$

Kecepatan keliling roda gigi 6  $v_6 = \pi.125.198,722/60/1000 = 1,3 \text{ m/s}$

- Torsi pada roda gigi 1  $T_1 = 1700 \text{ kg.mm}$   
 Torsi pada roda gigi 2  $T_2 = 1700.25/27/3 = 524,691 \text{ kg.mm}$   
 Torsi pada roda gigi 3  $T_3 = 1700.(1+77/27) = 6548,148 \text{ kg.mm}$   
 Torsi pada roda gigi 4  $T_4 = 6548,148.25/27/3 = 2021,033 \text{ kg.mm}$   
 Torsi pada roda gigi 5  $T_5 = 6548,148.(1+77/27) = 25222,496 \text{ kg.mm}$   
 Torsi pada roda gigi 6  $T_6 = 25222,496.25/27/3 = 7784,721 \text{ kg.mm}$
- Gaya tangensial (kg)  $F_t = \frac{2T}{d_o}$   
 Gaya tangensial pada roda gigi 1  $F_{t1} = 2.1700/135 = 25.185 \text{ kg}$   
 Gaya tangensial pada roda gigi 2  $F_{t2} = 2.524,691/125 = 8,395 \text{ kg}$   
 Gaya tangensial pada roda gigi 3  $F_{t3} = 2.6548,148/135 = 97,009 \text{ kg}$   
 Gaya tangensial pada roda gigi 4  $F_{t4} = 2.2021,033/125 = 32,336 \text{ kg}$   
 Gaya tangensial pada roda gigi 5  $F_{t5} = 2.25222,496/135 = 373,666 \text{ kg}$   
 Gaya tangensial pada roda gigi 6  $F_{t6} = 2.7784,721/125 = 124,555 \text{ kg}$
- Faktor dinamis roda gigi 1  $f_{v1} = 6/(6+19,297) = 0,237$   
 Faktor dinamis roda gigi 2  $f_{v2} = 6/(6+19,297) = 0,237$   
 Faktor dinamis roda gigi 3  $f_{v3} = 3/(3+5,009) = 0,374$   
 Faktor dinamis roda gigi 4  $f_{v4} = 3/(3+5,009) = 0,374$   
 Faktor dinamis roda gigi 5  $f_{v5} = 3/(3+1,3) = 0,697$   
 Faktor dinamis roda gigi 6  $f_{v6} = 3/(3+1,3) = 0,697$



• **Bahan roda gigi**<sup>16</sup>:

Roda Gigi 1, S 35 C,  $\sigma_a = 26 \text{ kg/mm}^2$ ,  $H_B = 150$

Roda Gigi 2, S 35 C,  $\sigma_a = 26 \text{ kg/mm}^2$ ,  $H_B = 150$

Roda Gigi 7, S 15 CK,  $\sigma_a = 30 \text{ kg/mm}^2$ ,  $H_B = 400$

Roda Gigi 3, S 45 C,  $\sigma_a = 30 \text{ kg/mm}^2$ ,  $H_B = 200$

Roda Gigi 4, S 45 C,  $\sigma_a = 30 \text{ kg/mm}^2$ ,  $H_B = 200$

Roda Gigi 8, S 15 CK,  $\sigma_a = 30 \text{ kg/mm}^2$ ,  $H_B = 400$

Roda Gigi 5, SNC 3,  $\sigma_a = 60 \text{ kg/mm}^2$ ,  $H_B = 300$

Roda Gigi 5, SNC 3,  $\sigma_a = 60 \text{ kg/mm}^2$ ,  $H_B = 300$

Roda Gigi 9, S 15 CK,  $\sigma_a = 30 \text{ kg/mm}^2$ ,  $H_B = 400$

- Faktor tegangan kontak antara roda gigi 1 dan 2  $k_{H1\&2} = 0,027 \text{ kg/mm}^2$   
 Faktor tegangan kontak antara roda gigi 2 dan 7  $k_{H2\&7} = 0,1077 \text{ kg/mm}^2$   
 Faktor tegangan kontak antara roda gigi 3 dan 4  $k_{H3\&4} = 0,053 \text{ kg/mm}^2$   
 Faktor tegangan kontak antara roda gigi 4 dan 8  $k_{H4\&8} = 0,1072 \text{ kg/mm}^2$   
 Faktor tegangan kontak antara roda gigi 5 dan 6  $k_{H5\&6} = 0,13 \text{ kg/mm}^2$   
 Faktor tegangan kontak antara roda gigi 6 dan 9  $k_{H6\&9} = 0,168 \text{ kg/mm}^2$

- Beban lentur yang diijinkan (kg)<sup>17</sup>  $F'_b = \sigma_b m Y_f v$

Beban lentur yang diijinkan per satuan lebar sisi untuk:

Roda gigi 1,  $F'_{b1} = 26.5.0,237.0,349 = 10,76 \text{ kg/mm}$

Roda gigi 2,  $F'_{b2} = 26.5.0,237.0,339 = 10,452 \text{ kg/mm}$

Roda gigi 7,  $F'_{b7} = 30.5.0,237.0,435 = 15,476 \text{ kg/mm}$

Roda gigi 3,  $F'_{b3} = 30.5.0,374.0,349 = 19,607 \text{ kg/mm}$

Roda gigi 4,  $F'_{b4} = 30.5.0,374.0,339 = 19,045 \text{ kg/mm}$

Roda gigi 8,  $F'_{b8} = 30.5.0,374.0,435 = 24,438 \text{ kg/mm}$

Roda gigi 5,  $F'_{b5} = 60.5.0,697.0,349 = 73,035 \text{ kg/mm}$

Roda gigi 6,  $F'_{b6} = 60.5.0,697.0,339 = 70,942 \text{ kg/mm}$

<sup>16</sup> Lampiran



Roda gigi 9,  $F'_{b9} = 30.5.0,697.0,435 = 45,516 \text{ kg/mm}$

- Beban permukaan yang diijinkan (kg)  $F'_H = f_v k_H d_{O1} \frac{2z_2}{z_1 + z_2}$

Beban permukaan yang diijinkan per satuan lebar sisi antara:

Roda gigi 1 dan 2,  $F'_{H1\&2} = 0,237.0,027.135.2.27/(27+25) = 0,831 \text{ kg/mm}$

Roda gigi 2 dan 7,  $F'_{H2\&7} = 0,237.0,1077.125.2.25/(25+77) = 4,821 \text{ kg/mm}$

Roda gigi 3 dan 4,  $F'_{H3\&4} = 0,374.0,053.135.2.27.(27+77) = 2,576 \text{ kg/mm}$

Roda gigi 4 dan 8,  $F'_{H4\&8} = 0,374.0,1072.125.2.25/(25+77) = 7,577 \text{ kg/mm}$

Roda gigi 5 dan 6,  $F'_{H5\&6} = 0,697.0,13.135.2.27.(27+77) = 11,771 \text{ kg/mm}$

Roda gigi 6 dan 9,  $F'_{H6\&9} = 0,697.0,168.125.2.25/(25+77) = 22,117 \text{ kg/mm}$

- $F'_b$  dan  $F'_H$  yang diperoleh pada perhitungan diatas dipilih yang terkecil, yaitu:

Roda gigi 1 dan 2  $F'_{1\&2} = 0,831 \text{ kg/mm}$

Roda gigi 2 dan 7  $F'_{2\&7} = 4,82 \text{ kg/mm}$

Roda gigi 3 dan 4  $F'_{3\&4} = 2,57 \text{ kg/mm}$

Roda gigi 4 dan 8  $F'_{4\&8} = 7,577 \text{ kg/mm}$

Roda gigi 5 dan 6  $F'_{5\&6} = 11,771 \text{ kg/mm}$

Roda gigi 6 dan 9  $F'_{6\&9} = 22,117 \text{ kg/mm}$

- Lebar sisi minimum (mm)  $b = \frac{F'_t}{F'}$

Lebar sisi min. untuk roda gigi 1 dan 2  $b_{1\&2} = 25,185/0,831 = 30,297 \text{ mm}$

Lebar sisi min. untuk roda gigi 2 dan 7  $b_{2\&7} = 8,395/4,82 = 1,741 \text{ mm}$

Lebar sisi min. untuk roda gigi 3 dan 4  $b_{3\&4} = 97,009/2,576 = 37,648 \text{ mm}$

Lebar sisi min. untuk roda gigi 4 dan 8  $b_{4\&8} = 32,336/7,577 = 4,267 \text{ mm}$

Lebar sisi min. untuk roda gigi 5 dan 6  $b_{5\&6} = 373,666/11,771 = 31,743 \text{ mm}$

Lebar sisi min. untuk roda gigi 6 dan 9  $b_{6\&9} = 124,555/22,117 = 5,631 \text{ mm}$

<sup>17</sup> Suga Kiyokatsu, Sularso, Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin, hal 240



Dipilih lebar sisi  $b = 31 \text{ mm}$

Dilakukan pengecekan  $b/m = 31/5 = 6,2$  sehingga memenuhi  $6 \leq b/m \leq 10$

Dilakukan pengecekan  $d_{o1}/b = 135/31 = 4,354$  maka memenuhi  $d_{o1}/b \geq 1,33$

Dilakukan pengecekan  $d_{o2}/b = 125/31 = 4,032$  maka memenuhi  $d_{o2}/b \geq 1,33$

### Perhitungan Poros

Untuk perhitungan poros roda gigi pada planetary gear joint 1 digunakan bahan S 30 C untuk setiap porosnya, yang memiliki tegangan tarik  $\sigma_B = 48 \text{ kg/mm}^2$  dengan mengambil  $Sf_1 = 6$  dan  $Sf_2 = 1,3$ .

Harga  $K_t = 1,5$  untuk pembebanan yang terjadi sedikit kejutan,  $C_b = 2$  untuk beban lentur.

- Tegangan geser ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )  $\tau_a = \sigma_B / (Sf_1 \times Sf_2)$

$$\tau_a = 48 / (6 \cdot 1,3) = 6,153 \text{ kg/mm}^2$$

- Diameter poros minimum (mm)  $d_s = \left( \frac{5,1}{\tau_a} K_t C_b T \right)^{1/3}$

$$\text{Diameter poros roda gigi 1 } d_{s1} = (5,1 \cdot 1,5 \cdot 2 \cdot 1700 / 6,153)^{1/3} = 16,168 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter poros roda gigi 2 } d_{s2} = (5,1 \cdot 1,5 \cdot 2 \cdot 524,691 / 6,153)^{1/3} = 10,926 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter poros roda gigi 3 } d_{s3} = (5,1 \cdot 1,5 \cdot 2 \cdot 6548,148 / 6,153)^{1/3} = 25,344 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter poros roda gigi 4 } d_{s4} = (5,1 \cdot 1,5 \cdot 2 \cdot 2021,033 / 6,153)^{1/3} = 17,127 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter poros roda gigi 5 } d_{s5} = (5,1 \cdot 1,5 \cdot 2 \cdot 25222,496 / 6,153)^{1/3} = 39,729 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter poros roda gigi 6 } d_{s6} = (5,1 \cdot 1,5 \cdot 2 \cdot 7784,72 / 6,153)^{1/3} = 26,849 \text{ mm}$$

- Diameter poros yang dipilih

$$\text{Diameter poros roda gigi 1 yang dipilih } d_{s1} = 20 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter poros roda gigi 2 yang dipilih } d_{s2} = 15 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter poros roda gigi 3 yang dipilih } d_{s3} = 30 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter poros roda gigi 4 yang dipilih } d_{s4} = 25 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter poros roda gigi 5 yang dipilih } d_{s5} = 40 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter poros roda gigi 6 yang dipilih } d_{s6} = 45 \text{ mm}$$



### Perhitungan Bantalan Peluru

GADJAH MADA

Pada perancangan sistem transmisi, bantalan peluru dipakai pada *planet gear*(2,4,6) sedang pada *sun gear*(1,3,5) dan *ring gear*(7,8,9) tidak memakai bantalan.

- Umur bantalan nominal  $L_h = 50000$  jam
- Torsi pada roda gigi 1  $T_1 = 16660$  N.mm

Torsi pada roda gigi 2  $T_2 = 16660.25/27/3 = 5141,975$  N.mm

Torsi pada roda gigi 3  $T_3 = 16660.(1+77/27) = 64171,851$  N.mm

Torsi pada roda gigi 4  $T_4 = 64171,851.25/27/3 = 19806,127$  N.mm

Torsi pada roda gigi 5  $T_5 = 19806,127.(1+77/27) = 247180,466$  N.mm

Torsi pada roda gigi 6  $T_6 = 247180,466.25/27/3 = 76290,267$  N.mm

- Gaya tangensial (N)  $F_t = \frac{2T}{d_o}$

Gaya tangensial pada roda gigi 1  $F_{t1} = 2.16660/135 = 246,814$  N

Gaya tangensial pada roda gigi 2  $F_{t2} = 2.5141,975/125 = 82,271$  N

Gaya tangensial pada roda gigi 3  $F_{t3} = 2.64171,851/135 = 950,694$  N

Gaya tangensial pada roda gigi 4  $F_{t4} = 2.19806,127/125 = 316,898$  N

Gaya tangensial pada roda gigi 5  $F_{t5} = 2.247180,466/135 = 3661,932$  N

Gaya tangensial pada roda gigi 6  $F_{t6} = 2.76290,267/125 = 1220,644$  N

- Gaya radial yang terjadi (N)  $F_r = F_t \tan \alpha_o$

Gaya radial pada roda gigi 1  $F_{r1} = 246,814.\tan 20^\circ = 89,833$  N

Gaya radial pada roda gigi 2  $F_{r2} = 82,271.\tan 20^\circ = 29,944$  N

Gaya radial pada roda gigi 3  $F_{r3} = 950,694.\tan 20^\circ = 346,024$  N

Gaya radial pada roda gigi 4  $F_{r4} = 316,898.\tan 20^\circ = 115,341$  N

Gaya radial pada roda gigi 5  $F_{r5} = 3661,932.\tan 20^\circ = 1332,834$  N

Gaya radial pada roda gigi 6  $F_{r6} = 1220,644.\tan 20^\circ = 444,278$  N

- Diasumsikan bantalan tidak mengalami gaya aksial sehingga:  
 Beban ekivalen pada bantalan roda gigi 2  $F_2 = F_{r2} = 29,944$  N



Beban ekuivalen pada bantalan roda gigi 4  $F_4 = F_{r4} = 115,341 \text{ N}$

Beban ekuivalen pada bantalan roda gigi 6  $F_6 = F_{r6} = 444,278 \text{ N}$

- Beban nominal dinamis (N)  $C = F \sqrt[3]{60 \cdot 10^{-6} L_h n}$

$$\text{Bantalan roda gigi 2 } C_2 = 29,944 \sqrt[3]{50000 \cdot 2948,4 \cdot 60 \cdot 10^{-6}} = 619,277 \text{ N}$$

$$\text{Bantalan roda gigi 4 } C_4 = 115,341 \sqrt[3]{50000 \cdot 765,45 \cdot 60 \cdot 10^{-6}} = 1521,708 \text{ N}$$

$$\text{Bantalan roda gigi 6 } C_6 = 444,278 \sqrt[3]{50000 \cdot 198,722 \cdot 60 \cdot 10^{-6}} = 3739,192 \text{ N}$$

- Dipilih bantalan<sup>18</sup> untuk:

Roda gigi 2: bantalan no. 6302 dengan bilangan dukung dinamik  $C_2 = 895 \text{ N}$

Roda gigi 4: bantalan no. 6305 dengan bilangan dukung dinamik  $C_4 = 1610 \text{ N}$

Roda gigi 6: bantalan no. 6309 dengan bilangan dukung dinamik  $C_6 = 4150 \text{ N}$

- Umur bantalan  $L_{ha} = L_h \left( \frac{C_{SKF}}{C} \right)^p$

$$\text{Umur bantalan roda gigi 2 } L_{ha2} = 50000 \cdot (895/619,277)^3 = 150932,9081 \text{ jam}$$

$$\text{Umur bantalan roda gigi 4 } L_{ha4} = 50000 \cdot (1610/1521,708)^3 = 59217,942 \text{ jam}$$

$$\text{Umur bantalan roda gigi 6 } L_{ha6} = 50000 \cdot (4150/3739,19)^3 = 68356,65829 \text{ jam}$$

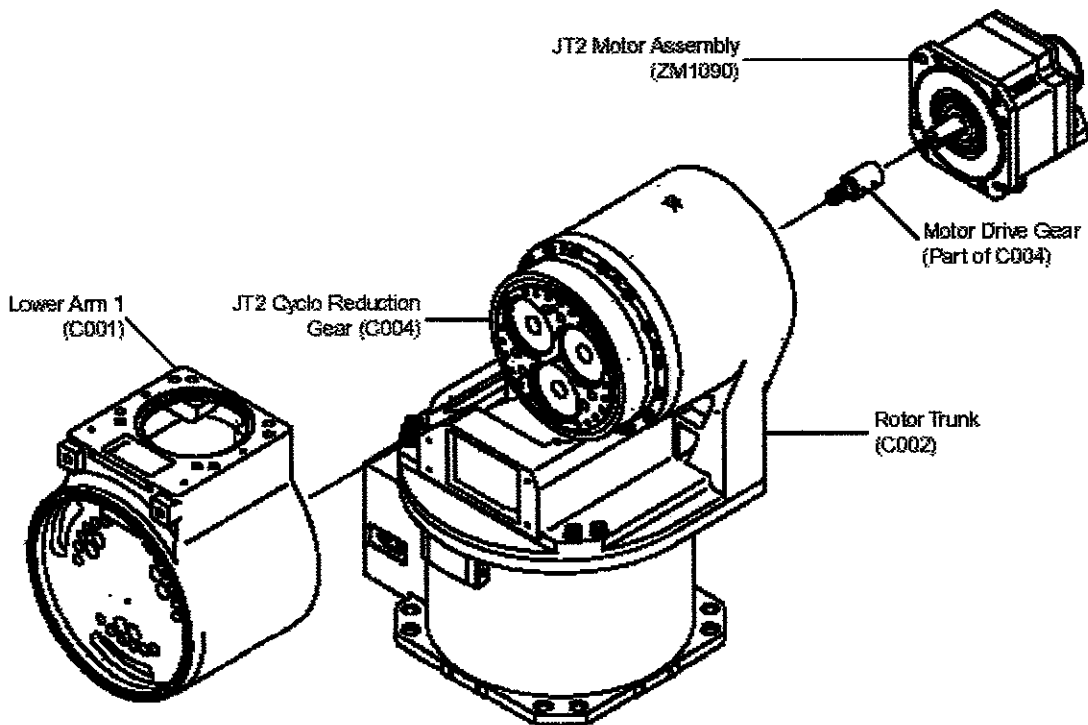
<sup>18</sup> Lampiran



### III.D.2. Perhitungan Transmisi joint 1,2

Untuk lebih memudahkan dan mempercepat proses perhitungan penulis menggunakan program *microsoft Exel* untuk perhitungan *joint1,2*, yang mempunyai sistem transmisi sama yakni *planetary gear* 3 tingkat, hanya dimensi atau ukuran masing-masing *joint* berbeda disesuaikan dengan motor listrik dan torsi masing-masing.

Sketsa gambar sistem transmisi *joint 2* tersebut dapat terlihat dibawah ini :



Gambar III.D.2. Sistem transmisi joint 2



**Tabel III.D.1. Perhitungan transmisi joint 1,2**

Keterangan	JT1	JT2
Torsi max dinamika (N.m)	1,291.0000	1,183.0000
fc	1.25	1.25
T torsi rencana (N.m)	1,613.7500	1,478.7500
P daya rencana (W)	4506.440129	3613.267884

### Spesifikasi Motor Listrik

Motor Model No	P80B22450RCX2A	P80B22450RCX2A
P daya motor listrik (kW)	4.2	4.2
n kecepatan putaran max (rpm)	2730	2730
T torsi (N.m)	16660	16660
T torsi (kg.cm)	1700	1700

### Perhitungan Reduction Unit

n out (derajat/sec)	160	140
n out (rpm)	26.66666667	23.33333333
i rasio	102.375	117
Cek T rencana (N.m)	1705.5675	1949.22
$\alpha$ , sudut tekan (derajat)	20	20
m modul	5	5
do3 (mm)	385	300
z3	77	60
z1	27	24
z2	25	18
cek i setiap <i>planetary gear</i>	3.851851852	3.5
cek i	57.14901184	42.875
Cek T <sub>out</sub> torsi output (N.m)	952.1025372	714.2975
do1 (mm)	135	120
do2 (mm)	125	90
ck kelonggaran puncak (mm)	1.25	1.25
dk1 diameter kepala (mm)	145	130
dk2 diameter kepala (mm)	135	100
dk3 diameter kepala (mm)	375	290
dfl diameter kaki (mm)	122.5	107.5



df2 diameter kaki (mm)	112.5	77.5
df3 diameter kaki (mm)	397.5	312.5
V1 faktor bentuk	0.349	0.336
V2 faktor bentuk	0.339	0.308
V3 faktor bentuk	0.435	0.421
n1 kec. gear 1 (rpm)	2730	2730
n2 kec. gear 2 (rpm)	2948.4	3640
n3 kec. gear 3 (rpm)	708.75	780
n4 kec. gear 4 (rpm)	765.45	1040
n5 kec. gear 5 (rpm)	184.0024038	222.8571429
n6 kec. gear 6 (rpm)	198.7225962	297.1428571
v1 kec. keliling gear 1 (m/s)	19.29723287	17.15309589
v2 kec. keliling gear 2 (m/s)	19.29723287	17.15309589
v3 kec. keliling gear 3 (m/s)	5.009858535	4.90088454
v4 kec. keliling gear 4 (m/s)	5.009858535	4.90088454
v5 kec. keliling gear 5 (m/s)	1.30063635	1.400252726
v6 kec. keliling gear 6 (m/s)	1.30063635	1.400252726
T1 torsi gear 1 (kg.mm)	1700	1700
T2 torsi gear 2 (kg.mm)	524.691358	425
T3 torsi gear 3 (kg.mm)	6548.148148	5950
T4 torsi gear 4 (kg.mm)	2021.033379	1487.5
T5 torsi gear 5 (kg.mm)	25222.49657	20825
T6 torsi gear 6 (kg.mm)	7784.721164	5206.25
ft1 gaya tangensial gear 1 (kg)	25.18518519	28.33333333
ft2 gaya tangensial gear 2 (kg)	8.395061728	9.444444444
ft3 gaya tangensial gear 3 (kg)	97.00960219	99.16666667
ft4 gaya tangensial gear 4 (kg)	32.33653406	33.05555556
ft5 gaya tangensial gear 5 (kg)	373.6666159	347.0833333
ft6 gaya tangensial gear 6 (kg)	124.5555386	115.6944444
fv1 faktor dinamis gear 1	0.237180091	0.25914461
fv2 faktor dinamis gear 2	0.237180091	0.25914461
fv3 faktor dinamis gear 3	0.37453845	0.379704321
fv4 faktor dinamis gear 4	0.37453845	0.379704321
fv5 faktor dinamis gear 5	0.697571186	0.681779022
fv6 faktor dinamis gear 6	0.697571186	0.681779022
Bahan Roda Gigi 1	S 35 C	S 35 C
Bahan Roda Gigi 2	S 35 C	S 35 C



Bahan Roda Gigi 7	S 15 CK	S 15 CK
Bahan Roda Gigi 3	S 45 C	SNC 2
Bahan Roda Gigi 4	S 45 C	SNC 2
Bahan Roda Gigi 8	S 15 CK	S 15 CK
Bahan Roda Gigi 5	SNC 3	SNC 3
Bahan Roda Gigi 6	SNC 3	SNC 3
Bahan Roda Gigi 9	S 15 CK	S 15 CK
$G_{a1}$ teg lentur ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )		26
$G_{a2}$ teg lentur ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )		26
$G_{a7}$ teg lentur ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )		30
$G_{a3}$ teg lentur ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )		30
$G_{a4}$ teg lentur ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )		30
$G_{a5}$ teg lentur ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )		30
$G_{a6}$ teg lentur ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )		30
$G_{a8}$ teg lentur ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )		60
$G_{a9}$ teg lentur ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )		60
$G_{a7}$ teg lentur ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )		30
$H_{b1}$ kekerasan Brinnel		150
$H_{b2}$ kekerasan Brinnel		150
$H_{b7}$ kekerasan Brinnel		400
$H_{b3}$ kekerasan Brinnel		200
$H_{b4}$ kekerasan Brinnel		200
$H_{b5}$ kekerasan Brinnel		400
$H_{b6}$ kekerasan Brinnel		300
$H_{b8}$ kekerasan Brinnel		300
$H_{b9}$ kekerasan Brinnel		400
$k_{H1}$ faktor teg kontak		0.027
$k_{H2}$ faktor teg kontak		0.1077
$k_{H3}$ faktor teg kontak		0.053
$k_{H4}$ faktor teg kontak		0.1072
$k_{H5}$ faktor teg kontak		0.13
$k_{H6}$ faktor teg kontak		0.168
$F^b1$ beban lentur ijin ( $\text{kg/mm}$ )	10.76086074	11.31943656
$F^b2$ beban lentur ijin ( $\text{kg/mm}$ )	10.45252662	10.37615018
$F^b7$ beban lentur ijin ( $\text{kg/mm}$ )	15.47600095	16.36498211
$F^b3$ beban lentur ijin ( $\text{kg/mm}$ )	19.60708786	38.27419556
$F^b4$ beban lentur ijin ( $\text{kg/mm}$ )	19.04528018	35.08467927



F'b8 beban lentur ijin (kg/mm)	24.43863386	23.97832788
F'b5 beban lentur ijin (kg/mm)	73.03570319	68.72332542
F'b6 beban lentur ijin (kg/mm)	70.94298963	62.99638164
F'b9 beban lentur ijin (kg/mm)	45.51651989	43.05434524
F'H1&2 beban permukaan ijin (kg/mm)	0.831270608	0.719681602
F'H2&7 beban permukaan ijin (kg/mm)	4.820859751	3.864444158
F'H3&4 beban permukaan ijin (kg/mm)	2.576752509	3.358755937
F'H4&8 beban permukaan ijin (kg/mm)	7.577426915	7.134352113
F'H5&6 beban permukaan ijin (kg/mm)	11.77151377	9.116359495
F'H6&9 beban permukaan ijin (kg/mm)	22.11710996	15.85922894
F'_{m1&2}	0.831270608	0.719681602
F'_{m2&7}	4.820859751	3.864444158
F'_{m3&4}	2.576752509	3.358755937
F'_{m4&8}	7.577426915	7.134352113
F'_{m5&6}	11.77151377	9.116359495
F'_{m6&9}	22.11710996	15.85922894
b1&b2 lebar sisi (mm)	30.29721602	39.3692617
b2&b7 lebar sisi (mm)	1.741403435	2.443933476
b3&b4 lebar sisi (mm)	37.64800921	29.52482065
b4&b8 lebar sisi (mm)	4.267482145	4.633294661
b5&b6 lebar sisi (mm)	31.74329345	38.07258079
b6&b9 lebar sisi (mm)	5.631637173	7.295086341
b1&b2 lebar sisi (mm)	31	40
b2&b7 lebar sisi (mm)	31	40
$6 \leq b1/m \leq 10$	6.2	8
$6 \leq b2/m \leq 10$	6.2	8
$d01/b1 \geq 1,3333$	4.35483871	3
$d02/b2 \geq 1,3333$	4.032258065	2.25

## Perhitungan Poros

Bahan Poros	S30 C	S 30 C
$\sigma_t$ teg tarik poros (kg/mm <sup>2</sup> )	48	48
Sf	6	6
S <sub>D</sub>	1.3	1.3
K <sub>t</sub>	1.5	1.5
C <sub>b</sub>	2	2



$\sigma_{a1}$ teg. geser tjin poros (kg/mm <sup>2</sup> )	6.153846154	6.153846154
$d_{s1}$ diameter poros min. (mm)	16.16830795	16.16830795
$d_{s2}$ diameter poros min. (mm)	10.9265461	10.18539577
$d_{s3}$ diameter poros min. (mm)	25.34473556	24.54825281
$d_{s4}$ diameter poros min. (mm)	17.12797791	15.46443023
$d_{s5}$ diameter poros min. (mm)	39.72930391	37.27147689
$d_{s6}$ diameter poros min. (mm)	26.84907239	23.47955915
$d_{s7}$ diameter poros 1 yg dipilih (mm)	20	20
$d_{s8}$ diameter poros 2 yg dipilih (mm)	15	15
$d_{s9}$ diameter poros 3 yg dipilih (mm)	30	30
$d_{s10}$ diameter poros 4 yg dipilih (mm)	25	30
$d_{s11}$ diameter poros 5 yg dipilih (mm)	40	40
$d_{s12}$ diameter poros 6 yg dipilih (mm)	45	45

### Perhitungan Bantalan Peluru

$L_b$ umur bantalan	50000	50000
T1 (N.mm)	16660	16660
T2 (N.mm)	5141.975309	4165
T3 (N.mm)	64171.85185	58310
T4 (N.mm)	19806.12711	14577.5
T5 (N.mm)	247180.4664	204085
T6 (N.mm)	76290.26741	51021.25
Ft1 gaya tangensial (N)	246.8148148	277.6666667
Ft2 gaya tangensial (N)	82.27160494	92.55555556
Ft3 gaya tangensial (N)	950.6941015	971.8333333
Ft4 gaya tangensial (N)	316.8980338	323.9444444
Ft5 gaya tangensial (N)	3661.932835	3401.416667
Ft6 gaya tangensial (N)	1220.644278	1133.805556
Fr1 gaya radial (N)	89.83324597	101.0624017
Fr2 gaya radial (N)	29.94441532	33.68746724
Fr3 gaya radial (N)	346.0243548	353.718406
Fr4 gaya radial (N)	115.3414516	117.9061353
Fr5 gaya radial (N)	1332.834552	1238.014421
Fr6 gaya radial (N)	444.278184	412.6714737
$f_w$ faktor beban	1	1
F1 beban ekivalen (N)	89.83324597	101.0624017
F2 beban ekivalen (N)	29.94441532	33.68746724



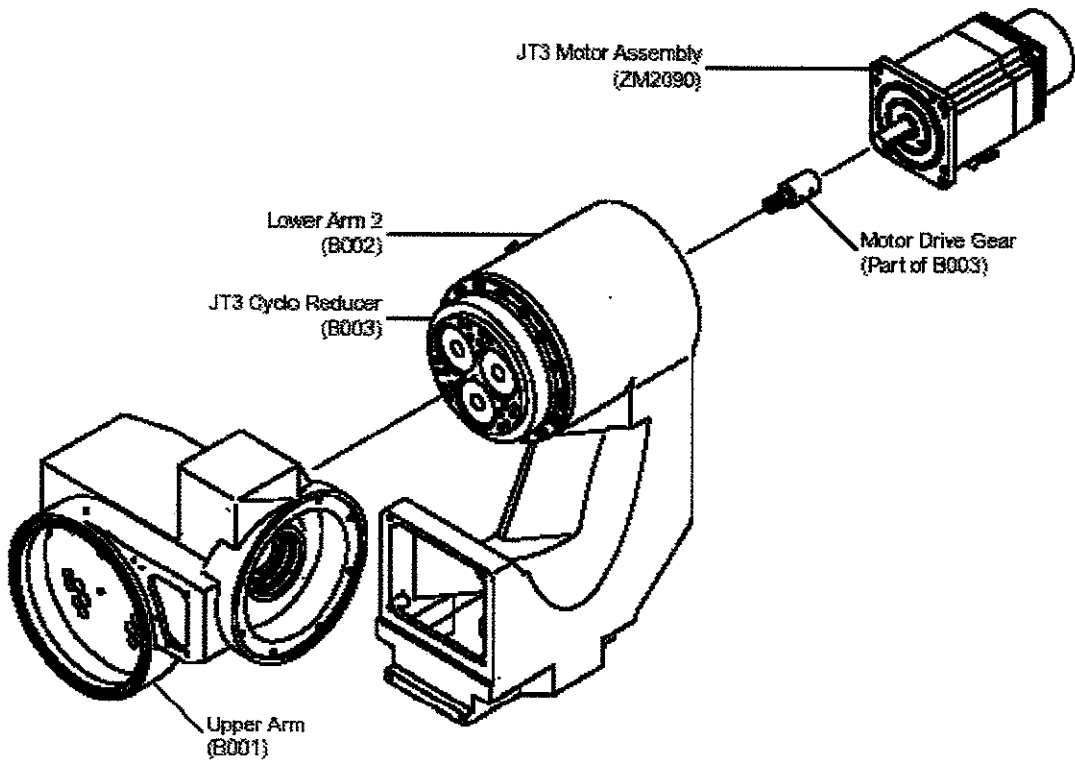
F3 beban ekuivalen (N)	346.0243548	353.718406
F4 beban ekuivalen (N)	115.3414516	117.9061353
F5 beban ekuivalen (N)	1332.834552	1238.014421
F6 beban ekuivalen (N)	444.278184	412.6714737
C1 bil. dukung dinamik (N)	1810.777376	2037.124548
C2 bil. dukung dinamik (N)	619.2771515	747.3818948
C3 bil. dukung dinamik (N)	4449.502377	4696.016473
C4 bil. dukung dinamik (N)	1521.708408	1722.878306
C5 bil. dukung dinamik (N)	10933.46519	10825.34239
C6 bil. dukung dinamik (N)	3739.192497	3971.610334
Bantalan 1		
Bantalan 2	6302	6302
Bantalan 3		
Bantalan 4	6305	6306
Bantalan 5		
Bantalan 6	6309	6309
C1 bil. dukung dinamik (N)	tanpa bantalan	tanpa bantalan
C2 bil. dukung dinamik (N)	895	895
C3 bil. dukung dinamik (N)	tanpa bantalan	tanpa bantalan
C4 bil. dukung dinamik (N)	1610	2090
C5 bil. dukung dinamik (N)	tanpa bantalan	tanpa bantalan
C6 bil. dukung dinamik (N)	4150	4150
Lh1 umur bantalan (jam)	tanpa bantalan	tanpa bantalan
Lh2 umur bantalan (jam)	150932.9081	85864.05438
Lh3 umur bantalan (jam)	tanpa bantalan	tanpa bantalan
Lh4 umur bantalan (jam)	59217.9422	89257.56916
Lh5 umur bantalan (jam)	tanpa bantalan	tanpa bantalan
Lh6 umur bantalan (jam)	68356.65829	57044.58148



### III.D.3. Perhitungan Transmisi joint 3,4

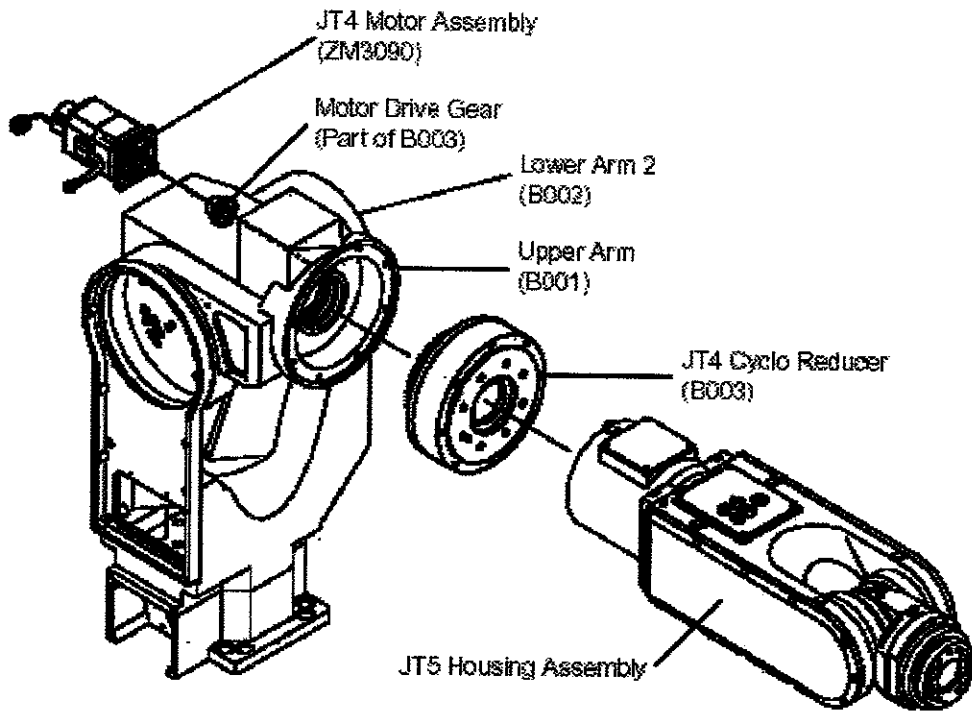
Untuk lebih memudahkan dan mempercepat proses perhitungan penulis menggunakan program *microsoft Exel* untuk perhitungan *joint 3,4*, yang mempunyai sistem transmisi sama yakni *planetary gear 3* tingkat, hanya dimensi atau ukuran masing-masing *joint* berbeda disesuaikan dengan motor listrik dan torsi masing-masing.

Sketsa gambar sistem transmisi *joint 3* tersebut dapat terlihat dibawah ini :



Gambar III.D.3. Sistem transmisi joint 3

Sketsa gambar sistem transmisi *joint* 4 tersebut dapat terlihat dibawah ini :



Gambar IIL.D.4. Sistem transmisi joint 4

Tabel IIL.D.2. Perhitungan transmisi joint 3,4

Keterangan	JT3	JT4
Torsi max. dinaruka (N.m)	993.5720	204.7800
$i_c$	1.25	1.25
T torsi rencana (N.m)	1,241.9650	255.9750
P daya rencana (W)	3468.22055	1072.225573

### Spesifikasi Motor Listrik

Motor Model No.	P60B13200LCX23	P50B08100VCXS
P daya motor listrik (kW)	3.1	1
n kecepatan putaran max. (rpm)	3000	4000
T torsi (N mm)	9800	3190
T torsi (kg mm)	1000	3250



## Perhitungan Reduction Unit

$n_{in}$ (rpm)	160	240
$n_{out}$ (rpm)	26.6666667	40
i rasio	112.5	100
Cek T rencana (N.m)	1102.5	319
$\alpha$ sudut tekan (derajat)	20	20
m modul	5	5
$d_o3$ (mm)	200	200
$z3$	40	40
$z1$	18	20
$z2$	11	10
cek i setiap <i>planetary gear</i>	3.22222222	3
cek i	33.4554184	27
Cek $T_{out}$ torsi output (N.m)	327.8631	86.13
$d_{o1}$ (mm)	90	100
$d_{o2}$ (mm)	55	50
ck kelonggaran puncak (mm)	1.25	1.25
$d_{k1}$ diameter kepala (mm)	100	110
$d_{k2}$ diameter kepala (mm)	65	60
$d_{k3}$ diameter kepala (mm)	190	190
$d_{f1}$ diameter kaki (mm)	77.5	87.5
$d_{f2}$ diameter kaki (mm)	42.5	37.5
$d_{f3}$ diameter kaki (mm)	212.5	212.5
$\gamma1$ faktor bentuk	0.308	0.32
$\gamma2$ faktor bentuk	0.226	0.201
$\gamma3$ faktor bentuk	0.389	0.389
$n1$ kec. gear 1 (rpm)	3000	4000
$n2$ kec. gear 2 (rpm)	4909.09091	8000
$n3$ kec. gear 3 (rpm)	931.034483	1333.333333
$n4$ kec. gear 4 (rpm)	1523.51097	2666.666667
$n5$ kec. gear 5 (rpm)	288.941736	444.4444444
$n6$ kec. gear 6 (rpm)	472.81375	888.8888889
$v1$ kec. keliling gear 1 (m/s)	14.1371669	20.94395102
$v2$ kec. keliling gear 2 (m/s)	14.1371669	20.94395102
$v3$ kec. keliling gear 3 (m/s)	4.38739664	6.981317008
$v4$ kec. keliling gear 4 (m/s)	4.38739664	6.981317008
$v5$ kec. keliling gear 5 (m/s)	1.36160585	2.327105669



v6 kec. keliling gear 6 (m/s)	1.36160585	2.327105669
T1 torsi gear 1 (kg.mm)	1000	3250
T2 torsi gear 2 (kg.mm)	203.703704	541.6666667
T3 torsi gear 3 (kg.mm)	3222.22222	9750
T4 torsi gear 4 (kg.mm)	656.378601	1625
T5 torsi gear 5 (kg.mm)	10382.716	29250
T6 torsi gear 6 (kg.mm)	2114.99771	4875
ft1 gaya tangensial gear 1 (kg)	22.2222222	65
ft2 gaya tangensial gear 2 (kg)	7.40740741	21.66666667
ft3 gaya tangensial gear 3 (kg)	71.6049383	195
ft4 gaya tangensial gear 4 (kg)	23.8683128	65
ft5 gaya tangensial gear 5 (kg)	230.727023	585
ft6 gaya tangensial gear 6 (kg)	76.9090078	195
fv1 faktor dinamis gear 1	0.29795651	0.22268449
fv2 faktor dinamis gear 2	0.29795651	0.22268449
fv3 faktor dinamis gear 3	0.40609705	0.300561539
fv4 faktor dinamis gear 4	0.40609705	0.300561539
fv5 faktor dinamis gear 5	0.68782006	0.563157592
fv6 faktor dinamis gear 6	0.68782006	0.563157592
Bahan Roda Gigi 1	S 35 C	SNC 2
Bahan Roda Gigi 2	S 35 C	SNC 2
Bahan Roda Gigi 7	S 15 CK	S 15 CK
Bahan Roda Gigi 3	SNC 2	S 15 CK
Bahan Roda Gigi 4	SNC 2	S 15 CK
Bahan Roda Gigi 8	S 15 CK	S 15 CK
Bahan Roda Gigi 5	SNC 3	S 15 CK
Bahan Roda Gigi 6	SNC 3	SNC 21
Bahan Roda Gigi 9	S 15 CK	S 15 CK
Ca1 teg.tenar (jn (kg/mm <sup>2</sup> ))	26	60
Ca2 teg.tenar (jn (kg/mm <sup>2</sup> ))	26	60
Ca3 teg.tenar (jn (kg/mm <sup>2</sup> ))	30	30
Ca4 teg.tenar (jn (kg/mm <sup>2</sup> ))	60	30
Ca5 teg.tenar (jn (kg/mm <sup>2</sup> ))	60	30
Ca6 teg.tenar (jn (kg/mm <sup>2</sup> ))	30	30
Ca7 teg.tenar (jn (kg/mm <sup>2</sup> ))	60	30
Ca8 teg.tenar (jn (kg/mm <sup>2</sup> ))	60	40



$C_{20}$ teg. lentur ijin (kg/mm <sup>2</sup> )	30	30
H <sub>1</sub> kekerasan Brinnel	150	300
H <sub>2</sub> kekerasan Brinnel	150	300
H <sub>3</sub> kekerasan Brinnel	400	400
H <sub>4</sub> kekerasan Brinnel	250	400
H <sub>5</sub> kekerasan Brinnel	250	400
H <sub>6</sub> kekerasan Brinnel	400	400
H <sub>7</sub> kekerasan Brinnel	300	400
H <sub>8</sub> kekerasan Brinnel	300	600
H <sub>9</sub> kekerasan Brinnel	400	400
kH1 faktor teg. kontak	0.027	0.13
kH2 faktor teg. kontak	0.1077	0.168
kH3 faktor teg. kontak	0.086	0.311
kH4 faktor teg. kontak	0.1357	0.311
kH5 faktor teg. kontak	0.13	0.348
kH6 faktor teg. kontak	0.168	0.348
F <sup>b</sup> 1 beban lentur ijin (kg/mm)	11.9301787	21.37771107
F <sup>b</sup> 2 beban lentur ijin (kg/mm)	8.75396229	13.42787476
F <sup>b</sup> 7 beban lentur ijin (kg/mm)	17.3857624	12.99364001
F <sup>b</sup> 3 beban lentur ijin (kg/mm)	37.5233677	14.42695387
F <sup>b</sup> 4 beban lentur ijin (kg/mm)	27.5333802	9.061930397
F <sup>b</sup> 8 beban lentur ijin (kg/mm)	23.695763	17.53776579
F <sup>b</sup> 5 beban lentur ijin (kg/mm)	63.5545736	27.03156441
F <sup>b</sup> 6 beban lentur ijin (kg/mm)	46.6342001	22.63893519
F <sup>b</sup> 9 beban lentur ijin (kg/mm)	40.1343005	32.86024548
F <sup>H</sup> 1&2 beban permukaan ijin (kg/mm)	0.54926742	1.929932249
F <sup>H</sup> 2&7 beban permukaan ijin (kg/mm)	2.76854179	2.992879549
F <sup>H</sup> 3&4 beban permukaan ijin (kg/mm)	2.38448987	6.231642573
F <sup>H</sup> 4&8 beban permukaan ijin (kg/mm)	4.75436134	7.477971087
F <sup>H</sup> 5&6 beban permukaan ijin (kg/mm)	6.10499598	13.06525613
F <sup>H</sup> 6&9 beban permukaan ijin (kg/mm)	9.96934487	15.67830736
F <sup>int</sup> 1&2	0.54926742	1.929932249
F <sup>int</sup> 2&7	2.76854179	2.992879549
F <sup>int</sup> 3&4	2.38448987	6.231642573
F <sup>int</sup> 4&8	4.75436134	7.477971087
F <sup>int</sup> 5&6	6.10499598	13.06525613
F <sup>int</sup> 6&9	9.96934487	15.67830736



b1&b2 lebar sisi (mm)	40.4579292	33.67993878
b2&b7 lebar sisi (mm)	2.67556279	7.23940483
b3&b4 lebar sisi (mm)	30.029458	31.29191023
b4&b8 lebar sisi (mm)	5.02029843	8.692197287
b5&b6 lebar sisi (mm)	37.7931491	44.77524162
b6&b9 lebar sisi (mm)	7.71454983	12.43756712
b1&b2 lebar sisi (mm)	41	34
b2&b7 lebar sisi (mm)	41	34
$6 \leq b1/m \leq 10$	8.2	6.8
$6 \leq b2/m \leq 10$	8.2	6.8
$d01/b1 \geq 1,3333$	2.19512195	2.941176471
$d02/b2 \geq 1,3333$	1.34146341	1.470588235

### Perhitungan Poros

Bahan Poros	S30C	S30C
$\sigma_t$ teg tarik poros (kg/mm <sup>2</sup> )	48	48
SF1	6	6
SF2	2	1.3
Kt	1.5	1.5
Cb	2	1.2
$\sigma_{a1}$ teg.geser ijin poros (kg/mm <sup>2</sup> )	4	6.153846154
$d_{s1}$ diameter poros min. (mm)	15.639054	16.92491394
$d_{s2}$ diameter poros min. (mm)	9.20188472	9.31413909
$d_{s3}$ diameter poros min. (mm)	23.099131	24.40994986
$d_{s4}$ diameter poros min. (mm)	13.5913298	13.4333131
$d_{s5}$ diameter poros min. (mm)	34.1177832	35.2052397
$d_{s6}$ diameter poros min. (mm)	20.0746099	19.37419005
$d_1$ diameter poros 1 yg dipilih (mm)	20	20
$d_2$ diameter poros 2 yg dipilih (mm)	15	15
$d_3$ diameter poros 3 yg dipilih (mm)	25	25
$d_4$ diameter poros 4 yg dipilih (mm)	25	15
$d_5$ diameter poros 5 yg dipilih (mm)	35	40
$d_6$ diameter poros 6 yg dipilih (mm)	40	20



## Perhitungan Bantalan Peluru

<b>W. mm</b> bantalan	50000	50000
T1 (N.mm)	9800	3190
T2 (N.mm)	1996.2963	531.6666667
T3 (N.mm)	31577.7778	9570
T4 (N.mm)	6432.51029	1595
T5 (N.mm)	101750.617	28710
T6 (N.mm)	20726.9776	4785
Ft1 gaya tangensial (N)	217.777778	63.8
Ft2 gaya tangensial (N)	72.5925926	21.26666667
Ft3 gaya tangensial (N)	701.728395	191.4
Ft4 gaya tangensial (N)	233.909465	63.8
Ft5 gaya tangensial (N)	2261.12483	574.2
Ft6 gaya tangensial (N)	753.708276	191.4
Fr1 gaya radial (N)	79.2646288	23.22130095
Fr2 gaya radial (N)	26.4215429	7.740433649
Fr3 gaya radial (N)	255.408248	69.66390284
Fr4 gaya radial (N)	85.1360828	23.22130095
Fr5 gaya radial (N)	822.982134	208.9917085
Fr6 gaya radial (N)	274.327378	69.66390284
<b>fw faktor beban</b>	1	1
F1 beban ekuivalen (N)	79.2646288	23.22130095
F2 beban ekuivalen (N)	26.4215429	7.740433649
F3 beban ekuivalen (N)	255.408248	69.66390284
F4 beban ekuivalen (N)	85.1360828	23.22130095
F5 beban ekuivalen (N)	822.982134	208.9917085
F6 beban ekuivalen (N)	274.327378	69.66390284
C1 bil.dukung dinamik (N)	1648.77072	531.6350785
C2 bil.dukung dinamik (N)	647.637944	223.2727421
C3 bil.dukung dinamik (N)	3596.91846	1105.845527
C4 bil.dukung dinamik (N)	1412.87132	464.4260189
C5 bil.dukung dinamik (N)	7846.95059	2300.25139
C6 bil.dukung dinamik (N)	3082.28602	966.045049
<b>Bantalan 1</b>		
<b>Bantalan 2</b>	6302	6002
<b>Bantalan 3</b>		
<b>Bantalan 4</b>	6305	6202

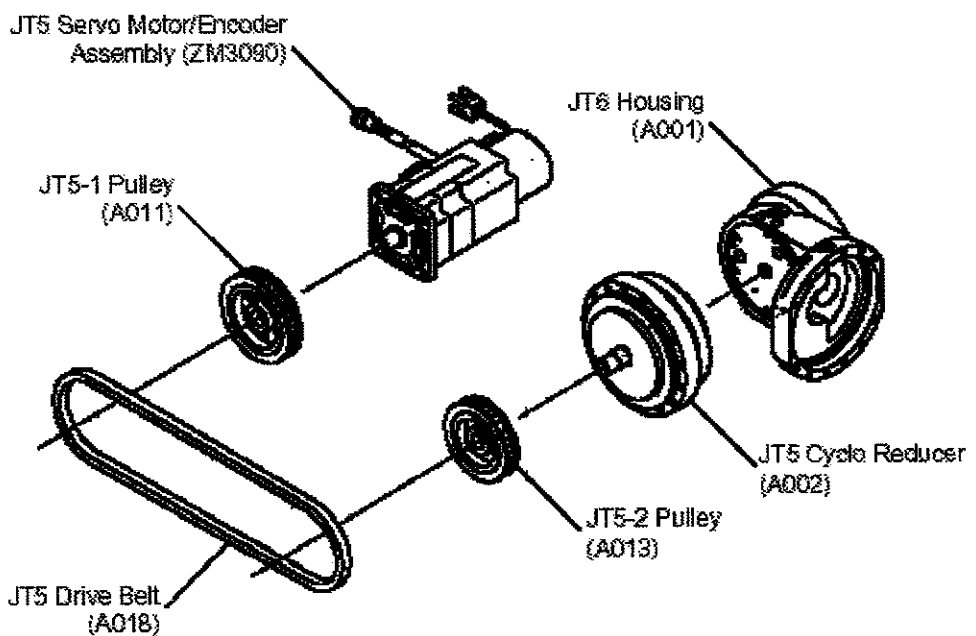


Bantalan 5		
Bantalan 6	6308	6204
C1 bil dukung dinamik (N)	tanpa bantalan	tanpa bantalan
C2 bil dukung dinamik (N)	895	440
C3 bil dukung dinamik (N)	tanpa bantalan	tanpa bantalan
C4 bil dukung dinamik (N)	1610	600
C5 bil dukung dinamik (N)	tanpa bantalan	tanpa bantalan
C6 bil dukung dinamik (N)	3200	1000
Lh1 umur bantalan (jam)	tanpa bantalan	tanpa bantalan
Lh2 umur bantalan (jam)	131959.984	382666.9153
Lh3 umur bantalan (jam)	tanpa bantalan	tanpa bantalan
Lh4 umur bantalan (jam)	73984.3393	107813.744
Lh5 umur bantalan (jam)	tanpa bantalan	tanpa bantalan
Lh6 umur bantalan (jam)	55950.1339	55459.74484



### III.D.4. Perancangan Transmisi Joint 5

Untuk sistem transmisi *joint 5*, digunakan sistem transmisi *belt* dikombinasikan dengan *planetary gear* dengan pertimbangan bahwa letak motor listrik sebagai penggerak *joint 5* harus berada pada posisi yang tidak memberatkan kerja *joint 5*. Momen torsi yang terjadi pada *joint 5* sangat tergantung pada berat *link* dan titik pusat massa *link*, selain itu untuk keperluan desain, jika letak motor listrik pada *joint 5* akan sangat tidak efisien karena dimensi *link 5* akan relatif besar. Untuk memecahkan masalah ini salah satu pemecahannya adalah dengan menggunakan sistem transmisi *belt* dan *pulley* dikombinasikan dengan *planetary gear* seperti terlihat dalam gambar III.D.5. dibawah ini.



Gambar III.D.5. Transmisi Joint 5

Dari gambar diatas terdapat 2 buah *pulley*, 1 buah *belt* dan 1 buah *planetary gear*. Dengan pertimbangan bahwa untuk mendapatkan tingkat ketelitian gerak lengan robot, putaran tetap, perbandingan transmisi tetap dan agar tidak terjadi slip pada *pulley*, maka kita menggunakan transmisi sabuk gilir yang dapat mentransmisikan daya sampai dengan 60 kW.



## Perhitungan belt & pulley

Untuk transmisi sabuk gilir terdapat tiga gaya yang sangat penting dalam perhitungan, yaitu gaya tarik efektif  $F_e$  (kg), gaya sentrifugal  $F_c$  (kg), dan tegangan awal  $F_o$  (kg). besarnya gaya tarik pada sisi kendor sama dengan gaya pada *pulley* penggerak, yakni<sup>19</sup> :

$$F_1 = F_e + F_2 \approx F_e + F_c$$

Jika daya yang ditransmisikan adalah  $P$  (kW), kecepatan sabuk  $v$  (m/s), berat persatuan panjang sabuk  $w$  (kg/m), dan konstanta yang tergantung pada ukuran dan tipe sabuk adalah  $C$ , maka  $F_e$  dan  $F_c$  dapat ditulis sebagai

$$F_e = 102 P/v$$

$$F_c = (w/9,8)v^2$$

Pada pemilihan sabuk gilir, faktor koreksi  $f_c$  (dan faktor koreksi tambahan  $f'_c$  untuk kondisi khusus) perlu ditambahkan untuk menghitung daya rencana  $P_d$ .

$$P_d = f_c P \text{ atau } P_d = (f_c + f'_c) P$$

- Dari data motor listrik P50B08100VCXS9

Daya motor = 1 kW

Putaran motor,  $n_{\text{motor}} = n_1 = 4000$  rpm

Perbandingan putaran,  $i = n_1/n_2 = 4000/2500 = 1,6$

Jarak sumbu poros,  $C = 320$  mm

- Faktor koreksi,  $f_c = 1,2$  ; faktor koreksi tambahan,  $f'_c = 0,1$

Maka Daya rencana  $P_d$  adalah

$$P_d = (f_c + f'_c) P = (1,2 + 0,1) 1 \text{ kW} = 1,3 \text{ kW}$$



- Momen rencana,  $T_1$  dan  $T_2$  :

$$T_1 = 9,74 \times 10^5 \cdot \frac{P_d}{n_1} = 9,74 \times 10^5 \cdot \frac{1,3}{4000} = 316,55 \text{ kg.mm}$$

$$T_2 = 9,74 \times 10^5 \cdot \frac{P_d}{n_2} = 9,74 \times 10^5 \cdot \frac{1,3}{2500} = 506,48 \text{ kg.mm}$$

- Menentukan bahan poros.

Untuk poros pada kedua pulley menggunakan bahan S 45 C dengan  $\sigma_B = 58 \text{ kg/mm}^2$ ,  $s_{f1} = 6$ ,  $s_{f2} = 2$  dan tegangan geser yang diijinkan :

$$\tau_a = \frac{\sigma_B}{S_{f1} \times S_{f2}} = \frac{58}{6 \times 2} = 4,83 \text{ kg/mm}^2$$

beban tumbukan,  $K_t = 1,5$ , untuk lenturan,  $C_b = 2$

- Diameter poros  $d_{s1}$ ,  $d_{s2}$

$$d_{s1} = \left[ \frac{5,1}{\tau_a} \cdot K_t \cdot C_b \cdot T_1 \right]^{\frac{1}{3}} = \left[ \frac{5,1}{4,83} \times 1,5 \times 2 \times 316,55 \right]^{\frac{1}{3}} = 10,009 \approx 15 \text{ mm}$$

$$d_{s2} = \left[ \frac{5,1}{\tau_a} \cdot K_t \cdot C_b \cdot T_2 \right]^{\frac{1}{3}} = \left[ \frac{5,1}{4,83} \times 1,5 \times 2 \times 506,48 \right]^{\frac{1}{3}} = 11,707 \approx 15 \text{ mm}$$

- Pemilihan penampang sabuk sesuai dengan diagram pemilihan sabuk gilir (lampiran) menggunakan penampang sabuk L,  $p = 9,525 \text{ mm}$
- Jumlah gigi pulley  $z_1$ ,  $z_2$  :

$$z_1 = 15 \text{ buah}$$

$$z_2 = z_1 \cdot \frac{n_1}{n_2} = 15 \cdot \frac{4000}{2500} = 24 \text{ buah}$$

- Diameter pulley

Diameter lingkaran jarak bagi pulley kecil,  $d_p$  adalah



$$d_p = \frac{p \times z_1}{\pi} = \frac{9,525 \times 15}{3,14} = 45,5 \text{ mm}$$

Diameter lingkaran jarak bagi pulley besar,  $D_p$  adalah

$$D_p = \frac{p \times z_2}{\pi} = \frac{9,525 \times 24}{3,14} = 72,8 \text{ mm}$$

Diameter naf pulley kecil,  $d_B$  :

$$d_B \geq \frac{5}{3} \cdot d_{s1} + 10(\text{mm})$$

$$d_B \geq \frac{5}{3} \cdot 15 + 10$$

$$d_B \geq 35, \quad d_B = 35$$

Diameter naf pulley besar,  $D_B$  :

$$D_B \geq \frac{5}{3} \cdot d_{s2} + 10(\text{mm})$$

$$D_B \geq \frac{5}{3} \cdot 15 + 10(\text{mm})$$

$$D_B \geq 35 \text{ mm}, \quad D_B = 35 \text{ mm}$$

- Panjang keliling,  $L_p$  :

$$L_p = \frac{z_1 + z_2}{2} + 2 \frac{C}{p} + \frac{[(z_1 - z_2)/6,28]^2}{C/p}$$

$$L_p = \frac{15 + 24}{2} + 2 \frac{320}{9,525} + \frac{[(15 - 24)/6,28]^2}{320/9,525} = 86,753$$

- Nomor nominal dan panjang sabuk dalam perdagangan, L

$$L = 86 \text{ No. 322L}$$

- Jarak sumbu poros (dalam jarak bagi)  $C_p$ , C adalah

$$C_p = \frac{1}{4} \left\{ \left( L - \frac{z_1 + z_2}{2} \right) + \sqrt{\left( L - \frac{z_1 + z_2}{2} \right)^2 - \frac{2}{9,86} (z_2 - z_1)^2} \right\}$$

$$C_p = \frac{1}{4} \left\{ \left( 86 - \frac{15 + 24}{2} \right) + \sqrt{\left( 86 - \frac{15 + 24}{2} \right)^2 - \frac{2}{9,86} (24 - 15)^2} \right\} = 33,22$$



$$C_p \times p = 33,22 \times 9,525 = 316,41 \text{ mm}$$

- Daerah penyetelan<sup>20</sup>

$$\Delta C_1 = 6 \text{ mm}, \Delta C_2 = 5 \text{ mm}$$

- Daya yang ditransmisikan persatuan lebar  $P_o$

Dari tabel sabuk gilir tipe L terlihat

$$z_1 = 20, P_o = 1,06 \text{ kW untuk } 1400 \text{ rpm}$$

$$P_o = 1,21 \text{ kW untuk } 1600 \text{ rpm}$$

$$Z_1 = 22, P_o = 1,17 \text{ kW untuk } 1400 \text{ rpm}$$

$$P_o = 1,31 \text{ kW untuk } 1600 \text{ rpm}$$

Taksiran yang lebih mendekati adalah

$$Z_1 = 15, P_o = 0,785 \text{ kW untuk } 1400 \text{ rpm}$$

$$P_o = 0,96 \text{ kW untuk } 1600 \text{ rpm}$$

$$\text{Sehingga, } P_o = 0,96 + 0,175 \times 2400/200 = 3,06 \text{ kW}$$

- Sudut kontak ( $\theta$ ), jumlah gigi terkait (JGT), Faktor koreksi JGT, ( $f_t$ )

$$\theta = 180^\circ - \frac{57(D_p - d_p)}{C}$$

$$\theta = 180^\circ - \frac{57(72,8 - 45,5)}{316,41} = 175,082^\circ$$

$$JGT = \frac{\theta}{360} \cdot z_1 = \frac{175,082^\circ}{360} \cdot 15 = 7,295 > 6, \text{ sehingga } f_t = 1,00$$

- Faktor lebar gigi,  $f_w$  adalah :

$$f_w = \frac{P_d}{P_o \cdot f_t} = \frac{1,3}{3,06 \times 1,00} = 0,425 \Rightarrow 0,5$$

- Lebar gigi sabuk dipasaran,  $W_b$

<sup>20</sup> Lampiran



$$W_b = 0,5 \times 25,4 = 12,7 \text{ mm}$$

$$\text{Lebar gigi pulley, } W_w = W_b \times 1,3 = 12,7 \times 1,3 = 16,51 \text{ mm}$$

**Perhitungan planetary gear**

**Tabel III.D.3. Perhitungan Joint 5**

<b>Keterangan</b>	<b>JT5</b>
Torsi max. dinamika (Nm)	248.7090
Fe	1.25
T torsi rencana (N.m)	310.8863
P daya rencana (W)	1302.237279

**Spesifikasi Pulley besar**

Model No.	322 L
P daya motor listrik (kW)	1
n kecepatan putaran pulley besar	2500
T torsi pulley besar (N.mm)	4,964
T torsi pulley besar (kg.mm)	506.48

**Perhitungan Reduction Unit**

n out (derajat/sec)	240
n out (rpm)	40
i rasio	62.5
Cek T rencana (N.m)	310.219
$\alpha$ sudut tekan (derajat)	20
m modul	3
do3 (mm)	120
z3	40
z1	20
z2	10
cek i setiap planetary gear	3
cek I	27
Cek T <sub>out</sub> torsi output (N.m)	134.014608
do1 (mm)	60
do2 (mm)	30
ck kelonggaran puncak (mm)	0.75



UNIVERSITAS  
 GADJAH MADA

dk1 diameter kepala (mm)	66
dk2 diameter kepala (mm)	36
dk3 diameter kepala (mm)	114
df1 diameter kaki (mm)	52.5
df2 diameter kaki (mm)	22.5
df3 diameter kaki (mm)	127.5
Y1 faktor bentuk	0.32
Y2 faktor bentuk	0.201
Y3 faktor bentuk	0.389
n1 kec. gear 1 (rpm)	2500
n2 kec. gear 2 (rpm)	5000
n3 kec. gear 3 (rpm)	833.3333333
n4 kec. gear 4 (rpm)	1666.666667
n5 kec. gear 5 (rpm)	277.7777778
n6 kec. gear 6 (rpm)	555.5555556
v1 kec. keliling gear 1 (m/s)	7.853981634
v2 kec. keliling gear 2 (m/s)	7.853981634
v3 kec. keliling gear 3 (m/s)	2.617993878
v4 kec. keliling gear 4 (m/s)	2.617993878
v5 kec. keliling gear 5 (m/s)	0.872664626
v6 kec. keliling gear 6 (m/s)	0.872664626
T1 torsi gear 1 (kg.mm)	506.48
T2 torsi gear 2 (kg.mm)	84.41333333
T3 torsi gear 3 (kg.mm)	1519.44
T4 torsi gear 4 (kg.mm)	253.24
T5 torsi gear 5 (kg.mm)	4558.32
T6 torsi gear 6 (kg.mm)	759.72
ft1 gaya tangensial gear 1 (kg)	16.88266667
ft2 gaya tangensial gear 2 (kg)	5.627555556
ft3 gaya tangensial gear 3 (kg)	50.648
ft4 gaya tangensial gear 4 (kg)	16.88266667
ft5 gaya tangensial gear 5 (kg)	151.944
ft6 gaya tangensial gear 6 (kg)	50.648
fv1 faktor dinamis gear 1	0.433088491
fv2 faktor dinamis gear 2	0.433088491
fv3 faktor dinamis gear 3	0.533998446
fv4 faktor dinamis gear 4	0.533998446



UNIVERSITAS  
 GADJAH MADA

fv5 faktor dinamis gear 5	0.774660419
fv6 faktor dinamis gear 6	0.774660419
Bahan Roda Gigi 1	S 45 C
Bahan Roda Gigi 2	S 45 C
Bahan Roda Gigi 7	S 15 CK
Bahan Roda Gigi 3	SNC 2
Bahan Roda Gigi 4	SNC 2
Bahan Roda Gigi 8	S 15 CK
Bahan Roda Gigi 5	SNC 2
Bahan Roda Gigi 6	S 15 CK
Bahan Roda Gigi 9	S 15 CK
$\sigma_{a1}$ teg. lentur ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )	30
$\sigma_{a2}$ teg. lentur ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )	30
$\sigma_{a7}$ teg. lentur ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )	30
$\sigma_{a3}$ teg. lentur ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )	60
$\sigma_{a4}$ teg. lentur ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )	60
$\sigma_{a5}$ teg. lentur ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )	30
$\sigma_{a6}$ teg. lentur ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )	60
$\sigma_{a6}$ teg. lentur ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )	30
$\sigma_{a9}$ teg. lentur ijin ( $\text{kg/mm}^2$ )	30
H <sub>a1</sub> kekerasan Brinnel	200
H <sub>a2</sub> kekerasan Brinnel	200
H <sub>a7</sub> kekerasan Brinnel	400
H <sub>a3</sub> kekerasan Brinnel	300
H <sub>a4</sub> kekerasan Brinnel	300
H <sub>a5</sub> kekerasan Brinnel	400
H <sub>a5</sub> kekerasan Brinnel	300
H <sub>a6</sub> kekerasan Brinnel	400
H <sub>a9</sub> kekerasan Brinnel	400
kH1 faktor teg. kontak	0.053
kH2 faktor teg. kontak	0.1072
kH3 faktor teg. kontak	0.13
kH4 faktor teg. kontak	0.168
kH5 faktor teg. kontak	0.168
kH6 faktor teg. kontak	0.311
F <sub>b1</sub> beban lentur ijin ( $\text{kg/mm}$ )	12.47294854



UNIVERSITAS  
 GADJAH MADA

F'b2 beban lentur ijin (kg/mm)	7.834570802
F'b7 beban lentur ijin (kg/mm)	15.16242807
F'b3 beban lentur ijin (kg/mm)	30.75831048
F'b4 beban lentur ijin (kg/mm)	19.32006377
F'b8 beban lentur ijin (kg/mm)	18.69528559
F'b5 beban lentur ijin (kg/mm)	44.62044011
F'b6 beban lentur ijin (kg/mm)	14.01360697
F'b9 beban lentur ijin (kg/mm)	27.12086125
F'H1&2 beban permukaan ijin (kg/mm)	0.918147601
F'H2&7 beban permukaan ijin (kg/mm)	2.228500139
F'H3&4 beban permukaan ijin (kg/mm)	2.776791919
F'H4&8 beban permukaan ijin (kg/mm)	4.306163468
F'H5&6 beban permukaan ijin (kg/mm)	5.205718013
F'H6&9 beban permukaan ijin (kg/mm)	11.56413073
F'mm1&2	0.918147601
F'mm2&7	2.228500139
F'mm3&4	2.776791919
F'mm4&8	4.306163468
F'mm5&6	5.205718013
F'mm6&9	11.56413073
b1&b2 lebar sisi (mm)	18.38774795
b2&b7 lebar sisi (mm)	2.525265965
b3&b4 lebar sisi (mm)	18.23975346
b4&b8 lebar sisi (mm)	3.920581927
b5&b6 lebar sisi (mm)	29.18790446
b6&b9 lebar sisi (mm)	4.379749866
b1&b2 lebar sisi (mm)	19
b2&b7 lebar sisi (mm)	19
$6 \leq b1/m \leq 10$	6.333333333
$6 \leq b2/m \leq 10$	6.333333333
$d01/b1 \geq 1,3333$	3.157894737
$d02/b2 \geq 1,3333$	1.578947368

### Perhitungan Poros

Bahan Poros	S30C
G: teg tarik poros (kg/mm <sup>2</sup> )	48



SI1	6
SI2	1.3
Kt	1.5
Cb	2
$\sigma_{a1}$ teg.geser ijin poros (kg/mm <sup>2</sup> )	6.153846154
ds1 diameter poros min. (mm)	10.79863923
ds2 diameter poros min. (mm)	5.942720188
ds3 diameter poros min. (mm)	15.57433279
ds4 diameter poros min. (mm)	8.570885638
ds5 diameter poros min. (mm)	22.46207478
ds6 diameter poros min. (mm)	12.36135613
ds1 diameter poros 1 yg dipilih (mm)	11
ds2 diameter poros 2 yg dipilih (mm)	10
ds3 diameter poros 3 yg dipilih (mm)	16
ds4 diameter poros 4 yg dipilih (mm)	10
ds5 diameter poros 5 yg dipilih (mm)	23
ds6 diameter poros 6 yg dipilih (mm)	13

### Pemilihan Bantalan Luncur

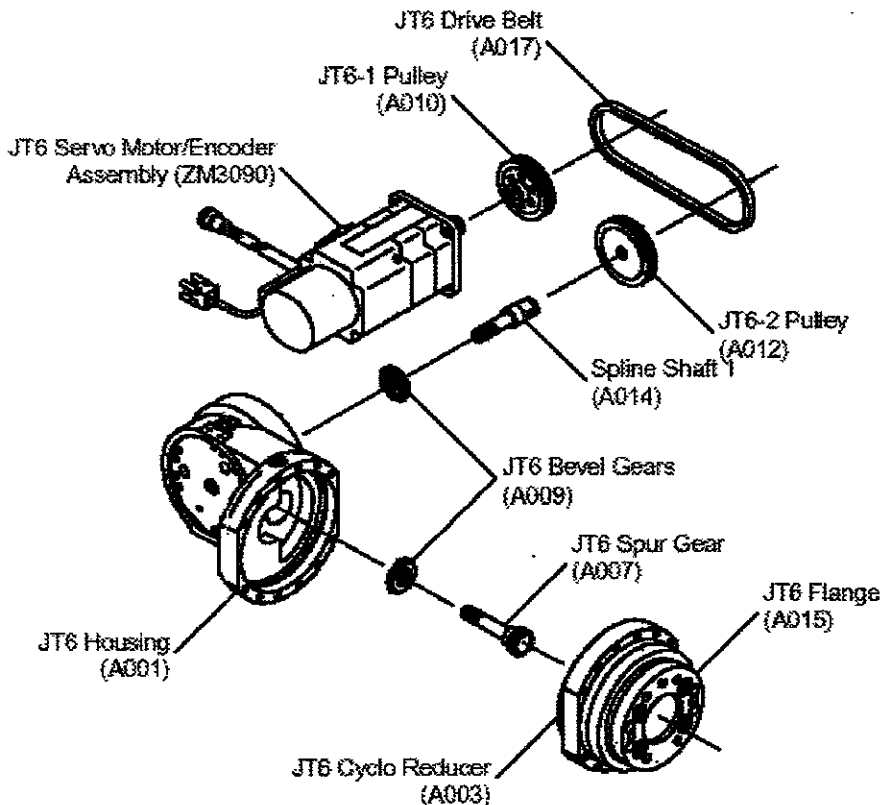
P <sub>a2</sub> tekanan bantalan 2 ijin(kg/mm <sup>2</sup> )	2,6
P <sub>a4</sub> tekanan bantalan 4 ijin(kg/mm <sup>2</sup> )	2,6
P <sub>a6</sub> tekanan bantalan 6 ijin(kg/mm <sup>2</sup> )	1,045
Bantalan 2	Perunggu timah hitam
Bantalan 4	Perunggu timah hitam
Bantalan 6	perunggu



### III.D.5. Perancangan Transmisi Joint 6

UNIVERSITAS  
GADJAH MADA

Untuk sistem transmisi *joint 6*, digunakan sistem transmisi *belt* dikombinasikan dengan *reduction gear* dan *bevel gear* dengan pertimbangan bahwa letak motor listrik sebagai penggerak *joint 6* harus berada pada posisi yang tidak memberatkan kerja *joint 6*. Momen torsi yang terjadi pada *joint 6* sangat tergantung pada berat *link* dan titik pusat massa *link*, selain itu untuk keperluan desain, jika letak motor listrik pada *joint 6* akan sangat tidak efisien karena dimensi *link 6* akan relatif besar. Untuk memecahkan masalah ini salah satu pemecahannya adalah dengan menggunakan sistem transmisi *belt* dan *pulley* dikombinasikan dengan *bevel gear* dan *planetary gear* seperti terlihat dalam gambar III.D.6. dibawah ini.



Gambar III.D.6. Transmisi Joint 6



Dari gambar diatas terdapat 2 buah *pulley*, 1 buah *belt* dan 1 buah *planetary gear*.

Dengan pertimbangan bahwa untuk mendapatkan tingkat ketelitian gerak lengan robot, putaran tetap, perbandingan transmisi tetap dan agar tidak terjadi slip pada pulley, maka kita menggunakan transmisi sabuk gilir yang dapat mentransmisikan daya sampai dengan 60 kW.

### Perhitungan belt & pulley

Untuk transmisi sabuk gilir terdapat tiga gaya yang sangat penting dalam perhitungan, yaitu gaya tarik efektif  $F_e$  (kg), gaya sentrifugal  $F_c$  (kg), dan tegangan awal  $F_o$  (kg). besarnya gaya tarik pada sisi kendur sama dengan gaya pada *pulley* penggerak, yakni<sup>21</sup> :

$$F_1 = F_e + F_2 \approx F_e + F_c$$

Jika daya yang ditransmisikan adalah  $P$  (kW), kecepatan sabuk  $v$  (m/s), berat persatuan panjang sabuk  $w$  (kg/m), dan konstanta yang tergantung pada ukuran dan tipe sabuk adalah  $C$ , maka  $F_e$  dan  $F_c$  dapat ditulis sebagai

$$F_e = 102 P/v$$

$$F_c = (w/9,8)v^2$$

Pada pemilihan sabuk gilir, faktor koreksi  $f_c$  (dan faktor koreksi tambahan  $f'_c$  untuk kondisi khusus) perlu ditambahkan untuk menghitung daya rencana  $P_d$ .

$$P_d = f_c P \text{ atau } P_d = (f_c + f'_c) P$$

<sup>21</sup> Suga Kiyokatsu, Sularso, Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin, hal 182



Dari data motor listrik P50B08100VCXS9

Daya motor = 1 kW

Putaran motor,  $n_{\text{motor}} = n_1 = 4000$  rpm

Perbandingan putaran,  $i = n_1/n_2 = 4000/2500 = 1,6$

Jarak sumbu poros,  $C = 230$  mm

- Faktor koreksi,  $f_c = 1,2$  ; faktor koreksi tambahan,  $f'_c = 0,1$

Maka Daya rencana  $P_d$  adalah

$$P_d = (f_c + f'_c)P = (1,2 + 0,1)1 \text{ kW} = 1,3 \text{ kW}$$

- Momen rencana,  $T_1$  dan  $T_2$  :

$$T_1 = 9,74 \times 10^5 \cdot \frac{P_d}{n_1} = 9,74 \times 10^5 \cdot \frac{1,3}{4000} = 316,55 \text{ kg.mm}$$

$$T_2 = 9,74 \times 10^5 \cdot \frac{P_d}{n_2} = 9,74 \times 10^5 \cdot \frac{1,3}{2500} = 506,48 \text{ kg.mm}$$

- Menentukan bahan poros.

Untuk poros pada kedua pulley menggunakan bahan S 45 C dengan  $\sigma_B = 58$  kg/mm<sup>2</sup>,  $s_{f1} = 6$  ,  $s_{f2} = 2$  dan tegangan geser yang diijinkan :

$$\tau_a = \frac{\sigma_B}{S_{f1} \times S_{f2}} = \frac{58}{6 \times 2} = 4,83 \text{ kg/mm}^2$$

beban tumbukan,  $K_t = 1,5$ , untuk lenturan,  $C_b = 2$

- Diameter poros  $d_{s1}$ ,  $d_{s2}$

$$d_{s1} = \left[ \frac{5,1}{\tau_a} \cdot K_t \cdot C_b \cdot T_1 \right]^{\frac{1}{3}} = \left[ \frac{5,1}{4,83} \times 1,5 \times 2 \times 316,55 \right]^{\frac{1}{3}} = 10,009 \approx 15 \text{ mm}$$

$$d_{s2} = \left[ \frac{5,1}{\tau_a} \cdot K_t \cdot C_b \cdot T_2 \right]^{\frac{1}{3}} = \left[ \frac{5,1}{4,83} \times 1,5 \times 2 \times 506,48 \right]^{\frac{1}{3}} = 11,707 \approx 15 \text{ mm}$$



- Pemilihan penampang sabuk sesuai dengan diagram pemilihan sabuk gilir (lampiran) menggunakan penampang sabuk L,  $p = 9,525 \text{ mm}$

- Jumlah gigi pulley  $z_1, z_2$  :

$$z_1 = 15 \text{ buah}$$

$$z_2 = z_1 \cdot \frac{n_1}{n_2} = 15 \cdot \frac{4000}{2500} = 24 \text{ buah}$$

- Diameter pulley

Diameter lingkaran jarak bagi pulley kecil,  $d_p$  adalah

$$d_p = \frac{p \times z_1}{\pi} = \frac{9,525 \times 15}{3,14} = 45,5 \text{ mm}$$

Diameter lingkaran jarak bagi pulley besar,  $D_p$  adalah

$$D_p = \frac{p \times z_2}{\pi} = \frac{9,525 \times 24}{3,14} = 72,8 \text{ mm}$$

Diameter naf pulley kecil,  $d_B$  :

$$d_B \geq \frac{5}{3} \cdot d_{s1} + 10(\text{mm})$$

$$d_B \geq \frac{5}{3} \cdot 15 + 10$$

$$d_B \geq 35, \quad d_B = 35$$

Diameter naf pulley besar,  $D_B$  :

$$D_B \geq \frac{5}{3} \cdot d_{s2} + 10(\text{mm})$$

$$D_B \geq \frac{5}{3} \cdot 15 + 10(\text{mm})$$

$$D_B \geq 35 \text{ mm}, \quad D_B = 35 \text{ mm}$$

- Panjang keliling,  $L_p$  :

$$L_p = \frac{z_1 + z_2}{2} \cdot \frac{C}{p} + \frac{[(z_1 - z_2)/6,28]^2}{C/p}$$



$$\frac{15 + 24}{2} + 2 \frac{230}{9,525} + \frac{[(15 - 24)/6,28]^2}{230/9,525} = 67,885$$

- Nomor nominal dan panjang sabuk dalam perdagangan, L

$$L = 68 \text{ No. 255 L}$$

- Jarak sumbu poros (dalam jarak bagi)  $C_p$ , C adalah

$$C_p = \frac{1}{4} \left\{ \left( L - \frac{z_1 + z_2}{2} \right) + \sqrt{\left( L - \frac{z_1 + z_2}{2} \right)^2 - \frac{2}{9,86} (z_2 - z_1)^2} \right\}$$

$$C_p = \frac{1}{4} \left\{ \left( 68 - \frac{15 + 24}{2} \right) + \sqrt{\left( 68 - \frac{15 + 24}{2} \right)^2 - \frac{2}{9,86} (24 - 15)^2} \right\} = 24,2$$

$$C = C_p \times p = 24,2 \times 9,525 = 230,58 \text{ mm}$$

- Daerah penyetelan<sup>22</sup>

$$\Delta C_1 = 5 \text{ mm}, \Delta C_1 = 5 \text{ mm}$$

- Daya yang ditransmisikan persatuan lebar  $P_o$

Dari tabel sabuk gilir tipe L terlihat

$$z_1 = 20, P_o = 1,06 \text{ kW untuk } 1400 \text{ rpm}$$

$$P_o = 1,21 \text{ kW untuk } 1600 \text{ rpm}$$

$$Z_1 = 22, P_o = 1,17 \text{ kW untuk } 1400 \text{ rpm}$$

$$P_o = 1,31 \text{ kW untuk } 1600 \text{ rpm}$$

Taksiran yang lebih mendekati adalah

$$Z_1 = 15, P_o = 0,785 \text{ kW untuk } 1400 \text{ rpm}$$

$$P_o = 0,96 \text{ kW untuk } 1600 \text{ rpm}$$

$$\text{Sehingga, } P_o = 0,96 + 0,175 \times 2400/200 = 3,06 \text{ kW}$$

<sup>22</sup> Lampiran



- Sudut kontak ( $\theta$ ), jumlah gigi terkait (JGT), Faktor koreksi JGT, ( $f_i$ )

$$\theta = 180^\circ - \frac{57(D_p - d_p)}{C}$$

$$\theta = 180^\circ - \frac{57(72,8 - 45,5)}{230,58} = 173,25^\circ$$

$$JGT = \frac{\theta}{360} \cdot z_1 = \frac{173,25^\circ}{360} \cdot 15 = 7,219 > 6, \text{ sehingga } f_i = 1,00$$

- Faktor lebar gigi,  $f_w$  adalah :

$$f_w = \frac{P_d}{P_o \cdot f_t} = \frac{1,3}{3,06 \times 1,00} = 0,425 \Rightarrow 0,5$$

- Lebar gigi sabuk dipasaran,  $W_b$

$$W_b = 0,5 \times 25,4 = 12,7 \text{ mm}$$

$$\text{Lebar gigi pulley, } W_w = W_b \times 1,3 = 12,7 \times 1,3 = 16,51 \text{ mm}$$

### Perhitungan bevel gear

Setelah menghitung transmisi *belt & pulley* kemudian kita hitung *bevel gear* yang akan meneruskan gaya ke transmisi *planetary gear*.

- Menentukan variabel utama perhitungan awal.

$$T_1 = 50,648 \text{ kg.cm, } n_1 = 2500 \text{ rpm}$$

Daya yang dipindahkan,

$$N = \frac{\tau_1 \times n_1}{71620} = \frac{50,648 \times 2500}{71620} = 1,768 \text{ Hp} = 1,318 \text{ kW}$$

rasio putaran,  $i = 1$

sudut poros,  $\Sigma = 90^\circ$

sisi kerucut,  $R = 35 \text{ mm}$

faktor koreksi,  $f_c = 1,2$

Daya yang direncanakan,

$$P = f_c \times N = 1,2 \times 1,318 \text{ kW} = 1,582 \text{ kW}$$



• Sudut kerucut jarak bagi,

$$\delta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{1}{i}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{1}{1}\right)$$

$$= 45^\circ$$

$$\delta_2 = 90^\circ - \delta_1 = 90^\circ - 45^\circ$$

$$= 45^\circ$$

Diameter lingkaran jarak bagi ujung luar,

$$d_1 = 2R \cdot \sin \delta_1 = 2(35) \sin 45^\circ$$

$$= 49,497 \text{ mm}$$

$$d_2 = 2R \cdot \sin \delta_2 = 2(50) \sin 45^\circ$$

$$= 49,497 \text{ mm}$$

- Modul roda gigi,  $m = 5$ , sudut kontak =  $20^\circ$

$$\text{Jumlah gigi bevel 1, } z_1 = \left(\frac{d_1}{m}\right) = \left(\frac{49,497}{5}\right) = 9,899 = 10 \text{ buah}$$

$$\text{Jumlah gigi bevel 2, } z_2 = \left(\frac{d_2}{m}\right) = \left(\frac{49,497}{5}\right) = 9,899 = 10 \text{ buah}$$

Sehingga ukuran roda gigi,

- Sudut kerucut jarak bagi,

$$\delta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{z_1}{z_2}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{10}{10}\right) = 45^\circ$$

$$\delta_2 = 90^\circ - \delta_1 = 90^\circ - 45^\circ = 45^\circ$$

Diameter lingkaran jarak bagi,

$$d_1 = 2R \cdot \sin \delta_1 = 2(35) \sin 45^\circ$$

$$= 49,497 \text{ mm}$$

<sup>23</sup> Suga Kiyokatsu, Sularso, Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin, hal 269



$$d_2 = 2R \cdot \sin \delta_2 = 2(35) \sin 45^\circ$$

$$= 49,497 \text{ mm}$$

- Kecepatan keliling

$$v = \frac{\pi \times d_2 \times n_2}{60 \times 1000} = \frac{\pi \times 49,497 \times 2500}{60000} = 6,48 \text{ m/s}$$

Gaya tangensial,

$$F_t = \frac{102 \times P}{v} = \frac{102 \times 1,582}{6,48} = 24,9 \text{ kg}$$

- Kelonggaran puncak

$$C_k = 0,188 \times m = 0,188 \times 5 = 0,94 \text{ mm}$$

Kelonggaran belakang diasumsikan  $C_o = 0$

- Faktor perubahan kepala,

$$x_1 = 0,46 \left[ 1 - \left( \frac{z_1}{z_2} \right)^2 \right] = 0,46 \left[ 1 - \left( \frac{15}{15} \right)^2 \right] = 0$$

$$x_2 = -x_1 = 0$$

- Tinggi kepala roda gigi,

$$h_{k1} = (1+x_1) \cdot m = (1+0) \cdot 5 = 5 \text{ mm}$$

$$h_{k2} = (1-x_1) \cdot m = (1-0) \cdot 5 = 5 \text{ mm}$$

Tinggi kaki,

$$h_{f1} = (1 - x_1) \cdot m + c_k = (1 - 0) \cdot 5 + 0,94 = 5,94 \text{ mm}$$

$$h_{f2} = (1 + x_1) \cdot m + c_k = (1 + 0) \cdot 5 + 0,94 = 5,94 \text{ mm}$$

- Kedalaman gigi penuh,

$$H = 2m + c_k = 2(5) + 0,94 = 10,94 \text{ mm}$$

- Sudut kepala,

$$\theta_{k1} = \tan^{-1} \left( \frac{h_{k1}}{R} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{5}{35} \right) = 8,13^\circ$$



$$\theta_{k2} = \tan^{-1}\left(\frac{h_{k2}}{R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{5}{35}\right) = 8,13^\circ$$

- Sudut kaki,

$$\theta_{f1} = \tan^{-1}\left(\frac{h_{f1}}{R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{5,94}{35}\right) = 9,632^\circ$$

$$\theta_{f2} = \tan^{-1}\left(\frac{h_{f2}}{R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{5,94}{35}\right) = 9,632^\circ$$

- Sudut kerucut kepala,

$$\delta_{k1} = \delta_1 + \theta_{k1} = 45^\circ + 8,13^\circ = 53,13^\circ$$

$$\delta_{k2} = \delta_2 + \theta_{k2} = 45^\circ + 8,13^\circ = 53,13^\circ$$

- sudut kerucut kaki,

$$\delta_{f1} = \delta_1 - \theta_{f1} = 45^\circ - 9,632^\circ = 35,368^\circ$$

$$\delta_{f2} = \delta_2 - \theta_{f2} = 45^\circ - 9,632^\circ = 35,368^\circ$$

- Diameter lingkaran kepala,

$$d_{k1} = d_1 + 2h_{k1}\cos\delta_1 = 49,497 + 2(5).\cos 45^\circ = 56,57 \text{ mm}$$

$$d_{k2} = d_2 + 2h_{k2}\cos\delta_2 = 49,497 + 2(5).\cos 45^\circ = 56,57 \text{ mm}$$

Jarak puncak sampai ke puncak gigi luar

$$X_1 = \left(\frac{d_2}{2}\right) - h_{k1} \sin \delta_1 = \left(\frac{49,497}{2}\right) - 5.\sin 45^\circ = 21,21 \text{ mm}$$

$$X_2 = \left(\frac{d_1}{2}\right) - h_{k2} \sin \delta_2 = \left(\frac{49,497}{2}\right) - 5.\sin 45^\circ = 21,21 \text{ mm}$$

- Tebal lingkaran gigi,

$$s_1 = (0,5\pi + 2x_1\tan\alpha_o).m = (0,5\pi + 2(0)\tan 20^\circ).5 = 7,854 \text{ mm}$$

$$s_2 = \pi.m - s_1 = \pi.5 - 7,854 \text{ mm} = 7,854 \text{ mm}$$



Bahan pembuatan roda gigi bevel kecil menggunakan bahan S 45 C,

$\sigma_{B1} = 70 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\sigma_{b1} = 20 \text{ kg/mm}^2$  dengan perlakuan sementasi dengan celup dingin, HRC = 30, HB = 330.

Bahan pembuatan roda gigi bevel besar menggunakan bahan S 45 C,

$\sigma_{B2} = 70 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\sigma_{b2} = 20 \text{ kg/mm}^2$  dengan perlakuan celup dingin dan temper, HRC = 30, HB = 330.

Guna pengujian kekuatan roda gigi bevel, maka diambil parameter sebagai berikut <sup>24</sup>:

Faktor dinamis,  $K_v = 0,85$

Faktor geometri,  $J_1 = 0,18$  dan  $J_2 = 0,18$

Faktor beban lebih,  $K_o = 1,5$

Faktor distribusi beban,  $K_m = 1,25$

$$\text{Faktor ukuran, } K_s = \sqrt[4]{\left(\frac{m}{2,24}\right)} = \sqrt[4]{\left(\frac{5}{2,24}\right)} = 1,22$$

- Beban lentur yang diijinkan,

$$F'_{b1} = \frac{\sigma_{a1} \cdot m \cdot K_v \cdot J_1}{(K_o K_s K_m)} = \frac{14,4 \times 5 \times 0,85 \times 0,18}{(1,5 \times 1,22 \times 1,25)} = 4,816 \text{ kg/mm} \quad *$$

$$F'_{b2} = \frac{\sigma_{a2} \cdot m \cdot K_v \cdot J_2}{(K_o K_s K_m)} = \frac{14,4 \times 5 \times 0,85 \times 0,18}{(1,5 \times 1,22 \times 1,25)} = 4,816 \text{ kg/mm}$$

- Beban permukaan,

$$F'_{H} = \sigma_c^2 \cdot \frac{d_1}{C_p^2} \cdot \frac{C_v \cdot I}{C_o C_m C_f}$$

Dari data tegangan kontak kedua bevel gear diambil yang terkecil yakni  $\sigma_c = 102 \text{ kg/mm}^2$ .  $C_p$  merupakan koefisien elastis bahan roda gigi, dalam hal ini baja, maka  $C_p = 74,2$ . Sedangkan  $C_v = K_v$ ,  $C_o = K_o$ , dan  $C_m = K_m$ , dan I adalah



faktor geometri jumlah gigi kedua roda gigi = 10 dan 20 buah sehingga  $I = 0,062$ . Beban permukaan gigi adalah

$$F'_H = 102^2 \cdot \frac{49,497}{74,2^2} \cdot \frac{0,85 \times 0,062}{1,5 \times 1,25 \times 1,22} = 2,155 \text{ kg/mm}$$

- Dari harga  $F'_{b1}$ ,  $F'_{b2}$  dan  $F'_H$  dipilih yang terkecil,  $F'_{\min} = 2,155 \text{ kg/mm}$

Lebar sisi roda gigi ,

$$b = \frac{F_t}{F'_{\min}} = \frac{24,9}{2,155} = 11,55 \text{ mm}$$

lebar sisi roda gigi harus tidak lebih dari  $1/3 R$  atau kurang dari 10 kali modul ujung luar gigi,

karena  $11,55 \text{ mm} < 1/3(35)$ , maka roda gigi aman.

**Tabel III.D.4. Spesifikasi Bevel gear pada joint 6**

No	Spesifikasi	Bevel Kecil	Bevel Besar
1.	Modul	5	5
2.	Sudut tekan ( $\alpha_o$ )	$20^\circ$	$20^\circ$
3.	Jumlah gigi (z)	10 buah	10 buah
4.	Sudut kerucut jarak bagi ( $\delta$ )	$45^\circ$	$45^\circ$
5.	Lebar sisi (b)	11,55 mm	11,55 mm
6.	Diameter lingkaran jarak bagi (d)	49,497 mm	49,497 mm
7.	Diameter lingkaran kepala (dk)	56,57 mm	56,57 mm
8.	Jarak dari puncak ke puncak luar (X)	21,21 mm	21,21 mm
9.	Sudut kerucut kepala ( $\delta_k$ )	$53,13^\circ$	$53,13^\circ$
10.	Sudut kerucut kaki ( $\delta_f$ )	$35,368^\circ$	$35,368^\circ$
11.	Bahan roda gigi dengan perlakuan panas	S 45 C dengan perlakuan celup dingin dan temper	S 45 C dengan perlakuan celup dingin dan temper.



Untuk perancangan poros selanjutnya menggunakan data yang telah diperoleh sebelumnya, yaitu :

$$n_1 = 2500 \text{ rpm,}$$

$$n_2 = \frac{z_1}{z_2} n_1 = \frac{10}{10} \cdot 2500 = 2500 \text{ rpm}$$

daya yang ditransmisikan,  $P = 1,582 \text{ kW} = 2,12 \text{ Hp}$

torsi pada bevel gear kecil,

$$T_1 = \frac{71620 \times P}{n_1} = \frac{71620 \times 2,12}{2500} = 60,7337 \text{ kg.cm}$$

### poros roda gigi 1

- Daya yang ditransmisikan,  $P = 1,582 \text{ kW}$

Putaran roda gigi,  $n_1 = 2500 \text{ rpm}$

Torsi untuk perencanaan,  $T_1 = 60,7337 \text{ kg.cm} = 607,337 \text{ kg.mm}$

- bahan poros untuk roda gigi 1 menggunakan SNC 22 dengan  $\sigma_B = 100 \text{ kg/mm}^2$ , dengan pengerasan kulit serta menggunakan alur pasak. Faktor keamanan yang diambil  $S_{f1} = 6$  dan  $S_{f2} = 2$ , sehingga tegangan geser yang diijinkan,

$$\tau_a = \frac{\sigma_B}{(S_{f1} \times S_{f2})} = \frac{100}{(6 \times 2)} = 8,33 \text{ kg/mm}^2$$

faktor koreksi  $K_t = 1,5$  dan  $C_b = 2$

- Diameter poros,

$$d_{s1} = \left[ \frac{5,1}{\tau_a} K_t C_b T_1 \right]^{1/3} = \left[ \frac{5,1}{8,33} \cdot 1,5 \times 2 \times 607,337 \right]^{1/3} = 10,37 \approx 11 \text{ mm}$$

Ukuran bantalan yang memenuhi adalah 15 mm, sehingga poros bertingkat dengan diameter 11 mm dan 15 mm, tipe NU 202 dengan diameter luar 35 mm dan lebar bantalan 11 mm.



## Poros roda gigi 2

- Daya yang ditransmisikan,  $P = 1,582 \text{ kW} = 2,12 \text{ Hp}$

Putaran roda gigi,  $n_2 = 2500 \text{ rpm}$

Torsi untuk perencanaan,

$$T_2 = \frac{71620 \times P}{n_2} = \frac{71620 \times 2,12}{2500} = 60,7337 \text{ kg.cm} = 607,337 \text{ kg.mm}$$

- bahan poros untuk roda gigi 2 menggunakan SNC 22 dengan  $\sigma_B = 100 \text{ kg/mm}^2$ , dengan pengerasan kulit serta menggunakan alur pasak. Faktor keamanan yang diambil  $S_{f1} = 6$  dan  $S_{f2} = 2$ , sehingga tegangan geser yang diijinkan,

$$\tau_a = \frac{\sigma_B}{(S_{f1} \times S_{f2})} = \frac{100}{(6 \times 2)} = 8,33 \text{ kg/mm}^2$$

faktor koreksi  $K_t = 1,5$  dan  $C_b = 2$

- Diameter poros,

$$d_{s1} = \left[ \frac{5,1}{\tau_a} K_t C_b T_1 \right]^{1/3} = \left[ \frac{5,1}{8,33} \cdot (1,5 \times 2 \times 607,337) \right]^{1/3} = 10,37 \approx 11 \text{ mm}$$

Ukuran bantalan yang memenuhi adalah 15 mm, sehingga poros bertingkat dengan diameter 11 mm dan 15 mm, tipe NU 202 dengan diameter luar 35 mm dan lebar bantalan 11 mm.



**Perhitungan Planetary Gear**

UNIVERSITAS  
 GADJAH MADA

**Tabel III.D.5. Perhitungan Joint 6**

<b>Keterangan</b>	<b>JT6</b>
Torsi max. dinamika (Nm)	116.6850
$f_c$	1.25
T torsi rencana (N.m)	145.8563
P daya rencana (W)	865.528411

**Spesifikasi Motor Listrik**

Motor Model No.	P50B08100VCXS9
P daya motor listrik (kW)	
n kecepatan putaran max. (rpm)	2500
T torsi (N.mm)	5,952
T torsi (kg.mm)	607

**Perhitungan Reduction Unit**

n out (derajat/sec)	340
n out (rpm)	56.66666667
i rasio	44.11764706
Cek T rencana (N.m)	262.5882353
$\alpha$ sudut tekan (derajat)	20
m modul	3
do3 (mm)	120
z3	40
z1	20
z2	10
cek i setiap <i>planetary gear</i>	3
cek i	27
Cek T <sub>out</sub> torsi output (N.m)	160.704
do1 (mm)	60
do2 (mm)	30
ck kelonggaran puncak (mm)	0.75
dk1 diameter kepala (mm)	66



dk2 diameter kepala (mm)	36
dk3 diameter kepala (mm)	114
df1 diameter kaki (mm)	52.5
df2 diameter kaki (mm)	22.5
df3 diameter kaki (mm)	127.5
Y1 faktor bentuk	0.32
Y2 faktor bentuk	0.201
Y3 faktor bentuk	0.389
n1 kec. gear 1 (rpm)	2500
n2 kec. gear 2 (rpm)	5000
n3 kec. gear 3 (rpm)	833.3333333
n4 kec. gear 4 (rpm)	1666.666667
n5 kec. gear 5 (rpm)	277.7777778
n6 kec. gear 6 (rpm)	555.5555556
v1 kec. keliling gear 1 (m/s)	7.853981634
v2 kec. keliling gear 2 (m/s)	7.853981634
v3 kec. keliling gear 3 (m/s)	2.617993878
v4 kec. keliling gear 4 (m/s)	2.617993878
v5 kec. keliling gear 5 (m/s)	0.872664626
v6 kec. keliling gear 6 (m/s)	0.872664626
T1 torsi gear 1 (kg.mm)	607.337
T2 torsi gear 2 (kg.mm)	101.2228333
T3 torsi gear 3 (kg.mm)	1822.011
T4 torsi gear 4 (kg.mm)	303.6685
T5 torsi gear 5 (kg.mm)	5466.033
T6 torsi gear 6 (kg.mm)	911.0055
ft1 gaya tangensial gear 1 (kg)	20.24456667
ft2 gaya tangensial gear 2 (kg)	6.748188889
ft3 gaya tangensial gear 3 (kg)	60.7337
ft4 gaya tangensial gear 4 (kg)	20.24456667
ft5 gaya tangensial gear 5 (kg)	182.2011
ft6 gaya tangensial gear 6 (kg)	60.7337
fv1 faktor dinamis gear 1	0.433088491
fv2 faktor dinamis gear 2	0.433088491
fv3 faktor dinamis gear 3	0.533998446



fv4 faktor dinamis gear 4	0.533998446
fv5 faktor dinamis gear 5	0.774660419
fv6 faktor dinamis gear 6	0.774660419
Bahan Roda Gigi 1	S 45 C
Bahan Roda Gigi 2	S 45 C
Bahan Roda Gigi 7	S 15 CK
Bahan Roda Gigi 3	SNC 2
Bahan Roda Gigi 4	SNC 2
Bahan Roda Gigi 8	S 15 CK
Bahan Roda Gigi 5	S 15 CK
Bahan Roda Gigi 6	S 15 CK
Bahan Roda Gigi 9	S 15 CK
G <sub>a1</sub> teg lentur ipm (kg/mm <sup>2</sup> )	30
G <sub>a2</sub> teg lentur ipm (kg/mm <sup>2</sup> )	30
G <sub>a7</sub> teg lentur ipm (kg/mm <sup>2</sup> )	30
G <sub>a3</sub> teg lentur ipm (kg/mm <sup>2</sup> )	60
G <sub>a4</sub> teg lentur ipm (kg/mm <sup>2</sup> )	60
G <sub>a7</sub> teg lentur ipm (kg/mm <sup>2</sup> )	30
G <sub>a5</sub> teg lentur ipm (kg/mm <sup>2</sup> )	30
G <sub>a6</sub> teg lentur ipm (kg/mm <sup>2</sup> )	30
G <sub>a9</sub> teg lentur ipm (kg/mm <sup>2</sup> )	30
H <sub>n1</sub> kekerasan Brinell	200
H <sub>n2</sub> kekerasan Brinell	200
H <sub>n7</sub> kekerasan Brinell	400
H <sub>n5</sub> kekerasan Brinell	300
H <sub>n4</sub> kekerasan Brinell	300
H <sub>n5</sub> kekerasan Brinell	400
H <sub>n5</sub> kekerasan Brinell	400
H <sub>n6</sub> kekerasan Brinell	400
H <sub>n9</sub> kekerasan Brinell	400
kH1 faktor teg kontak	0.053
kH2 faktor teg kontak	0.1072
kH3 faktor teg kontak	0.13
kH4 faktor teg kontak	0.168



KH5 faktor teg kontak	0.311
KH6 faktor teg kontak	0.311
F'b1 beban lentur ijin (kg/mm)	12.47294854
F'b2 beban lentur ijin (kg/mm)	7.834570802
F'b7 beban lentur ijin (kg/mm)	15.16242807
F'b3 beban lentur ijin (kg/mm)	30.75831048
F'b4 beban lentur ijin (kg/mm)	19.32006377
F'b8 beban lentur ijin (kg/mm)	18.69528559
F'b5 beban lentur ijin (kg/mm)	22.31022005
F'b6 beban lentur ijin (kg/mm)	14.01360697
F'b9 beban lentur ijin (kg/mm)	27.12086125
F'H1&2 beban permukaan ijin (kg/mm)	0.918147601
F'H2&7 beban permukaan ijin (kg/mm)	2.228500139
F'H3&4 beban permukaan ijin (kg/mm)	2.776791919
F'H4&8 beban permukaan ijin (kg/mm)	4.306163468
F'H5&6 beban permukaan ijin (kg/mm)	9.636775607
F'H6&9 beban permukaan ijin (kg/mm)	11.56413073
F <sup>1</sup> <sub>min1&amp;2</sub>	0.918147601
F <sup>1</sup> <sub>min2&amp;7</sub>	2.228500139
F <sup>1</sup> <sub>min3&amp;4</sub>	2.776791919
F <sup>1</sup> <sub>min4&amp;8</sub>	4.306163468
F <sup>1</sup> <sub>min5&amp;6</sub>	9.636775607
F <sup>1</sup> <sub>min6&amp;9</sub>	11.56413073
b1&b2 lebar sisi (mm)	22.04935965
b2&b7 lebar sisi (mm)	3.028130342
b3&b4 lebar sisi (mm)	21.87189454
b4&b8 lebar sisi (mm)	4.701300083
b5&b6 lebar sisi (mm)	18.90685302
b6&b9 lebar sisi (mm)	5.251903617
b1&b2 lebar sisi (mm)	23
b2&b7 lebar sisi (mm)	23
6<=b1/m<=10	7.666666667
6<=b2/m<=10	7.666666667
d01/b1>=1,3333	2.608695652
d02/b2>=1,3333	1.304347826



## Perhitungan Poros

Bahan Poros	S30C
$\sigma_t$ teg tarik poros (kg/mm <sup>2</sup> )	48
SF1	6
SF2	1.3
K1	1.5
Cb	2
$\sigma_{a1}$ teg.geser ijin poros (kg/mm <sup>2</sup> )	6.153846154
$d_{s1}$ diameter poros min. (mm)	11.47250297
$d_{s2}$ diameter poros min. (mm)	6.313561693
$d_{s3}$ diameter poros min. (mm)	16.54621247
$d_{s4}$ diameter poros min. (mm)	9.105731639
$d_{s5}$ diameter poros min. (mm)	23.86376783
$d_{s6}$ diameter poros min. (mm)	13.13273754
$d_{s1}$ diameter poros 1 yg dipilih (mm)	12
$d_{s2}$ diameter poros 2 yg dipilih (mm)	10
$d_{s3}$ diameter poros 3 yg dipilih (mm)	18
$d_{s4}$ diameter poros 4 yg dipilih (mm)	10
$d_{s5}$ diameter poros 5 yg dipilih (mm)	24
$d_{s6}$ diameter poros 6 yg dipilih (mm)	15

## Pemilihan Bantalan Luncur

$P_{a2}$ tekanan bantalan 2 ijin(kg/mm <sup>2</sup> )	1,78
$P_{a4}$ tekanan bantalan 4 ijin(kg/mm <sup>2</sup> )	1,78
$P_{a6}$ tekanan bantalan 6 ijin(kg/mm <sup>2</sup> )	2,35
Bantalan 2	Perunggu
Bantalan 4	Perunggu
Bantalan 6	Perunggu timah hitam



## BAB IV

### ANALISIS STRUKTUR ROBOT FS30L

Kekuatan struktur sebuah robot sangat menentukan kehandalan robot tersebut untuk melakukan berbagai pekerjaan, karena meskipun sebuah robot memiliki sumber tenaga besar dan sistem transmisi yang baik jika tidak didukung oleh desain struktur yang baik robot tersebut tidak akan mampu bekerja secara efisien, efektif dan akurat. Dengan banyaknya kompetitor di dunia industri robot dewasa ini, desain struktur sebuah robot merupakan salah satu faktor penting apakah sebuah produsen robot mampu bersaing. Para produsen robot dewasa ini saling bersaing untuk menciptakan robot dengan *work envelopes* yang luas namun dengan berat yang ringan mungkin untuk dapat digerakkan dengan sumber tenaga seperti motor listrik, hidrolik maupun pneumatik yang sekecil mungkin. Meskipun para perancang robot berusaha membuat robot dengan berat dan dimensi sekecil mungkin, faktor kekuatan struktur sangatlah diperhatikan karena sangat berpengaruh terhadap umur, ketelitian, dan kemampuan menahan beban sebuah robot.

Faktor yang dijadikan bahan pertimbangan dalam hal mendesain sebuah struktur dari robot adalah bahan yang digunakan, pengaruh lingkungan operasional seperti ; suhu kerja, kelembaban, ketahanan terhadap api, kotoran, minyak, dan sebagainya.

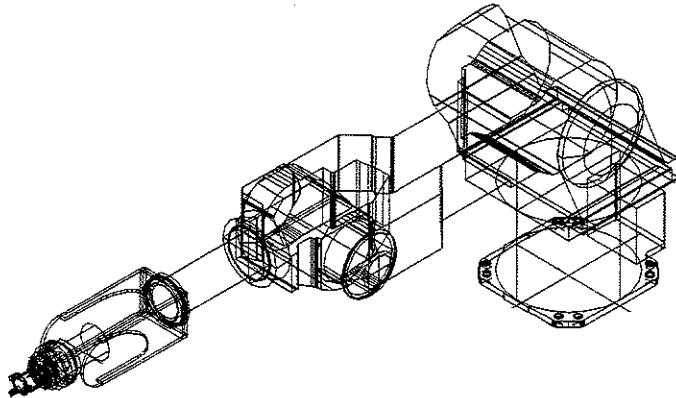
Untuk jenis robot *material handling*, pemilihan bahan yang dipakai ditentukan dari berbagai aspek seperti, beban *payload*, jangkauan maksimum, serta kecepatan dan percepatan robot dalam bergerak menentukan kualitas kerja robot. Untuk robot dengan beban *payload* kecil sampai menengah dapat menggunakan bahan yang ringan namun cukup kuat seperti paduan Aluminium yang telah mengalami pengerasan kulit.

Untuk robot Kawasaki FS30L penulis menggunakan bahan paduan Aluminium 2014-T4 komposisi Al-Cu-Mg, dengan penuaan alamiah penuh setelah perlakuan pelarutan<sup>21</sup>. Paduan Aluminium telah dikenal sejak dulu sebagai bahan yang kuat dan ringan sehingga sering digunakan untuk bahan pembuatan pesawat terbang.

<sup>21</sup> Surdia Tata, Saito Shinroku, Pengetahuan Bahan Teknik, PT. Pradnya Paramita Jakarta, 1992 hal. 136



Desain struktur robot Kawasaki FS30L seperti pada umumnya robot-robot lain di industri, menggunakan sistem *monococue*, yakni bodi robot berfungsi sebagai rangka yang akan menahan beban tiap *link*-nya.



**Gambar IV.1. Posisi Robot untuk Momen Maksimum**

Pada masing-masing *link* akan mengalami gaya geser, momen lengkung, momen puntir, gaya tekan/tarik sesuai dengan keadaan dan posisi gerakannya. Seperti terlihat pada hasil perhitungan Bab sebelumnya momen torsi terjadi pada saat lengan robot berada pada posisi jangkauan terjauh horizontal dan pada posisi ini dijadikan acuan untuk merancang robot, dimulai dari *link* 5 sampai pada *base* dengan pertimbangan bahwa berat *link* dan beban *link* merupakan beban bagi *link* sebelumnya.

#### IV.1. Kekuatan Struktur Link-5

Ditentukan terlebih dahulu parameter bahan struktur, dimensi umum *link*-5 dan reaksi yang terjadi. Untuk *Link*-5 sebagai berikut :

Bahan *Link*-5 menggunakan paduan Alumunium 2014 T 4

Kekuatan tarik,  $\sigma_T = 49,0 \text{ kgf/mm}^2$



Kekuatan geser,  $\tau_G = 29,5 \text{ kgf/mm}^2$   
 Angka keamanan,  $n = 2$

Kekuatan tarik yang diijinkan,  $\sigma_{Ta} = \frac{\sigma_T}{n} = 24,5 \text{ kgf/mm}^2$

Kekuatan geser yang diijinkan,  $\tau_{Ga} = \frac{\tau_G}{n} = 1,75 \text{ kgf/mm}^2$

Pada posisi lengan robot horizontal (posisi 6), momen maksimum terjadi pada *joint 5* yang berasal dari berat *link-5*, *link-6*, *gripper* dan material. Untuk memudahkan dalam perhitungan kita asumsikan *link-5* berbentuk lurus dan penampang berbentuk *hollow circle* dengan mengambil diameter terkecil dari *link*.

$F_4 = \text{berat material} = 1 \text{ kg}$

$F_3 = \text{berat gripper} = 1,735 \text{ kg}$

$F_2 = \text{berat link-6} = 0,167 \text{ kg}$

$F_1 = \text{berat link-5} = 2,324 \text{ kg}$

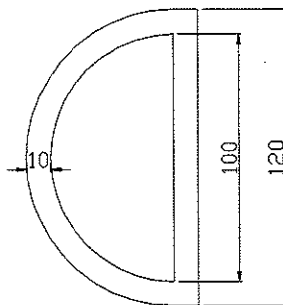
$M_5 = \text{momen joint 5} = 759,72 \times 3 = 2279,16 \text{ kg.mm}$

$R_5 = \text{reaksi tumpuan joint 5} = 5,226 \text{ kg}$

$r_0 = 60 \text{ mm}$  (jari-jari lingkaran luar)

$r_1 = 50 \text{ mm}$  (jari-jari lingkaran dalam)

$c = 50 + 5 = 55 \text{ mm}$  (sumbu netral)



Gambar IV.2. Penampang link 5



Momen Inersia,  $I = \frac{\pi \cdot (r_0^4 - r_1^4)}{4} = 5,27 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$

Karena penampang berbentuk setengah lingkaran maka momen inersia,

$$I = 5,27 \cdot 10^6 / 2 = 2,635 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Tegangan lengkung pada link 5 (tarik/tekan sejajar sumbu),  $\sigma_{L5}$

$$\sigma_{L5} = \frac{M_5 \cdot 9,807 \cdot c}{I} = 0,466 \text{ kgf/mm}^2$$

$\sigma_{L5} \ll \sigma_{Ta}$ , sehingga struktur aman terhadap momen lengkung.

Reaksi geseran maksimum terjadi antara F1 dan R5.

Luas penampang,  $A = \frac{\pi \cdot (r_0^2 - r_i^2)}{2} + 2 \cdot r_i \cdot 10 = 2727 \text{ mm}^2$

Tegangan geser,  $\tau_{G5} = \frac{R_5 \cdot 9,807}{A} = 0,0188 \text{ kgf/mm}^2$

$\tau_{G5} \ll \tau_{ga}$ , sehingga struktur aman terhadap reaksi geseran.

#### IV.2. Kekuatan Struktur Link-4

*Link-4* tersusun menjadi 2 bagian utama yang melakukan gerak rotasi dengan sumbu putar sejajar dengan panjang lengan. Kedua bagian tersebut terbuat dari bahan yang sama yakni Alumunium paduan 2014 T 4

Kekuatan tarik,  $\sigma_T = 49,0 \text{ kgf/mm}^2$

Kekuatan geser,  $\tau_G = 29,5 \text{ kgf/mm}^2$

Angka keamanan,  $n = 2$

Kekuatan tarik yang diijinkan,  $\sigma_{Ta} = \frac{\sigma_T}{n} = 24,5 \text{ kgf/mm}^2$

Kekuatan geser yang diijinkan,  $\tau_{Ga} = \frac{\tau_G}{n} = 1,75 \text{ kgf/mm}^2$



$F_6 = \text{berat material} = 1 \text{ kg}$

$F_5 = \text{berat gripper} = 1,735 \text{ kg}$

$F_4 = \text{berat link-6} = 0,167 \text{ kg}$

$F_3 = \text{berat link-5} = 2,324 \text{ kg}$

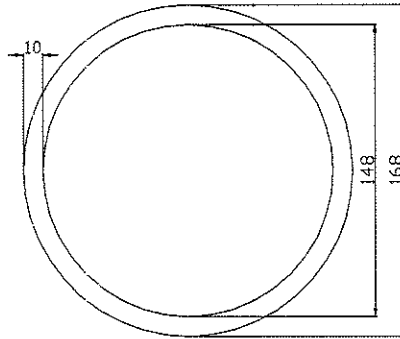
$F_2 = \text{berat link-4 (bagian II)} = 0,167 \text{ kg}$

$F_1 = \text{berat link-4 (bagian I)} = 2,324 \text{ kg}$

$M_4 = \text{momen joint 4} = 4875 \times 3 = 14625 \text{ kg.mm}$

$R_4 = \text{reaksi tumpuan joint 4} = 27,529 \text{ kg}$

- Bagian pertama (I) diasumsikan berbentuk silinder berlubang dengan ;



**Gambar IV.3. Penampang link-4(bagian I)**

Jari-jari lingkaran luar,  $r_0 = 84$

Jari-jari lingkaran dalam,  $r_1 = 74$

Sumbu netral,  $c = 79$

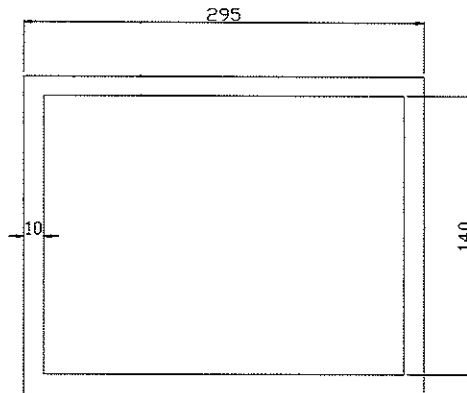
Momen Inersia,  $I_1 = \frac{\pi \cdot (r_0^4 - r_1^4)}{4} = 1,56 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$

Luas penampang,  $A = \frac{\pi \cdot (r_0^2 - r_1^2)}{2} = 4963,72 \text{ mm}^2$



- Bagian kedua (II) diasumsikan berbentuk balok berlubang dengan ;

UNIVERSITAS  
 GADJAH MADA



**Gambar IV.4. Penampang link-4(bagian II)**

Lebar penampang,  $b = 295 \text{ mm}$

Tinggi penampang,  $h = 160 \text{ mm}$

$t = 10 \text{ mm}$

Sumbu netral,  $c = h/2 = 80 \text{ mm}$

Luas penampang,  $A = 8700 \text{ mm}^2$

$$\text{Momen inersia, } I_2 = \frac{(b \cdot h^3 - (b-t)(h-t)^3)}{12} = 2,05 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

$$\text{Momen inersia total, } I = I_1 + I_2 = 3,61 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

Tegangan lengkung pada link 4 (tarik/tekan sejajar sumbu),  $\sigma_4$

$$\sigma_{L4} = \frac{M_4 \cdot 9,807 \cdot c}{I} = 0,314 \text{ kgf/mm}^2$$

$\sigma_{L4} \ll \sigma_{Ta}$ , sehingga struktur aman terhadap momen lengkung.

$$\text{Tegangan geser, } \tau_G = \frac{R_4 \cdot 9,807}{A} = 0,054 \text{ kgf/mm}^2$$

$\tau_{G4} \ll \tau_{ga}$ , sehingga struktur aman terhadap reaksi geseran.



### IV.3. Kekuatan struktur Link-3

UNIVERSITAS  
 GADJAH MADA

Pada *Link 3* terdapat 2 buah transmisi dan 2 buah motor listrik yang masing-masing menggerakkan *link 4* dan *link 3* itu sendiri. Dengan adanya kedua motor dan transmisi tersebut maka dimensi *link 3* relatif lebih besar.

*Link 3* terbuat dari bahan yang sama yakni Alumunium paduan 2014 T 4,

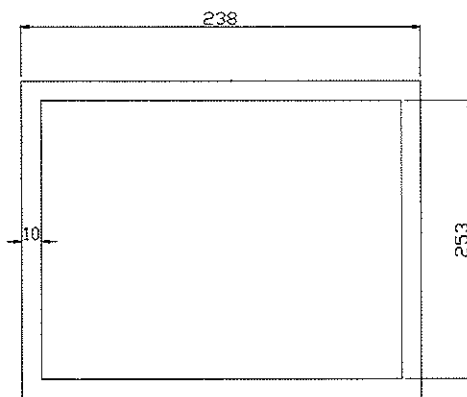
Kekuatan tarik,  $\sigma_T = 49,0 \text{ kgf/mm}^2$

Kekuatan geser,  $\tau_G = 29,5 \text{ kgf/mm}^2$

Angka keamanan,  $n = 2$

Kekuatan tarik yang diijinkan,  $\sigma_{Ta} = \frac{\sigma_T}{n} = 24,5 \text{ kgf/mm}^2$

Kekuatan geser yang diijinkan,  $\tau_{Ga} = \frac{\tau_G}{n} = 1,75 \text{ kgf/mm}^2$



**Gambar IV.5. Penampang Link-3**

Diasumsikan penampang *link-3* berbentuk balok berlubang,

Lebar penampang,  $b = 238 \text{ mm}$

Tinggi penampang,  $h = 273 \text{ mm}$

$t = 10 \text{ mm}$

Sumbu netral,  $c = h/2 = 136,5 \text{ mm}$

Luas penampang,  $A = 9820 \text{ mm}^2$



Momen inersia,  $I_2 =$

$$I_2 = \frac{(bh^3 - (b-t)(h-t)^3)}{12} = 5,79 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

$F_7 =$  berat material = 1 kg

$F_6 =$  berat gripper = 1,735 kg

$F_5 =$  berat link-6 = 0,167 kg

$F_4 =$  berat link-5 = 2,324 kg

$F_3 =$  berat link-4 (bagian II) = 0,167 kg

$F_2 =$  berat link-4 (bagian I) = 2,324 kg

$F_1 =$  berat link-3 = 61,257 kg

$M_3 =$  momen joint 3 =  $2115 \times 3 = 6345 \text{ kg.mm}$

$R_3 =$  reaksi tumpuan joint 3 = 88,786 kg

Tegangan lengkung pada link 3 (tarik/tekan sejajar sumbu),  $\sigma_3$

$$\sigma_{L3} = \frac{M_3 \cdot 9,807 \cdot c}{I} = 0,147 \text{ kgf/mm}^2$$

$\sigma_{L3} \ll \sigma_{Ta}$ , sehingga struktur aman terhadap momen lengkung.

Tegangan geser,  $\tau_G = \frac{R_3 \cdot 9,807}{A} = 0,089 \text{ kgf/mm}^2$

$\tau_{G3} \ll \tau_{ga}$ , sehingga struktur aman terhadap reaksi geseran.

#### IV.4. Kekuatan struktur Link-2

Link 2 menggunakan bahan yang sama dengan link sebelumnya yakni paduan Aluminium 2014 T 4 ;

Kekuatan tarik,  $\sigma_T = 49,0 \text{ kgf/mm}^2$

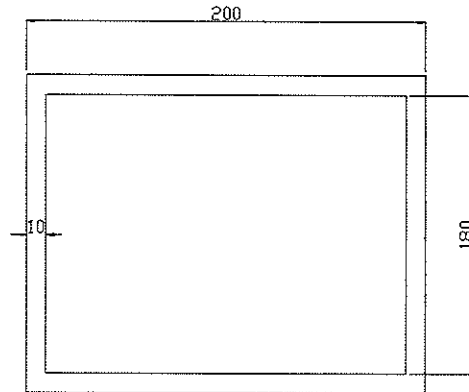
Kekuatan geser,  $\tau_G = 29,5 \text{ kgf/mm}^2$

Angka keamanan,  $n = 2$

Kekuatan tarik yang diijinkan,  $\sigma_{Ta} = \frac{\sigma_T}{n} = 24,5 \text{ kgf/mm}^2$



Kekuatan geser yang diijinkan,  $\tau_{Ga} = \frac{\tau G}{n} = 1,75 \text{ kgf/mm}^2$



**Gambar IV.6. Penampang Link-2**

Diasumsikan bentuk *Link 2* adalah balok berlubang diambil ukuran terkecil

Lebar penampang,  $b = 200 \text{ mm}$

Tinggi penampang,  $h = 200 \text{ mm}$

$t = 10 \text{ mm}$

Sumbu netral,  $c = h/2 = 100 \text{ mm}$

Luas penampang,  $A = 7600 \text{ mm}^2$

Momen inersia,  $I = \frac{(bh^3 - (b-t)(h-t)^3)}{12} = 2,47 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$

$F_8 = \text{berat material} = 1 \text{ kg}$

$F_7 = \text{berat gripper} = 1,735 \text{ kg}$

$F_6 = \text{berat link-6} = 0,167 \text{ kg}$

$F_5 = \text{berat link-5} = 2,324 \text{ kg}$

$F_4 = \text{berat link-4 (bagian II)} = 0,167 \text{ kg}$

$F_3 = \text{berat link-4 (bagian I)} = 2,324 \text{ kg}$

$F_2 = \text{berat link-3} = 61,257 \text{ kg}$

$F_1 = \text{berat link-2} = 150,285 \text{ kg}$

$M_2 = \text{momen joint 3} = 5206,25 \times 3 = 15618,75 \text{ kg.mm}$



$R_2 = \text{reaksi tumpuan joint 2} = 239,071 \text{ kg}$

Tegangan lengkung pada link 2 (tarik/tekan sejajar sumbu),  $\sigma_2$

$$\sigma_{L2} = \frac{M_2 \cdot 9,807 \cdot c}{I} = 0,62 \text{ kgf/mm}^2$$

$\sigma_{L2} \ll \sigma_{Ta}$ , sehingga struktur aman terhadap momen lengkung.

$$\text{Tegangan geser, } \tau_G = \frac{R_2 \cdot 9,807}{A} = 0,308 \text{ kgf/mm}^2$$

$\tau_{G2} \ll \tau_{ga}$ , sehingga struktur aman terhadap reaksi geseran

#### IV.5. Kekuatan struktur Link-1

Untuk *link* 1 bahan yang dipergunakan sama dengan sebelumnya yakni paduan Aluminium 2014 T 4;

$$\text{Kekuatan tarik, } \sigma_T = 49,0 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\text{Kekuatan geser, } \tau_G = 29,5 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\text{Angka keamanan, } n = 2$$

$$\text{Kekuatan tarik yang diijinkan, } \sigma_{Ta} = \frac{\sigma_T}{n} = 24,5 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\text{Kekuatan geser yang diijinkan, } \tau_{Ga} = \frac{\tau_G}{n} = 1,75 \text{ kgf/mm}^2$$

Gaya geser maksimum yang dialami *joint* 1 terjadi ketika posisi lengan robot lurus vertikal sehingga gaya gesernya merupakan penjumlahan dari berat material, *gripper*, *link* 6, *link* 5, *link* 4, *link* 3 serta *link* 2.

$$F_8 = \text{berat material} = 1 \text{ kg}$$

$$F_7 = \text{berat gripper} = 1,735 \text{ kg}$$

$$F_6 = \text{berat link-6} = 0,167 \text{ kg}$$

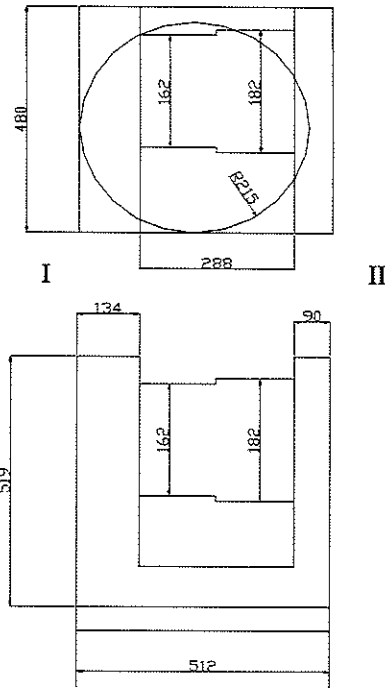
$$F_5 = \text{berat link-5} = 2,324 \text{ kg}$$

$$F_4 = \text{berat link-4 (bagian II)} = 0,167 \text{ kg}$$

$$F_3 = \text{berat link-4 (bagian I)} = 2,324 \text{ kg}$$

$$F_2 = \text{berat link-3} = 61,257 \text{ kg}$$

$$F_1 = \text{berat link-2} = 150,285 \text{ kg}$$



Gambar IV.7. penampang link-1

Gaya yang bekerja pada *joint* 1 adalah gaya geser ganda

$$\text{Luas penampang, } AI = \pi/4 \cdot (162)^2 = 20611,99 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas penampang, } AII = \pi/4 \cdot (182)^2 = 26015,53 \text{ mm}^2$$

$$\text{Gaya geser maksimum, } F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8 = 239,071 \text{ kg}$$

Tegangan geser yang terjadi pada *joint* 1 adalah,

$$\tau_G = \frac{F \cdot 9,807}{AI + AII} = 0,05 \text{ kgf/mm}^2$$

Tegangan geser yang dialami masing-masing bagian I dan bagian II adalah,

$$\tau_{GI} = \frac{AII \cdot \tau_G}{AI + AII} = 0,028 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\tau_{GII} = \frac{AI \cdot \tau_G}{AI + AII} = 0,022 \text{ kgf/mm}^2$$

sehingga dari perhitungan diatas ( $\tau_{GI,II} \ll \tau_{Ga}$ ) disimpulkan bahwa struktur aman terhadap tegangan geser maksimum.

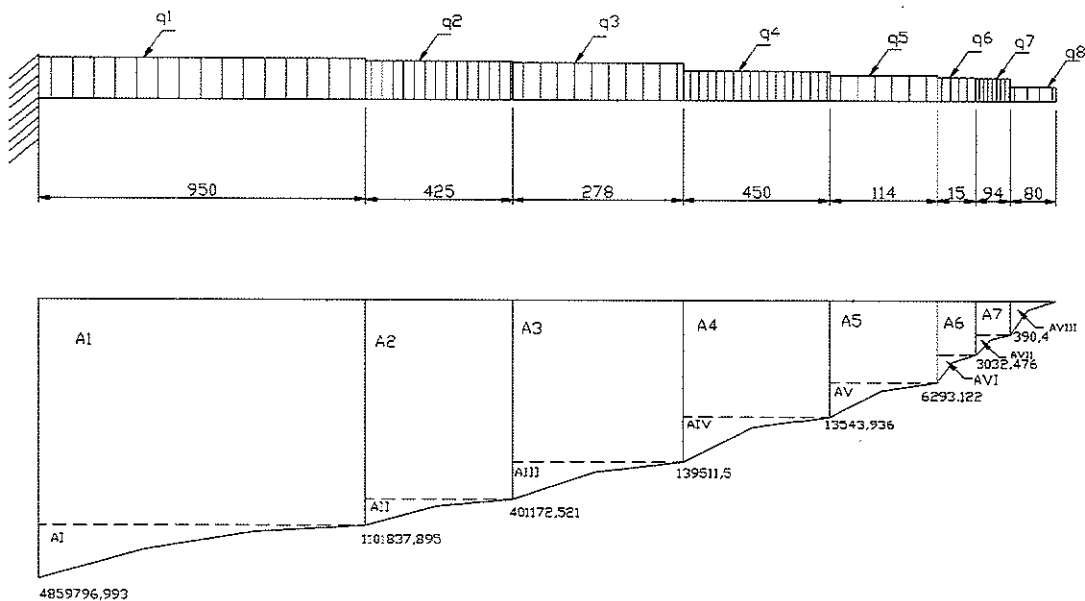


### IV.6. Perhitungan Defleksi tiap Link

Perhitungan defleksi dari struktur lengan robot dilakukan guna mengetahui tingkat ketelitian dari sebuah robot, meskipun penyimpangan ini dalam hal tertentu dapat diatasi dengan adanya sistem sensor robot itu sendiri.

Untuk menghitung defleksi lengan robot dapat digunakan persamaan momen area, dengan terlebih dulu mengetahui gaya-gaya yang bekerja pada lengan robot, yakni :

- $F_8 = \text{berat material} = 1 \text{ kg}$
- $F_7 = \text{berat gripper} = 1,735 \text{ kg}$
- $F_6 = \text{berat link-6} = 0,167 \text{ kg}$
- $F_5 = \text{berat link-5} = 2,324 \text{ kg}$
- $F_4 = \text{berat link-4 (bagian II)} = 0,167 \text{ kg}$
- $F_3 = \text{berat link-4 (bagian I)} = 2,324 \text{ kg}$
- $F_2 = \text{berat link-3} = 61,257 \text{ kg}$
- $F_1 = \text{berat link-2} = 150,285 \text{ kg}$



**Gambar IV.8. Diagram Gaya Beban pada Lengan Robot**



Momen Inersia batang didapat dari perhitungan sebelumnya, dibantu dengan menggunakan AutoCad untuk mencari momen inersia Gripper.

$I_8 = 1,25 \times 10^5 \text{ mm}^4$	$q_8 = 0,122$
$I_7 = 2 \times 10^8 \text{ mm}^4$	$q_7 = 0,18$
$I_6 = 4,9 \times 10^6 \text{ mm}^4$	$q_6 = 0,11$
$I_5 = 2,635 \times 10^6 \text{ mm}^4$	$q_5 = 0,2$
$I_4 = 2,05 \times 10^7 \text{ mm}^4$	$q_4 = 0,00364$
$I_3 = 1,56 \times 10^7 \text{ mm}^4$	$q_3 = 0,082$
$I_2 = 5,79 \times 10^7 \text{ mm}^4$	$q_2 = 1,41$
$I_1 = 2,47 \times 10^7 \text{ mm}^4$	$q_1 = 1,55$

Dengan menggunakan teori *moment area*,

Luasan momen/ $EI_i$ ,  $A_i$

Titik pusat luasan momen,  $X_i$  (diukur dari ujung material)

$A_1 = 5,83 \times 10^{-4} \text{ Nmm}^2$	$X_1 = 1931$
$A_2 = 4,02 \times 10^{-5} \text{ Nmm}^2$	$X_2 = 1243,5$
$A_3 = 3,4 \times 10^{-5} \text{ Nmm}^2$	$X_3 = 892$
$A_4 = 4,09 \times 10^{-6} \text{ Nmm}^2$	$X_4 = 528$
$A_5 = 3,73 \times 10^{-6} \text{ Nmm}^2$	$X_5 = 246$
$A_6 = 1,27 \times 10^{-7} \text{ Nmm}^2$	$X_6 = 181,5$
$A_7 = 2 \times 10^{-9} \text{ Nmm}^2$	$X_7 = 127$
$A_I = 6,61 \times 10^{-4} \text{ Nmm}^2$	$X_I = 2168,5$
$A_{II} = 2,35 \times 10^{-5} \text{ Nmm}^2$	$X_{II} = 1349,75$
$A_{III} = 2,12 \times 10^{-5} \text{ Nmm}^2$	$X_{III} = 961,5$
$A_{IV} = 1,27 \times 10^{-5} \text{ Nmm}^2$	$X_{IV} = 640,5$



$$A_{IV} = 1,07 \times 10^{-5} \text{ Nmm}^2$$

$$X_{IV} = 840,5$$

$$A_V = 1,43 \times 10^{-6} \text{ Nmm}^2$$

$$X_V = 274,5$$

$$A_{VI} = 4,5 \times 10^{-8} \text{ Nmm}^2$$

$$X_{VI} = 185,25$$

$$A_{VII} = 5 \times 10^{-9} \text{ Nmm}^2$$

$$X_{VII} = 150,5$$

$$A_{VIII} = 1,14 \times 10^{-6} \text{ Nmm}^2$$

$$X_{VIII} = 60$$

$$X_{tot} = \frac{X_I A_I + X_2 A_2 + \dots + X_7 A_7 + X_I A_I + X_{II} A_{II} + \dots + X_{VIII} A_{VIII}}{A_1 + A_2 + \dots + A_7 + A_I + A_{III} + \dots + A_{VIII}}$$

$$X_{tot} = \frac{2,7}{1,39 \cdot 10^{-3}} = 1942,21 \text{ mm}$$

sehingga, defleksi yang terjadi pada ujung material,  $\delta_{max}$

$$\delta_{max} = A_{tot} \times X_{tot}$$

$$= 1,39 \cdot 10^{-3} \times 1942,21 \text{ mm}$$

$$= 2,7 \text{ mm} \approx 0,0027 \text{ m}$$

## OPERASIONAL DAN PERAWATAN ROBOT FS30L

Perawatan dalam suatu sistem robot merupakan hal mutlak yang tidak mungkin dihindari meskipun hal ini membutuhkan biaya yang tidak sedikit. Beberapa metode perawatan yang ada di industri sekarang ini berkembang cukup cepat, seiring dengan banyaknya metode tes kemampuan komponen mesin dan penelitian-penelitian tentang bahan.

Industri Robot Kawasaki melakukan *preventive maintenance* untuk produk-produknya, meskipun cara ini memerlukan biaya yang besar.

Dalam bab ini penulis akan memberikan informasi tentang perawatan robot, khususnya untuk komponen mekanik Kawasaki FS30L. Informasi tersebut adalah tentang pelumasan dan jadwal pengecekan dan perawatan robot FS30L secara keseluruhan yang dianjurkan oleh produsen robot ini, yakni Kawasaki.

Perawatan robot ini dimaksudkan untuk memastikan kemampuan kerja robot dan menjaga umur komponen-komponennya agar bertahan lebih lama. Jika prosedur perawatan tersebut tidak dilakukan, maka umur komponen-komponen robot tersebut akan menjadi pendek dan membutuhkan *down time* yang sebenarnya dapat dihindari.

Perawatan harus dilakukan dalam interval 5000 jam, dengan *overhauls* secara menyeluruh dalam 20.000 jam. *Hour meter* yang ada pada kontroller digunakan untuk memonitor waktu interval perawatan tersebut, waktu yang tertera pada *hour meter* merupakan total waktu kerja robot (motor power ON).

### V.1. Jadwal Pengecekan

Jadwal pengecekan secara umum menggambarkan pengecekan-pengecekan dan perawatan yang diperlukan oleh robot, seperti terlihat dalam tabel V.1. dibawah ini.



**Tabel V.1. Preventative Maintenance Schedule**

Items	Maintenance Period	Daily Checks	5,000 Hours	10,000 Hours	15,000 Hours	20,000 Hours
1. Flaws on Robot		*	*	*	*	
2. Check Cables and Hoses		*	*	*	*	
3. Movement and Abnormal Noises		*	*	*	*	
4. Positioning Accuracy of Robot		*	*	*	*	
5. Replenish Grease in Gears and Cyclo Reduction Units			*		*	
6. Replace Grease in Gears and Cyclo Reduction Units				*		
7. Check Timing Belts				*		
8. Check Machine Cables				*		
9. Check Bolt Tightness				*		
10. Complete Overhaul						*

<sup>22</sup> [www.kawasakirobot.com](http://www.kawasakirobot.com)



V.1.1 Pengecekan perhari

UNIVERSITAS  
GADJAH MADA

Pengecekan-pengecekan tertentu perlu dilakukan setiap harinya guna mendukung *preventive maintenance* yang terlihat dalam tabel V.2. dibawah ini :

**Tabel V.2. Daily Maintenance Checks<sup>23</sup>**

<u>Item to Check</u>	<u>Points to Inspect</u>	<u>Required Maintenance</u>
1. Robot Damage	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Check robot for any obvious mechanical damage caused by interference with fixtures, etc. Carefully inspect the wrist.</li> <li>2. Inspect all covers on robot for mounting integrity, and any damage caused by interference.</li> </ol>	<p>Repair or replace as necessary.</p> <p>Secure all covers, and repair or replace as needed. Remove damaged cover(s) and inspect for any concealed damage to cables, hoses, encoders, or motors.</p>
2. Cables	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Check both electrical harnesses for rubbing, clamps, chafing, or abrasion against the mechanical unit.  Also check for kinks, twists, or irregular bends in the electrical harnesses.</li> <li>2. Check rubber hoses and air lines for defects.</li> </ol>	<p>Readjust or replace harness if the defect warrants replacement.</p> <p>Readjust clamps, or repair or replace rubber hoses or air lines.</p>
3. Robot Motion	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Does each axis move smoothly?</li> <li>2. Does any axis make abnormal noise or system vibration?</li> <li>3. Does robot overshoot taught point locations?</li> <li>4. Do servo motors generate an unusually large amount of heat? Normal surface temperature should be lower than 80° C (176° F).</li> </ol>	<p>Check the drive system for proper lubrication. Refer to 5.2.2 for specific instructions.</p> <p>Check the drive system.</p> <p>Check the drive system.</p> <p>Check for binding or dragging.</p>
4. Position Accuracy	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Compare new position with original position. When robot motion stops, check for repeatability.</li> </ol>	<p>Check servo drive for errors. Check and adjust backlash if necessary.</p>

<sup>23</sup> [www.kawasakirobot.com](http://www.kawasakirobot.com)



Pengecekan per 5000 jam ini diperuntukkan untuk dilakukan setelah 5000 jam dan 15000 jam operasional, seperti terlihat pada tabel V.3. di bawah ini :

**Tabel V. 3. 5,000 Hour Maintenance Checks<sup>24</sup>**

<u>Item to Check</u>	<u>Points to Inspect</u>	<u>Required Maintenance</u>
1. Mechanical Unit	1. Component mounting screws	Check torque and integrity
	2. Connectors	Check torque and integrity
2. R-axis	1. Cyclo reduction gear	Add 125 cc of Moly White RE No. 00. Refer to 5.2.2.1.
3. O-axis	1. Cyclo reduction gear	Add 125 cc of Moly White RE No. 00. Refer to 5.2.2.2.
4. D-axis	1. Cyclo reduction gear	Add 45 cc of Moly White RE No. 00. Refer to 5.2.2.3.
6. S-axis	1. Cyclo reduction gear	Add 150 cc of Moly White RE No. 00. Refer to 5.2.2.4.
7. B-axis	1. Cyclo reduction gear	Add 10 cc of Moly White RE No. 00. Refer to 5.2.2.5.
8. T-axis	1. Cyclo reduction gear	Add 10 cc of Moly White RE No. 00. Refer to 5.2.2.6.
	2. Bevel gears	Add 20 cc of Shell Sun Light Grease No. 1. Refer to 5.2.2.7.

<sup>24</sup> www.kawasakirobot.com



### V.1.3 Pengecekan tambahan per 10.000 jam ( 2 tahun)

Pengecekan tambahan ini dilakukan setiap 10.000 jam, seperti terlihat pada tabel

V.4. dibawah ini.

**Tabel V. 4. 10,000 Hour Maintenance Checks<sup>25</sup>**

<u>Item to Check</u>	<u>Points to Inspect</u>	<u>Required Maintenance</u>
1. Mechanical Unit	1. Component mounting screws	Check torque and integrity.
	2. Connectors	Check torque and integrity.
	3. Timing Belts	Check for proper tension and deflection. Refer to 5.2.4.
2. R-axis	1. Cyclo reduction gear	Add 1250 cc Moly White RE No. 00. Refer to 5.2.3.1.
3. Q-axis	1. Cyclo reduction gear	Add 1250 cc Moly White RE No. 00. Refer to 5.2.3.2.
4. D-axis	1. Cyclo reduction gear	Add 450 cc Moly White RE No. 00. Refer to 5.2.3.3.
6. S-axis	1. Cyclo reduction gear	Add 1000 cc Moly White RE No. 00. Refer to 5.2.3.4.
7. E-axis	1. Cyclo reduction gear	Add 100 cc Moly White RE No. 00. Refer to 5.2.3.5.
8. T-axis	1. Cyclo reduction gear	Add 100 cc Moly White RE No. 00. Refer to 5.2.3.6.
	2. Bevel gears	Add 20 cc of Shell Sun Light Grease No. 1. Refer to 5.2.3.7.

<sup>25</sup> [www.kawasakirobot.com](http://www.kawasakirobot.com)



Pelumasan merupakan proses perawatan untuk bagian mekanik robot yang mengalami gesekan dengan bagian lain terutama untuk bantalan. Pelumas yang digunakan Kawasaki robot FS30L adalah tercantum dalam tabel V.5. di bawah ini.

**Tabel V.5. FS30L lubricants<sup>26</sup>**

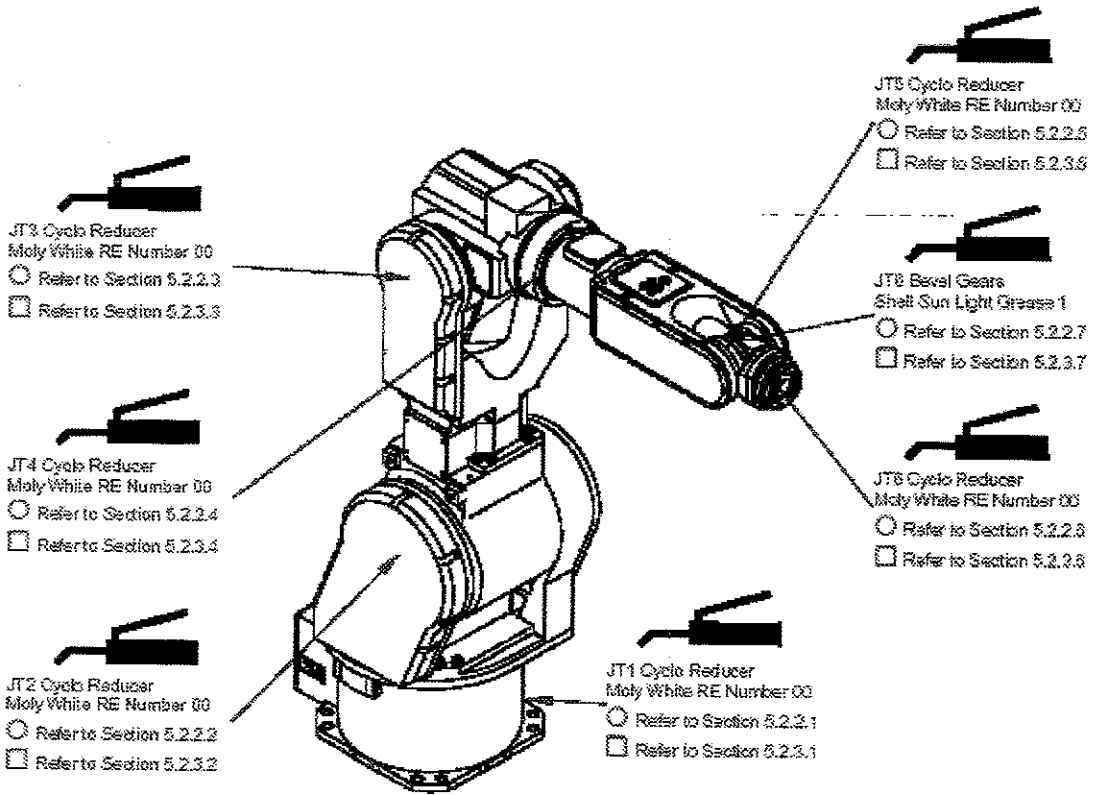
KRI Part Number	Part Name	Remarks	Quantity
60499-1012	Grease	Moly White RE No. 00	1.0 kg
60499-1013	Grease	Shell Sun Light Grease No. 1	1.0 kg

Note: 1 kg = 2.205 lb

<sup>26</sup> [www.kawasakirobot.com](http://www.kawasakirobot.com)



Gambar V.1. memperlihatkan tempat, frekuensi, dan tipe pelumas yang digunakan pada berbagai lokasi dari bagian mekanik robot.



KEY	
○	5,000 Hour Maintenance
□	10,000 Hour Maintenance
	Grease Lubricated

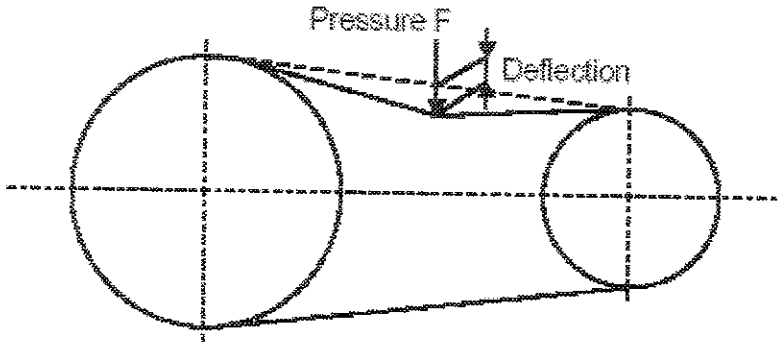
Gambar V. 1. Lubricant Application Chart<sup>27</sup>

<sup>27</sup> [www.kawasakirobot.com](http://www.kawasakirobot.com)



## V.2.2. Pengecekan Tegangan Titing Belt

UNIVERSITAS  
GADJAH MADA



FS30 - FS45 Belt Tension Specifications		
Axis	JT5	JT6
Force F	9.5 – 12.0 N 0.97 – 1.22 kg-f 2.14 – 2.70 lb-f	9.5 – 12.0 N 0.97 – 1.22 kg-f 2.14 – 2.70 lb-f
Deflection δ	4.9 mm 0.19 in	3.3 mm 0.13 in

Gambar V.2. Belt Tension Spesification<sup>28</sup>

### V. 2. 3. Pengencangan Baut

Periksa semua baut untuk kekencangan yang sesuai. Beberapa hal yang harus diperiksa adalah sebagai berikut :

- Servo motor *mounting bolts*.
- Motor bracket *mounting bolts*.
- Reduction unit *mounting bolts*.
- *Connecting bolts* antara *upper arms* 1 dan 2.
- *Tool mounting bolts*.
- *Base mounting bolts*.

<sup>28</sup> www.kawasakirobot.com



Lihat tabel V.6 untuk harga torse yang sesuai.

UNIVERSITAS  
GADJAH MADA

Maximum Bolt Tightening Torque Values					
M3	1.47 N-m	15 kg-cm		13.0 in-lb	1.08 ft-lb
M4	3.43 N-m	35 kg-cm		30.4 in-lb	2.53 ft-lb
M5	6.86 N-m	70 kg-cm		60.7 in-lb	5.06 ft-lb
M6	11.76 N-m	120 kg-cm		104.1 in-lb	8.67 ft-lb
M8	29.40 N-m	300 kg-cm	3.0 kg-m		21.7 ft-lb
M10	56.88 N-m	580 kg-cm	5.8 kg-m		42.0 ft-lb
M12	98.00 N-m	1,000 kg-cm	10.0 kg-m		72.3 ft-lb
M14	156.80 N-m	1,600 kg-cm	16.0 kg-m		115.8 ft-lb
M16	235.20 N-m	2,400 kg-cm	24.0 kg-m		173.5 ft-lb
M20	431.20 N-m	4,400 kg-cm	44.0 kg-m		318.3 ft-lb
M24	784.50 N-m	8,000 kg-cm	80.0 kg-m		578.6 ft-lb

Tabel V. 6. Tightening Torque Values<sup>29</sup>

### V.3. Overhaul setelah 20.000 jam (4 tahun) waktu operasional

Pada 20.000 jam, unit mekanik harus dibongkar, dibersihkan, diperiksa, dan mengganti bagian-bagian tertentu yang perlu.

<sup>29</sup> [www.kawasakirobot.com](http://www.kawasakirobot.com)

## KESIMPULAN DAN SARAN

### A. Kesimpulan

Setelah melakukan perhitungan dalam merancang ulang robot Kawasaki FS30L untuk aplikasi *polishing* berdasarkan data yang diperoleh dari berbagai sumber, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Penggunaan robot dewasa ini mengalami peningkatan yang sangat cepat seiring dengan meningkatnya kebutuhan konsumen akan produk yang sangat beragam dengan volume yang besar. Fleksibilitas dan keterbukaan robot untuk berhubungan dengan komputer, harga robot serta *software* yang relatif menurun sesuai tuntutan untuk mendukung sistem *fabrikasi*, telah membawa abad ke-21 ini sebagai "*the Age of the Robot*" dan industri otomotif merupakan penggeraknya.
2. Robot Kawasaki FS30L merupakan salah satu robot dari seri-F enam derajat kebebasan dengan kemampuan *payload* sedang, akurasi dan kecepatan yang tinggi untuk *material handling*. Keunggulan robot seri-F adalah kemudahan mengganti lengan robot untuk mendapatkan *work envelopes* yang dibutuhkan. FS30L sangat sesuai dan dapat dipergunakan untuk aplikasi *polishing* pada umumnya yang hanya membutuhkan beban sedang.
3. Perancangan ulang robot Kawasaki FS30L untuk aplikasi *polishing* dilakukan terlebih dahulu perhitungan Kinematika dan Dinamika menggunakan persamaan *Newton Euler*. Dari perhitungan Dinamika didapat torsi maksimum yang dialami tiap-tiap *joint* robot sebagai berikut :

$$\tau_1 = 1291 \text{ N.m}$$

$$\tau_2 = 1183 \text{ N.m}$$

$$\tau_3 = 993,572 \text{ N.m}$$

$$\tau_4 = 204,78 \text{ N.m}$$



$$\tau_5 = 248,709 \text{ N.m}$$

$$\tau_6 = 116,685 \text{ N.m}$$

4. Berdasarkan data yang diperoleh melalui internet, didapat spesifikasi dari motor listrik yang digunakan pada robot FS30L ini, yang kemudian dijadikan acuan untuk menghitung sistem transmisi berdasarkan perhitungan torsi maksimum pada tiap *joint* sebelumnya.

Joint 1,2 : AC Brushless Servomotor tipe P80B22450RCX2A

Joint 3 : AC Brushless Servomotor tipe P60B13200LCX23

Joint 4,5,6 : AC Brushless Servomotor tipe P50B08100VCXS9

5. Dengan acuan daya motor dan torsi maksimum serta pertimbangan efisiensi ruang, panjang lengan, mekanisme gerak lengan, dapat dirancang sistem transmisi robot sebagai berikut :

Joint 1 : menggunakan 3 tingkat sistem transmisi *planetary gear* yang menggunakan sebuah *sun gear*, 3 buah *pinion gear*, dan sebuah *ring gear* pada tiap tingkat sistem transmisi.

Joint 2 : menggunakan 3 tingkat sistem transmisi *planetary gear* yang menggunakan sebuah *sun gear*, 3 buah *pinion gear*, dan sebuah *ring gear* pada tiap tingkat sistem transmisi.

Joint 3 : menggunakan 3 tingkat sistem transmisi *planetary gear* yang menggunakan sebuah *sun gear*, 3 buah *pinion gear*, dan sebuah *ring gear* pada tiap tingkat sistem transmisi.

Joint 4 : menggunakan dua buah *spurs gear* dengan rasio 1 dilanjutkan dengan 3 tingkat sistem transmisi *planetary gear* yang menggunakan sebuah *sun gear*, 3 buah *pinion gear*, dan sebuah *ring gear* pada tiap tingkat sistem transmisi.

Joint 5 : menggunakan sistem transmisi *belt* dan *pulley* dilanjutkan dengan menggunakan 3 tingkat sistem transmisi *planetary gear* yang



menggunakan sebuah *sun gear*, 3 buah *pinion gear*, dan sebuah *ring gear* pada tiap tingkat sistem transmisi.

Joint 6 : menggunakan *belt* dan *Pulley* dilanjutkan dengan dua buah *bevel gear* dengan rasio putaran = 1, kemudian dilanjutkan dengan menggunakan 3 tingkat sistem transmisi *planetary gear* yang menggunakan sebuah *sun gear*, 3 buah *pinion gear*, dan sebuah *ring gear* pada tiap tingkat sistem transmisi.

6. Dari perhitungan kekuatan struktur robot diketahui robot dapat menahan reaksi berupa; tarik/tekan, geser, momen lengkung pada kondisi kritisnya yang bergantung pula pada jenis bahan yang dipilih. Perhitungan defleksi maksimum juga dilakukan untuk mengetahui penyimpangan ujung *gripper* pada kondisi kritisnya, dan didapatkan hasil penyimpangan maksimum pada ujung material sebesar 2,7 mm.
7. Perawatan robot dilakukan untuk memastikan kemampuan kerja robot dan menjaga agar umur komponen-komponen robot menjadi lebih lama serta *down time* dapat dihindari. Perawatan dilakukan tiap hari, tiap 5000 jam, 10000 jam, 15.000 jam dan *overhaul* yang dilakukan pada 20.000 jam. *Hour meter* pada *controller* dijadikan acuan waktu untuk melakukan proses perawatan.



## B. Saran

Setelah menyelesaikan perancangan ulang robot Kawasaki FS30L dengan segala keterbatasan yang ada, penyusun memberikan saran sebagai berikut :

1. Untuk melakukan perancangan ulang yang baik, dengan tujuan untuk membuat sebuah rancangan robot yang optimal, perlu dibuat sebuah metode ilmiah yang komprehensif dan harus selalu dilakukan evaluasi guna mengetahui tingkat kemajuan serta keberhasilan dari penelitian-penelitian yang ada.
2. Untuk membuat sebuah metode ilmiah dan penelitian-penelitian yang bermutu, perlu diadakan studi banding ke berbagai perusahaan yang memiliki Robot industri. Seminar mengenai Robot industri dengan mengundang pakar-pakar dan ahli dalam bidang robot harus dikembangkan guna mengembangkan wawasan dalam bidang robot.
3. Penyusun mengharapkan adanya penelitian yang mengedepankan optimasi pada sistem transmisi guna menyempurnakan perancangan ulang Robot, agar didapat sistem transmisi yang efisien dengan massa yang ringan, bentuk yang kompak.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ashby M.F., *Material Selection in Mechanical Design*, Pergamon Press, 1992.
- Ashfahl C.R., *Robots and Manufacturing Automation*, John Willey & Sons Inc.
- Beer F.P., Johnston E.R., Jr, *Mechanics of Materials*, SI Metric Edition, 3<sup>rd</sup> printing, Mc Graw Hill Ryerson Ltd, 1988.
- Budynas R.G., *Advanced Strength and Applied Stress Analysis*, McGraw Hill Kogakusha, Ltd.
- Dieter G.E., *Mechanical Metallurgy*, 3<sup>rd</sup> Edition, University of Maryland.
- Fu K.S., Gonzales R.C., Lee C.S.G., *Robotics (Control, Sensing, Vision and Intelligence)*, 1988.
- Winter H., Niemann G., *Elemen Mesin*, Jilid 1 dan 2, edisi kedua yang direvisi, Penerbit Erlangga, 1992.
- Yoran K., *Robotics for Engineer*, Mc. Graw – Hill Inc., Singapore, 1987.
- Masterson J.W., Poe E.C., Fardo S.W., *Robotics*, Reston Publishing Company, Inc. Reston, Virginia A Prentice-Hall Company, 1985.
- Mair, Gordon M., *Industrial Robotics*, Prentice Hall, 1988.
- Mechanical Engineering Gadjah Mada University, *Mekatronika Robot Industri*, 2000.
- Mechanical Engineering Gadjah Mada University, *Robot Industri*, Edisi 1,2,dan 3.
- Mehta N.K., *Machine Tool Design*, Tata Mc Graw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1983.
- Groover M.P., *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems*.
- Rosheim M.E., *Robot Wrist Actuator*, John Wiley & Sons Inc.
- Rudenko N., *Mesin Pemindah Bahan*, Penerbit Erlangga, 1992.
- Sato. G.T., Hartanto N.S., *Menggambar Mesin Menurut Standar ISO*, Cetakan keenam, P.T. Pradnya Paramita, Jakarta, 1994.



Suga K., Sularso, *Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin*, PT. Pradnya Paramita, Jakarta, 1983.

Surdia T., Saito S., *Pengetahuan Bahan Teknik*, cetakan kedua, PT. Pradnya Paramita, Jakarta, 1995.

Situs Internet :

1. [www.khi.co.jp](http://www.khi.co.jp)
2. [www.kri-us.com](http://www.kri-us.com)
3. [www.rfa-taktos.com](http://www.rfa-taktos.com)
4. [www.kawasakirobot.com](http://www.kawasakirobot.com)
5. [www2.et.byu.edu/~ered/robotics](http://www2.et.byu.edu/~ered/robotics)  
Wright J.R., Journal – *Foundry Management & Technology*, 2000.  
Weimer G., Journal – *Material Handling Management*, Vol 55, 2000.
6. [www.deantoni.it](http://www.deantoni.it)
7. [www.arobotics.com](http://www.arobotics.com)



# LAMPIRAN



UNIVERSITAS  
GADJAH MADA

Tabel 6.7. Harga modal standar (US \$ 1701-1973)  
Redesign Industrial Robot Kawasaki FS30L For Polishing Application  
Farhan Shaumi Agustianto, Ir. Gregorius Harjanto

Seri ke-1	Seri ke-2	Seri ke-3	Seri ke-1	Seri ke-2	Seri ke-3
0,1				3,5	
0,2	0,15		4	4,5	3,75
0,3	0,25		5	5,5	
0,4	0,35		6		6,5
0,5	0,45		8	7	
0,6	0,55		10	9	
0,8	0,7	0,65	12	11	
1	0,75		16	14	
1,25			20	18	
1,5			25	22	
2	1,75		32	28	
2,5	2,25		40	36	
3	2,75		50	45	
		3,25			

Tabel 3.1 Faktor koreksi

Mesin yang digerakkan		Penggerak					
		Momen puntir puncak 200%			Momen puntir puncak >200%		
		Motor arus bolak-balik (momen normal, sangkar bajing, sinkron), motor arus searah (lilitan shunt)			Motor arus bolak-balik (momen tinggi, fasa tunggal, lilitan seri), motor arus searah (lilitan kompon, lilitan seri), mesin torak, kopling tak tetap		
		Jumlah jam kerja tiap hari			Jumlah jam kerja tiap hari		
		3-5 jam	8-10 jam	16-24 jam	3-5 jam	8-10 jam	16-24 jam
Variasi beban sangat kecil	Pengaduk zat cair, kipas angin, blower (sampai 7,5 kW) pompa sentrifugal, konveyor tugas ringan	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4
Variasi beban kecil	Konveyor sabuk (pasir, batu bara), pengaduk, kipas angin (lebih dari 7,5 kW), mesin torak, peluncur, mesin perkakas, mesin percetakan.	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6
Variasi beban sedang	Konveyor (ember, sekrup), pompa torak, kompresor, gilingan palu, pengocok, roots-blower, mesin tekstil, mesin kayu	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
Variasi beban berat	Penghancur, gilingan bola atau batang, pengangkat, mesin pabrik karet (rol, kalender)	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0



Jumlah gigi		Y	Jumlah gigi	
Z			Z	Y
10		0,201	25	0,339
11		0,226	27	0,349
12		0,245	30	0,358
13		0,261	34	0,371
14		0,276	38	0,383
15		0,289	43	0,396
16		0,295	50	0,408
17		0,302	60	0,421
18		0,308	75	0,434
19		0,314	100	0,446
20		0,320	150	0,459
21		0,327	300	0,471
23		0,333	Batang gigi	0,484

Tabel 6.6 Faktor dinamis  $f_v$

Kecepatan rendah	$v = 0,5-10 \text{ m/s}$	$f_v = \frac{3}{3+v}$
Kecepatan sedang	$v = 5-20 \text{ m/s}$	$f_v = \frac{6}{6+v}$
Kecepatan	$v = 20-50 \text{ m/s}$	$f_v = \frac{5,5}{5,5+\sqrt{v}}$

Tabel 6.8 Faktor tegangan kontak pada bahan roda gigi.

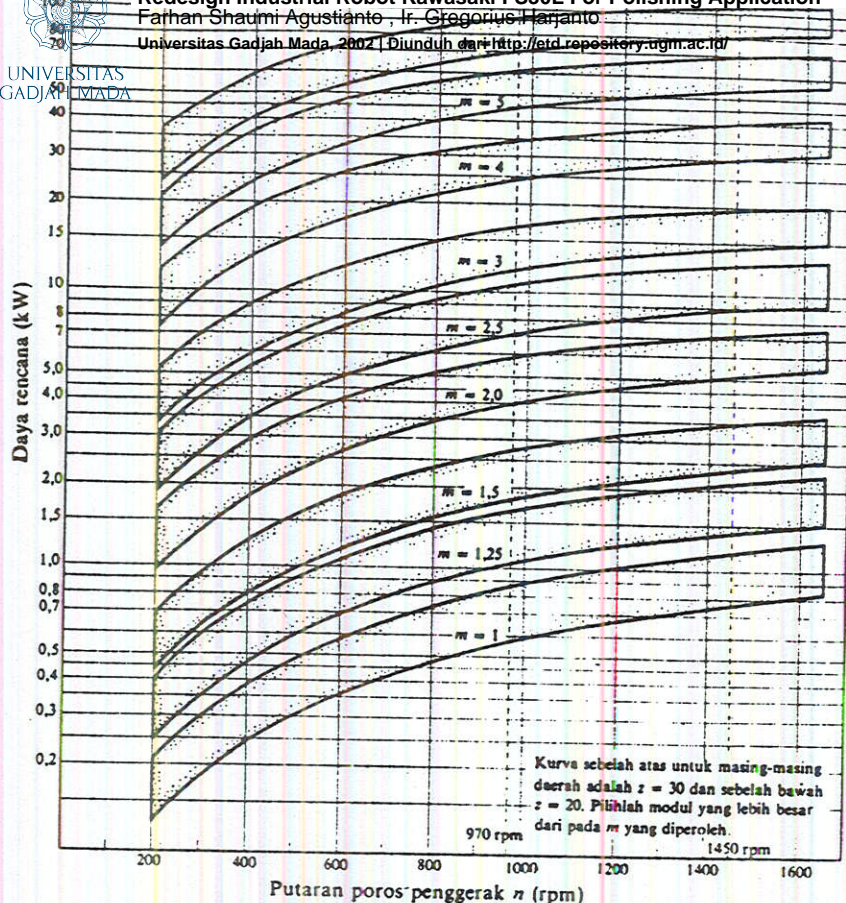
Bahan roda gigi (Kekerasan $H_B$ )		$k_H$ ( $\text{kg/mm}^2$ )	Bahan roda gigi (Kekerasan $H_B$ )		$k_H$ ( $\text{kg/mm}^2$ )
Pinyon	Roda gigi besar		Pinyon	Roda gigi besar	
Baja (150)	Baja (150)	0,027	Baja (400)	Baja (400)	0,311
" (200)	" (150)	0,039	" (500)	" (400)	0,329
" (250)	" (150)	0,053	" (600)	" (400)	0,348
" (200)	" (200)	0,053	" (500)	" (500)	0,389
" (250)	" (200)	0,069	" (600)	" (600)	0,569
" (300)	" (200)	0,086	" (150)	Besi cor	0,039
" (250)	" (250)	0,086	" (200)	"	0,079
" (300)	" (250)	0,107	" (250)	"	0,130
" (350)	" (250)	0,130	" (300)	"	0,139
" (300)	" (300)	0,130	" (150)	Perunggu fosfor	0,041
" (350)	" (300)	0,154	" (200)	"	0,082
" (400)	" (300)	0,168	" (250)	"	0,135
" (350)	" (350)	0,182	Besi cor	Besi cor	0,188
" (400)	" (350)	0,210	Besi cor nikel	Besi cor nikel	0,186
" (500)	" (350)	0,226	Besi cor nikel	Perunggu fosfor	0,155

Sudut tekanan  $\alpha = 20^\circ$



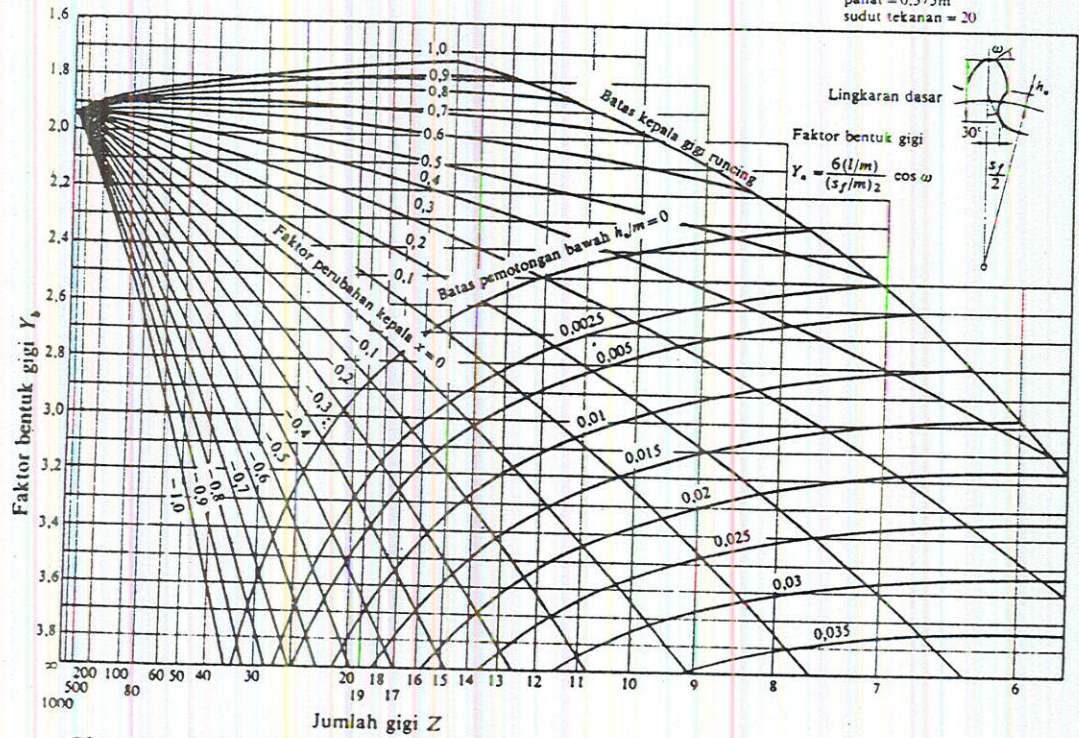
Tabel 6.7 Tegangan lentur yang diizinkan  $\sigma_a$  pada bahan roda gigi.

Kelompok bahan	Lambang bahan	Kekuatan tarik $\sigma_B$ (kg/mm <sup>2</sup> )	Kekerasan (Brinell) $H_B$	Tegangan lentur yang diizinkan $\sigma_a$ (kg/mm <sup>2</sup> )
Besi cor	FC 15	15	140-160	7
	FC 20	20	160-180	9
	FC 25	25	180-240	11
	FC 30	30	190-240	13
Baja cor	SC 42	42	140	12
	SC 46	46	160	19
	SC 49	49	190	20
Baja karbon untuk konstruksi mesin	S 25 C	45	123-183	21
	S 35 C	52	149-207	26
	S 45 C	58	167-229	30
Baja paduan dengan pengerasan kulit	S 15 CK	50	400 (dicelup dingin dalam minyak)	30
	SNC 21 SNC 22	80 100	600 (dicelup dingin dalam air)	35-40 40-55
Baja khrom nikel	SNC 1	75	212-255	35-40
	SNC 2	85	248-302	40-60
	SNC 3	95	269-321	40-60
Perunggu Logam delta Perunggu fosfor (coran)		18	85	5
		35-60	-	10-20
		19-30	80-100	5-7
Perunggu nikel (coran)		64-90	180-260	20-30
Damar phenol, dll.				3-5



Gbr. 6.24 Diagram pemilihan modul roda gigi lurus (lenturan).  
 ( $z_u = 20$ ,  $h = 10$  m)

Pahat batang gigi: kepala =  $1,250m$   
 jari-jari fillet ujung  
 pahat =  $0,375m$   
 sudut tekanan =  $20$



Gbr. 6.26 Faktor bentuk gigi untuk roda gigi lurus.



Tabel 1.1 Baja karbon untuk konstruksi mesin dan baja batang yang difinis dingin untuk poros.

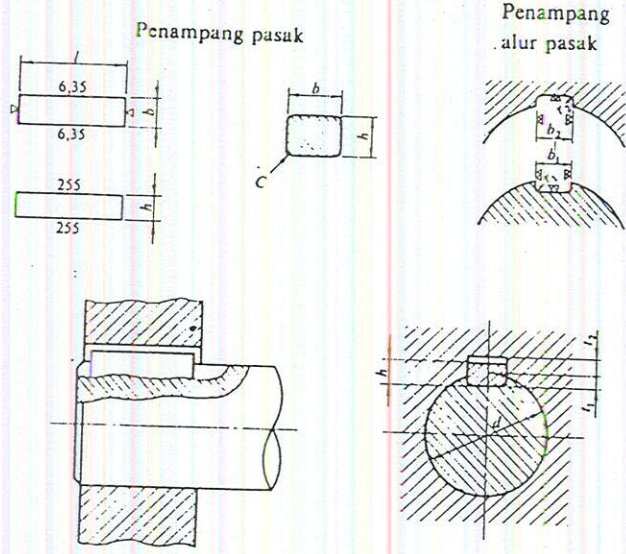
Standar dan macam	Lambang	Perlakuan panas	Kekuatan tarik (kg/mm <sup>2</sup> )	Keterangan
Baja karbon konstruksi mesin (JIS G 4501)	S30C	Penormalan	48	
	S35C	"	52	
	S40C	"	55	
	S45C	"	58	
	S50C	"	62	
	S55C	"	66	
Batang baja yang difinis dingin	S35C-D	-	53	ditarik dingin, digerinda, dibubut, atau gabungan antara hal-hal tersebut
	S45C-D	-	60	
	S55C-D	-	72	

Tabel 1.2 Baja paduan untuk poros.

Standar dan macam	Lambang	Perlakuan panas	Kekuatan tarik (kg/mm <sup>2</sup> )
Baja khrom nikel (JIS G 4102)	SNC 2	-	85
	SNC 3	-	95
	SNC21	Pengerasan kulit	80
	SNC22	"	100
Baja khrom nikel molibden (JIS G 4103)	SNM 1	-	85
	SNM 2	-	95
	SNM 7	-	100
	SNM 8	-	105
	SNM22	Pengerasan kulit	90
	SNM23	"	100
Baja khrom (JIS G 4104)	SCr 3	-	90
	SCr 4	-	95
	SCr 5	-	100
	SCr21	Pengerasan kulit	80
	SCr22	"	85
Baja khrom molibden (JIS G 4105)	SCM 2	-	85
	SCM 3	-	95
	SCM 4	-	100
	SCM 5	-	105
	SCM21	Pengerasan kulit	85
	SCM22	"	95
	SCM23	"	100



Tabel 1.8 Ukuran pasak dan alur pasak.



Ukuran-ukuran utama

(Satuan: mm)

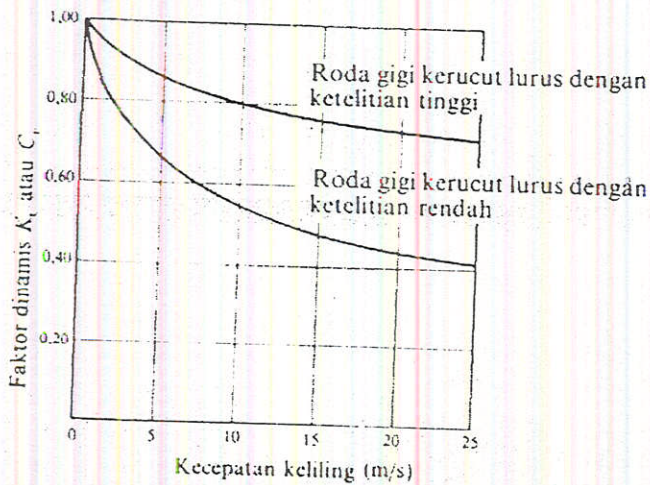
Ukuran nominal pasak $b \times h$	Ukuran standar $b, b_1,$ dan $b_2$	Ukuran standar $h$		C	$l^*$	Ukuran Standar $t_1$	Ukuran standar $t_2$			$r_1$ dan $r_2$	Referensi
		Pasak prismatis	Pasak tirus				Pasak prismatis	Pasak luncur	Pasak tirus		Diameter poros yang dapat dipakai $d^{**}$
2 x 2	2	2		0,16-0,25	6-20	1,2	1,0		0,5	0,08-0,16	Lebih dari 6-8
3 x 3	3	3			6-36	1,8	1,4		0,9		8-10
4 x 4	4	4			8-45	2,5	1,8		1,2		10-12
5 x 5	5	5			10-56	3,0	2,3		1,7		12-17
6 x 6	6	6			14-70	3,5	2,8		2,2		17-22
(7 x 7)	7	7	7,2	0,25-0,40	16-80	4,0	3,0	3,5	3,0	0,16-0,25	20-25
8 x 7	8	7			18-90	4,0	3,3		2,4		22-30
10 x 8	10	8			22-110	5,0	3,3		2,4		30-38
12 x 8	12	8			28-140	5,0	(3,3)		(2,4)		38-44
14 x 9	14	9			36-160	5,5	3,8		2,9		44-50
(15 x 10)	15	10	10,2	0,40-0,60	40-180	5,0	5,0	5,5	5,0	0,25-0,40	50-55
16 x 10	16	10			45-180	6,0	4,3		3,4		50-58
18 x 11	18	11			50-200	7,0	4,4		3,4		58-65
20 x 12	20	12			56-220	7,5	4,9		3,9		65-75
22 x 14	22	14			63-250	9,0	5,4		4,4		75-85
(24 x 16)	24	16	16,2	0,60-0,80	70-280	8,0	8,0	8,5	8,0	0,40-0,60	80-90
25 x 14	25	14			70-280	9,0	5,4		4,4		85-95
28 x 16	28	16			80-320	10,0	6,4		5,4		95-110
32 x 18	32	18			90-360	11,0	7,4		6,4		110-130

\* / harus dipilih dari angka-angka berikut sesuai dengan daerah yang bersangkutan dalam tabel.  
6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 36, 40, 45, 50, 56, 63, 70, 80, 90, 100, 110, 125, 140, 160, 180, 200, 220, 250, 280, 320, 360, 400.



Tabel 6.16 Tegangan lentur yang diizinkan dan tegangan kontak yang diizinkan (roda gigi kerucut).

Bahan	Perlakuan panas	Kekerasan permukaan minimum		Tegangan lentur yang diizinkan (kg/mm <sup>2</sup> )	Tegangan kontak yang diizinkan (kg/mm <sup>2</sup> )
		H <sub>B</sub>	H <sub>K</sub> C		
Baja	Celup dingin sementasi	625	60	22,7	189
	Celup dingin sementasi	575	55	22,7	151
	Celup dingin frekwensi tinggi	500	50	10,2	144
	Celup dingin dan temper	440		18,9	144
	Celup dingin dan temper	300		14,4	102
	Celup dingin dan temper	180		10,2	92
Besi cor	Pegecoran	200		5,3	49
	Pengecoran	175		3,1	38
	Pengecoran	—		2,0	23



Gbr. 6.36 Faktor dinamis roda gigi kerucut.

Tabel 6.17 Faktor beban lebih K<sub>0</sub>, C<sub>0</sub>.

Sisi penggerak	Sisi yang digerakkan		
	Tanpa tumbukan	Tumbukan sedang	Tumbukan berat
Tanpa tumbukan	1,00	1,25	1,75
Tumbukan sedang	1,25	1,50	2,00
Tumbukan berat	1,50	1,75	2,25

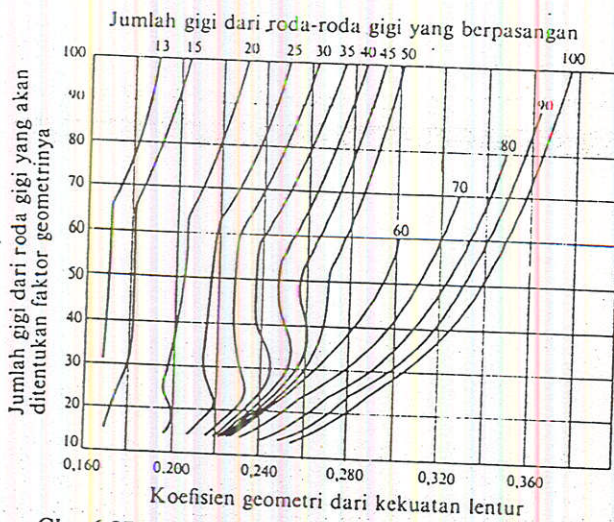


Tabel 6.18 Faktor pembagian beban  $K_m$ ,  $C_m$ .

	Pinyon dan roda gigi kedua-duanya memakai bantalan dua ujung	Salah satu dari pinyon atau roda gigi memakai bantalan satu ujung	Pinyon dan roda gigi kedua-duanya memakai bantalan satu ujung
Roda gigi reduksi umum	1,00-1,10	1,10-1,25	1,25-1,40
Otomobil	1,00-1,10	1,10-1,25	—
Kapal terbang	1,00-1,25	1,10-1,40	1,25-1,50

Tabel 6.19 Koefisien elastis  $C_p$  ( $\sqrt{\text{kg/mm}}$ ).

Bahan pinyon \ Bahan roda gigi	Baja	Besi cor
	$E = 2,27 \times 10^{-4} \text{ (kg/mm}^2\text{)}$	$E = 1,44 \times 10^{-4} \text{ (kg/mm}^2\text{)}$
Baja	74,2	64,9
Besi cor	64,9	59,6



Gbr. 6.37 Roda gigi kerucut lurus dengan sudut tekanan  $20^\circ$  dan sudut poros  $90^\circ$ .



Tabel 6.20 Tegangan lentur yang diizinkan  $\sigma_{ba}$  (kg/mm<sup>2</sup>).

Bahan roda gigi cacing	Pembebanan satu arah	Pembebanan dua arah
Besi cor	8,5	5,5
Perunggu untuk roda gigi	17	11
Perunggu antimoni	10,5	7
Damar sintetis	3	2

Tabel 6.21 Faktor bentuk roda gigi cacing Y.

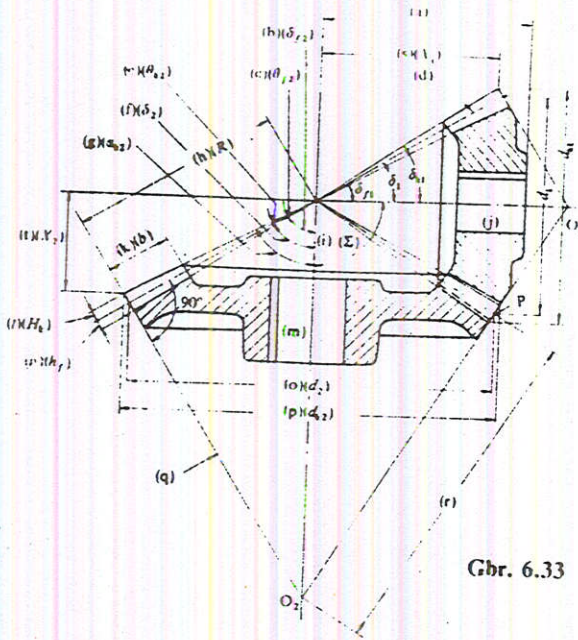
Sudut tekanan normal	Faktor bentuk
14,5°	0,100
20°	0,125
25°	0,150
30°	0,175

Tabel 6.22 Faktor tahanan aus  $K_c$ .

Cacing	Roda gigi cacing	$K_c$ (kg/mm <sup>2</sup> )
Baja (kekerasan $H_B$ 250)	Perunggu fosfor	0,042
Baja celup dingin	Besi cor	0,035
"	Perunggu fosfor	0,056
"	Perunggu fosfor yang dicil	0,085
"	Perunggu antimoni	0,085
"	Damar sintetis	0,087
Besi cor	Perunggu fosfor	0,106

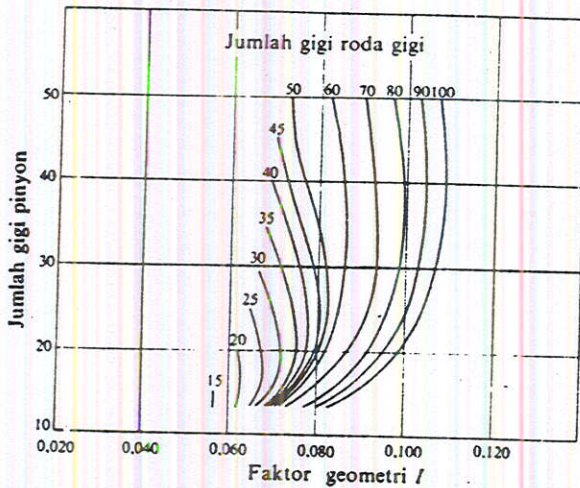
Tabel 6.23 Faktor sudut kisar  $K_\gamma$ .

Sudut kisar	$K_\gamma$
$\gamma < 10^\circ$	1
$\gamma = 10^\circ \text{ - } 25^\circ$	1,25
$\gamma > 25^\circ$	1,50



- (a) Jarak sisi belakang
- (b) Sudut kerucut kaki
- (c) Sudut kaki
- (d) Kerucut jarak bagi
- (e) Sudut kepala
- (f) Sudut kerucut jarak bagi
- (g) Sudut kerucut kepala
- (h) Sisi kerucut
- (i) Sudut poros
- (j) Lubang poros
- (k) Lebar muka
- (l) Kepala
- (m) Lubang poros
- (n) Kaki
- (o) Diameter lingkaran jarak bagi
- (p) Diameter lingkaran kepala
- (q) Kerucut belakang
- (r) Jarak kerucut belakang
- (s)(t) Jarak dari puncak kerucut sampai puncak luar gigi

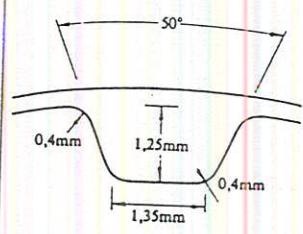
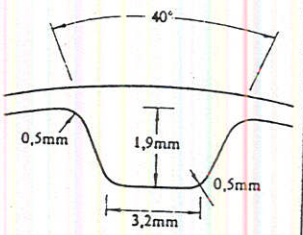
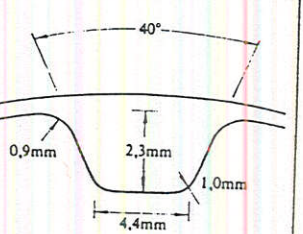
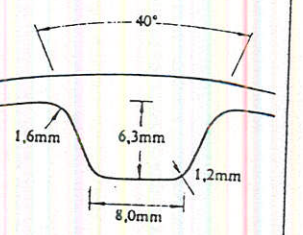
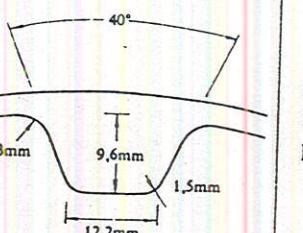
Gbr. 6.33 Nama bagian-bagian roda gigi kerucut.



Gbr. 6.38 Roda gigi kerucut lurus dengan sudut tekanan 20° dan sudut poros 90°.



Tabel 5.10 (a) Tipe, ukuran dan pemakaian sabuk gilir.

Penampang	Jarak begi (mm)	Ukuran	Pemakaian-pemakaian penting
XL	5,08		Mesin kantor Mesin jahit Instrumen Komputer
L	9,525		Mesin tekstil Mesin kompak tugas ringan
H	12,70		Mesin perkakas Pompa Mesin tekstil
XH	22,225		Kipas angin Mesin kertas Mesin tekstil Alat-alat besar
XXH	31,75		Mesin tugas berat Mesin dengan momen puntir besar



Tabel 5.10(b) Nomor nominal, jumlah gigi, dan panjang, untuk sabuk gilir standar.

[Penambahan 1]

**Redesign Industrial Robot Kawasaki FS30L For Polishing Application**  
 Farhan Shaumi Agustianto, Ir. Gregorius Harjanto  
 Universitas Gadjah Mada, 2002 | Didownload dari <http://etd.repository.uogmad.ac.id>

Lebar sabuk standar	Nomor nominal	Lebar sabuk (inch)	Lebar sabuk (mm)	Lebar sabuk standar	Nomor nominal	Lebar sabuk (inch)	Lebar sabuk (mm)	
	050	0,50	12,7			075	0,75	19,0
	075	0,75	19,0		100	1,00	25,4	
	100	1,00	25,4		150	1,50	38,1	
	150	1,50	38,1		200	2,00	50,8	
					300	3,00	76,2	

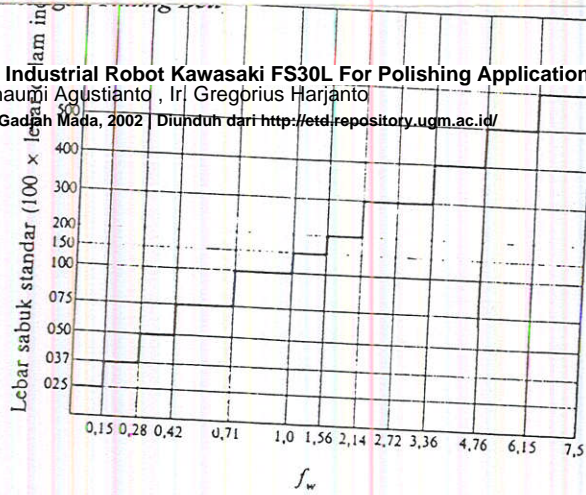
  

Variasi beban besar	Nomor nominal	Jumlah gigi	Panjang jarak bagi sabuk (mm)	Panjang sabuk standar	Nomor nominal	Jumlah gigi	Panjang jarak bagi sabuk (mm)
	124 L	33	314,32			240 H	48
150 L	40	381,00		270 H	54	685,80	
165 L	44	408,10		300 H	60	762,00	
173 L	46	438,15		310 H	62	787,40	
187 L	50	476,25		315 H	63	800,10	
210 L	56	533,40		320 H	64	812,80	
225 L	60	571,50		330 H	66	838,20	
240 L	64	609,60		350 H	70	889,00	
255 L	68	647,70		360 H	72	914,40	
270 L	72	685,80		375 H	75	952,50	
285 L	76	723,90		390 H	78	990,60	
300 L	80	762,00		410 H	82	1041,40	
322 L	86	819,15		420 H	84	1066,80	
337 L	90	857,25		430 H	86	1092,20	
345 L	92	876,30		450 H	90	1143,00	
367 L	98	933,45		465 H	93	1181,10	
375 L	100	952,50		480 H	96	1219,20	
390 L	104	990,00		490 H	98	1244,60	
420 L	112	1066,80		510 H	102	1295,40	
427 L	114	1084,58		540 H	108	1371,60	
450 L	120	1143,00		560 H	112	1422,40	
480 L	128	1219,20		570 H	114	1447,80	
510 L	136	1295,40		600 H	120	1524,00	
540 L	144	1371,60		630 H	126	1600,20	
600 L	160	1524,10		650 H	130	1651,00	
630 L	168	1600,20		660 H	132	1676,40	
				680 H	136	1727,20	

Tabel 5.11 Faktor koreksi yang harus ditambahkan untuk meningkatkan putaran dan persyaratan kerja luar biasa.

Perbandingan peningkatan Putaran	$f_c$
1-1,25	0
1,25-1,75	0,1
1,75-2,5	0,2
2,5-3,5	0,3
3,5--	0,4

Persyaratan kerja	$f_c$
Lebih dari 10 jam kerja/hari	0,1
Lebih dari 20 jam kerja/hari	0,2
Untuk semua penganggur	0,2
Kerja terputus-putus atau musiman (kurang dari 500 jam tiap tahun)	-0,2



Gbr. 5.15 Lebar sabuk girir standar.

Tabel 5.12 Kapasitas daya yang ditransmisikan setiap inch (25,4 mm) lebar sabuk girir,  $P_0$  (kW).  
[Penampang L]

Putaran puli kecil (rpm)	Jumlah gigi					
	20	22	24	26	28	30
	Diameter puli (mm)					
	60,64	66,70	72,77	78,83	84,89	90,96
200	0,15	0,17	0,18	0,20	0,21	0,23
400	0,31	0,34	0,37	0,40	0,43	0,46
600	0,46	0,51	0,55	0,60	0,64	0,69
800	0,61	0,68	0,73	0,80	0,85	0,91
1000	0,76	0,84	0,91	0,99	1,06	1,14
1200	0,91	1,00	1,10	1,18	1,27	1,36
1400	1,06	1,17	1,27	1,38	1,48	1,58
1600	1,21	1,31	1,45	1,56	1,68	1,79

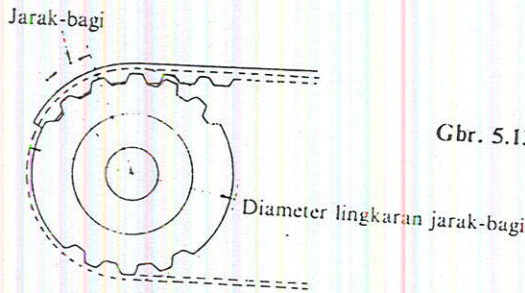
[Penampang H]

Putaran puli kecil (rpm)	Jumlah gigi					
	20	22	24	26	28	30
	Diameter puli (mm)					
	80,85	88,94	97,02	105,11	113,19	121,28
200	0,52	0,57	0,62	0,67	0,73	0,78
400	1,04	1,14	1,25	1,35	1,46	1,56
600	1,56	1,71	1,86	2,02	2,17	2,33
800	2,07	2,27	2,48	2,68	2,88	3,10
1000	2,58	2,84	3,10	3,35	3,60	3,85
1200	3,10	3,40	3,70	4,00	4,32	4,61
1400	3,60	3,95	4,30	4,66	5,02	5,36
1600	4,11	4,51	4,90	5,31	5,70	6,10

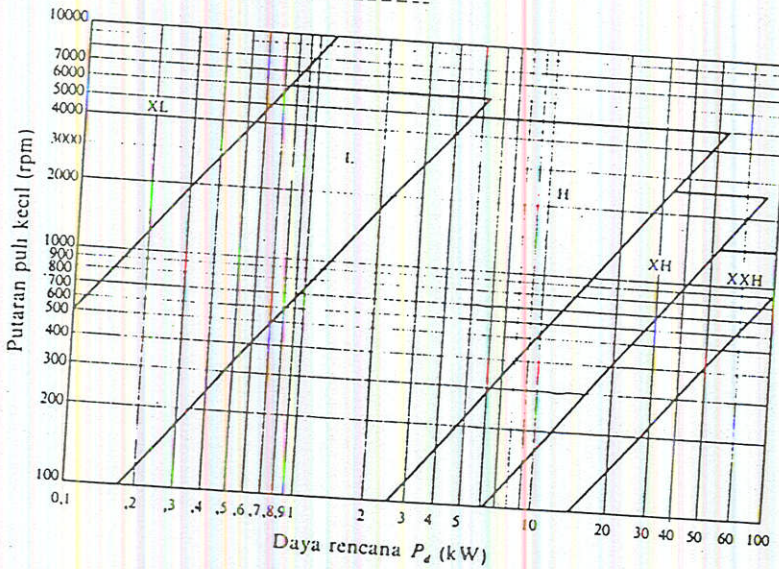
Putaran puli kecil (rpm)	Penampang sabuk				
	XL	L	H	XH	XXH
3500	12	16	20		
1750	10	14	18	26	26
1160	10	12	16	24	24
870				22	22

Tabel 5.14 Faktor koreksi untuk berbagai J.G.T. (Jumlah Gigi yang Terkait).

J.G.T.	$f_t$
6-	1,0
5-6	0,8
4-5	0,6
3-4	0,4
2-3	0,2



Gbr. 5.13 Sabuk gilir.



Gbr. 5.14 Diagram pemilihan sabuk gilir.



Tabel 5.15  $\Delta C_i$  dan  $\Delta C_r$  untuk sabuk gilir.

(Satuan: mm)

Nomor nominal	XL		L		H		XH		XXH	
	$\Delta C_i$	$\Delta C_r$	$\Delta C_i$	$\Delta C_r$	$\Delta C_i$	$\Delta C_r$	$\Delta C_i$	$\Delta C_r$	$\Delta C_i$	$\Delta C_r$
60-300	3	3	5	5	6	6				
301-1000	4	3	6	5	7	6	20	10	30	10

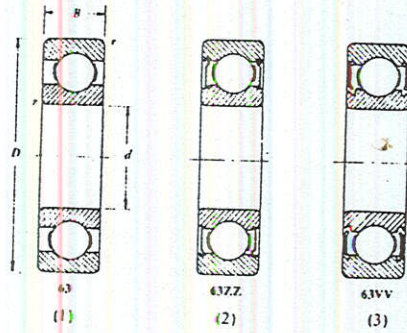


**Redesign Industrial Robot Kawasaki FS30L For Polishing Application**

Farhan Shaumi Agustianto, Ir. Gregorius Harjanto

Universitas Gadjah Mada, 2002 | Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

$C_0/F_a$		15	20	25		
$F_a/VF_r \leq e$	X	1				
	Y	0				
$F_a/VF_r > e$	X	0,56				
	Y	1,26	1,49	1,64	1,76	1,85
$e$		0,35	0,29	0,27	0,25	0,24



Nomor bantalan			Ukuran luar (mm)				Kapasitas nominal dinamis spesifik C (kg)	Kapasitas nominal statis spesifik C <sub>0</sub> (kg)
Jenis terbuka	Dua sekat	Dua sekat tanpa kontak	d	D	B	r		
6000			10	26	8	0,5	360	196
6001	6001ZZ	6001VV	12	28	8	0,5	400	229
6002	02ZZ	02VV	15	32	9	0,5	440	263
6003	6003ZZ	6003VV	17	35	10	0,5	470	296
6004	04ZZ	04VV	20	42	12	1	735	465
6005	05ZZ	05VV	25	47	12	1	790	530
6006	6006ZZ	6006VV	30	55	13	1,5	1030	740
6007	07ZZ	07VV	35	62	14	1,5	1250	915
6008	08ZZ	08VV	40	68	15	1,5	1310	1010
6009	6009ZZ	6009VV	45	75	16	1,5	1640	1320
6010	10ZZ	10VV	50	80	16	1,5	1710	1430
6200	6200ZZ	6200VV	10	30	9	1	400	236
6201	01ZZ	01VV	12	32	10	1	535	305
6202	02ZZ	02VV	15	35	11	1	600	360
6203	6203ZZ	6203VV	17	40	12	1	750	460
6204	04ZZ	04VV	20	47	14	1,5	1000	635
6205	05ZZ	05VV	25	52	15	1,5	1100	730
6206	6206ZZ	6206VV	30	62	16	1,5	1530	1050
6207	07ZZ	07VV	35	72	17	2	2010	1430
6208	08ZZ	08VV	40	80	18	2	2380	1650
6209	6209ZZ	6209VV	45	85	19	2	2570	1880
6210	10ZZ	10VV	50	90	20	2	2750	2100
6300	6300ZZ	6300VV	10	35	11	1	635	365
6301	01ZZ	01VV	12	37	12	1,5	760	450
6302	02ZZ	02VV	15	42	13	1,5	895	545
6303	6303ZZ	6303VV	17	47	14	1,5	1070	660
6304	04ZZ	04VV	20	52	15	2	1250	785
6305	05ZZ	05VV	25	62	17	2	1610	1080
6306	6306ZZ	6306VV	30	72	19	2	2090	1440
6307	07ZZ	07VV	35	80	20	2,5	2620	1840
6308	08ZZ	08VV	40	90	23	2,5	3200	2300
6309	6309ZZ	6309VV	45	100	25	2,5	4150	3100
6310	10ZZ	10VV	50	110	27	3	4850	3650



Tabel 4.1 Sifat-sifat bahan bantalan luncur.

Bahan bantalan	Kekerasan $H_B$	Tekanan maksimum yang diperbolehkan ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )	Temperatur maks. yang diperbolehkan ( $^{\circ}\text{C}$ )
Besi cor	160-180	0,3-0,6	150
Perunggu	50-100	0,7-2,0	200
Kuningan	80-150	0,7-2,0	200
Perunggu fosfor	100-200	1,5-6,0	250
Logam putih berdasar Sn	20-30	0,6-1,0	150
Logam putih berdasar Pb	15-20	0,6-0,8	150
Paduan Cadmium	30-40	1,0-1,4	250
Kelmet	20-30	1,0-1,8	170
Paduan Aluminium	45-50	2,8	100-150
Perunggu timah hitam	40-80	2,0-3,2	220-250



Tabel 2.25 Sifat-sifat mekanik paduan Al-Cu-Mg.

Paduan	Kecadaan	Kekuatan tarik (kgf/mm <sup>2</sup> )	Kekuatan mulur (kgf/mm <sup>2</sup> )	Perpanjangan (%)	Kekuatan geser (kgf/mm <sup>2</sup> )	Kekerasan Brinell	Batas leleh (kgf/mm <sup>2</sup> )
17S (2017)	O	18,3	7,0	—	12,7	45	7,7
	T4	43,6	28,1	—	26,7	105	12,7
A17S (A2017)	T4	30,2	16,9	27	19,7	70	9,5
R317	Setelah dianil	42,9	24,6	22	—	100	—
24S (2024)	O	18,9	7,7	22	12,7	42	—
	T4	47,8	32,3	22	28,8	120	—
	T36	51,3	40,1	—	29,5	130	—
14S (2014)	O	19,0	9,8	18	12,7	45	—
	T4	39,4	28,0	25	23,9	100	—
	T4	49,0	42,0	13	29,5	135	—

Sumber : Surdia Tata, Saito Shinroku, *Pengetahuan Bahan Teknik*, PT. Pradnya Paramita Jakarta, 1992, hal.137