



TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISIS *INVERSE KINEMATICS* TERSEGMENTASI
BERBASIS GEOMETRIS PADA ROBOT HUMANOID SAAT
BERJALAN**

Praditya Handi Setiawan
NRP 2213106026

Dosen Pembimbing
Ir. Rusdhianto Effendie A K., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TE 141599

**INVERSE KINEMATICS SEGMENTED ANALYSIS
WALKING GAIT SYSTEM FOR HUMANOID ROBOT
BASED ON GEOMETRICAL ANALYSIS**

Praditya Handi Setiawan
NRP 2213106026

Adviser
Ir. Rusdhianto Effendie A K., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

**ANALISIS INVERSE KINEMATICS TERSEGMENTASI
BERBASIS GEOMETRIS PADA ROBOT HUMANOID SAAT
BERJALAN**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing



Ir. Rusdhianto Effendie A K., MT.

NIP : 1957 04 24 1985 02 1001



ANALISIS *INVERSE KINEMATICS* TERSEGMENTASI BERBASIS GEOMETRIS PADA ROBOT HUMANOID SAAT BERJALAN

Nama : Praditya Handi Setiawan
Pembimbing : Ir. Rusdhianto Effendie A K., MT.

ABSTRAK

Robot *humanoid* merupakan robot yang memiliki konstruksi tubuh seperti manusia. Robot *humanoid* jenis Bioloid ini memiliki 18 *DoF* (derajat kebebasan). Untuk merancang pola berjalan (*walking gait*) dari robot diperlukan analisis *inverse kinematics* berfungsi untuk mendapatkan sudut *joint* dari posisi sesuai dengan perancangan. Analisis *inverse kinematics* dilakukan secara tersegmentasi dengan melakukan pembagian anggota tubuh robot menjadi 4 bagian yaitu : tangan kanan, tangan kiri, kaki kanan, kaki kiri dan menggunakan pendekatan geometris. Pada tangan robot Bioloid, analisis *inverse kinematics* fokus pada *joint* 1 dan 2. Pada kaki, analisis *inverse kinematics* fokus pada *joint* 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 dan 18. Analisis *inverse kinematics* pada kaki ditinjau dari sumbu x, z dan sumbu y, z. Hasil pengujian posisi pada tangan kanan terhadap sumbu x, z memiliki rata-rata *error* pada P_x sebesar 0,12 mm dan P_z 0,02 mm. Rata-rata *error* posisi tangan kiri pada P_x 0,06 mm dan P_z 0,06 mm. Pada pengujian kaki, rata-rata *error* posisi kaki kanan saat ditinjau dari sumbu x, z untuk P_x 3,1 mm dan P_z 0,22 mm. Pada kaki kiri, rata-rata *error* posisi pada P_x 3,60 mm dan P_z 0,27 mm. Saat ditinjau dari sumbu y, z rata-rata *error* posisi kaki kanan pada P_y 0,12 mm dan P_z 0,25 mm. Sedangkan pada kaki kiri, nilai rata-rata *error* posisi pada P_y 1,43 mm dan P_z 0,61 mm. Pada implementasi *walking gait* robot Bioloid, terdapat rata-rata sudut kemiringan 22,25°.

Kata Kunci : Robot Bioloid, *walking gait*, *inverse kinematics*, geometris

INVERSE KINEMATICS SEGMENTED ANALYSIS WALKING GAIT SYSTEM FOR HUMANOID ROBOT BASED ON GEOMETRICAL ANALYSIS

Name : Pradiya Handi Setiawan
Adviser : Ir. Rusdhianto Effendie A K., MT.

ABSTRACT

Humanoid robot is a robot that has a body like a human construction. Bioloid humanoid robot types have 18 DoF (degrees of freedom). To developed walking gait of the robot it would did inverse kinematics analysis first. Inverse kinematics analysis get the value of the angle of the position that has been planned. Inverse kinematics analysis will divided by the segmented robotic into 4 parts: right hand, left hand, right foot, left foot with geometrical approach. On the hand, inverse kinematics analysis will focus on joint kinematics 1 and 2. At the foot will focus on joint 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 and 18. For inverse kinematics at the leg will be reviewed from two sides of the terms of the x, z axis and y, z axis. Results from the planning kinematics at x, z axis has an average error in right hand 0,12 mm at P_x and 0,02 mm at P_z . Average error of position on the left hand obtained by P_x and P_z 0,06 mm. For the right leg the average error in the x, z axis is 3,1 mm at P_x , and 0,22 mm at P_z . While on the left leg, the average the error position viewed from the x, z axis is 3,60 mm P_x and P_z is 0,27 mm. When viewed from the y, z -axis, average error position P_y for the right leg is 0,12mm and P_z 0,25mm. Average error value of position left leg is 1,43 mm at P_y and 0,61mm at P_z . Then, average value on walking gait implementation for the slope is 22,25°.

Keywords : Bioloid robot, walking gait, inverse kinematics, geometry

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “*Analisis Inverse Kinematics Tersegmentasi Berbasis Geometris Pada Robot Humanoid Saat Berjalan*”. Tugas Akhir ini disusun guna memenuhi sebagian persyaratan menyelesaikan pendidikan Strata-1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pelaksanaan dan penyelesaian laporan Tugas Akhir tidak terlepas dari izin dan rahmat Allah SWT, sehingga penulis mampu memahami materi yang diberikan. Disamping itu penulis juga mendapat bimbingan, motivasi, masukan dan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Segenap keluarga, terutama bapak dan ibu tercinta serta kakak dan adik penulis yang selalu memberi semangat dan doa sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dan studi sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
2. Bapak Ir. Rusdhianto Effendie A K., MT. sebagai dosen pembimbing penulis yang telah memberikan pengetahuan, arahan dan bantuan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Yunita Dian Absary nomu nomu nomu chua.
4. Agils, farid, yurid partner terbaik, asisten B 105 serta seluruh teman-teman TSP terima kasih atas bantuannya dalam bentuk apapun

Penulis menyadari dalam penyusunan laporan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan dan jauh dari sempurna. Untuk itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang sifatnya konstruktif dalam penyempurnaan laporan ini. Akhir kata penulis berharap laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	v
HALAMAN PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Metode Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi	5
BAB II TEORI DASAR	7
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Robot <i>Humanoid</i>	7
2.3 Transformasi Homogen	10
2.4 Kinematika Robot	12
2.4.1 <i>Forward Kinematics</i>	12
2.4.2 <i>Inverse Kinematics</i>	15
2.4.2.1 <i>Inverse Kinematics</i> Berbasis Geometris	16
2.5 Perencanaan Gaya Berjalan	18
2.6 Interpolasi	20
2.6.1 Interpolasi Linier	20
2.6.2 Interpolasi Kuadratik	21
2.6.3 Interpolasi Lagrange	21
2.6.4 Interpolasi Polinomial	21
BAB III PERANCANGAN SISTEM	23
3.1 Spesifikasi Sistem	23
3.2 Identifikasi Kebutuhan	23

3.3 Perancangan dan Implementasi Sistem	23
3.3.1 Konfigurasi Robot Bioloid.....	24
3.3.2 Perancangan Parameter DH robot Bioloid.....	24
3.3.2.1 Parameter <i>Denavit Hatenberg</i> Tangan Robot Bioloid	25
3.3.2.2 Parameter <i>Denavit Hatenberg</i> kaki Robot Bioloid	32
3.3.3 Perencanaan Pola Berjalan Robot Bioloid	43
3.3.4 <i>Inverse Kinematics</i>	57
3.3.5 Perancangan Simulasi	59
3.3.6 Perancangan implementasi.....	60
BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS	63
4.1 Pengujian Kinematika Robot.....	63
4.1.1 Pengujian Kinematika Tangan Robot Bioloid	63
4.1.2 Pengujian Kinematika Kaki Robot Bioloid.....	71
4.2 Pengujian <i>Walking Gait</i> Robot.....	88
4.2.1 Pengujian <i>Walking Gait</i> Kaki Robot Bioloid.....	88
4.2.2 Pengujian <i>Walking Gait</i> Tangan Robot Bioloid.....	96
BAB V PENUTUP	101
5.1 Kesimpulan.....	101
5.2 Saran.....	102
DAFTAR PUSTAKA.....	103
LAMPIRAN	105
RIWAYAT PENULIS	111

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Bagian robot <i>humanoid</i> jenis Bioloid	8
Gambar 2.2	Sumbu <i>roll, pitch, yaw</i>	8
Gambar 2.3	Konfigurasi robot Bioloid	9
Gambar 2.4	Representasi <i>forward kinematics</i> dan <i>inverse kinematics</i>	12
Gambar 2.5	Konfigurasi posisi lengan robot manipulator pada 2 titik	15
Gambar 2.6	Manipulator Planar dengan 1 <i>link</i>	16
Gambar 2.7	Manipulator Planar dengan 2 <i>link</i>	17
Gambar 2.8	Perhitungan untuk mencari nilai Θ_1	18
Gambar 2.9	Gaya berjalan Manusia	19
Gambar 2.10	<i>Support phase</i> pada robot <i>humanoid</i>	19
Gambar 2.11	Interpolasi Linier	20
Gambar 2.12	Grafik interpolasi kuadratik.....	21
Gambar 3.1	Bentuk fisik robot Bioloid	24
Gambar 3.2	Struktur <i>joint</i> keseluruhan robot Bioloid	25
Gambar 3.3	Konfigurasi <i>joint</i> tangan kanan robot Bioloid.....	26
Gambar 3.4	Konfigurasi <i>joint</i> tangan kiri robot Bioloid	30
Gambar 3.5	Konfigurasi <i>joint</i> kaki kanan robot Bioloid	35
Gambar 3.6	Konfigurasi <i>joint</i> kaki kiri robot Bioloid	38
Gambar 3.7	Perencanaan pola berjalan robot Bioloid dengan acuan sumbu x.....	43
Gambar 3.8	Perencanaan pola berjalan robot Bioloid dengan acuan sumbu y.....	44
Gambar 3.9	Perencanaan <i>inverse kinematics</i> kaki kanan robot Bioloid terhadap sumbu x.....	45
Gambar 3.10	Perencanaan <i>inverse kinematics</i> kaki kiri robot Bioloid terhadap sumbu x.....	47
Gambar 3.11	Perencanaan <i>inverse kinematics</i> kaki kanan robot Bioloid terhadap sumbu y.....	49
Gambar 3.12	Perencanaan <i>inverse kinematics</i> kaki kiri robot Bioloid terhadap sumbu y.....	51
Gambar 3.13	Perencanaan <i>inverse kinematics</i> tangan kanan dan kiri robot Bioloid terhadap sumbu x.....	52
Gambar 3.14	Grafik perencanaan gerak <i>hip</i> robot Bioloid.....	53
Gambar 3.15	Grafik perencanaan gerak <i>knee</i> robot Bioloid.....	54
Gambar 3.16	Grafik perencanaan gerak <i>ankle</i> robot Bioloid	55

Gambar 3.17	Grafik perencanaan gerak <i>hip</i> robot Bioloid terhadap sumbu y	55
Gambar 3.18	Grafik perencanaan gerak <i>ankle</i> robot Bioloid terhadap sumbu y	56
Gambar 3.19	Grafik perencanaan gerak <i>shoulder</i> robot Bioloid terhadap sumbu x	57
Gambar 3.20	Hasil simulasi robot Bioloid pada perencanaan kaki kanan.....	58
Gambar 3.21	Sudut rotasi dari motor servo robot Bioloid.....	59
Gambar 3.22	Tampilan Roboplus Motion	60
Gambar 3.23	Tampilan dokumen Roboplus Motion	60
Gambar 3.24	Tampilan <i>Pose Utility</i> pada Roboplus Motion.....	61
Gambar 4.1	Posisi tangan kanan saat kondisi normal	64
Gambar 4.2	Posisi tangan kanan saat mengayun ke belakang.....	65
Gambar 4.3	Posisi tangan kanan saat mengayun ke depan.....	65
Gambar 4.4	Perbandingan posisi <i>end effector</i> tangan kanan	67
Gambar 4.5	Posisi tangan kiri saat kondisi normal	68
Gambar 4.6	Posisi tangan kiri saat mengayun ke depan.....	68
Gambar 4.7	Posisi tangan kiri saat mengayun ke belakang.....	69
Gambar 4.8	Perbandingan posisi <i>end effector</i> tangan kiri	71
Gambar 4.9	Posisi kaki kanan saat kondisi normal	72
Gambar 4.10	Posisi kaki kanan saat melangkah ke depan.....	73
Gambar 4.11	Posisi kaki kanan saat berada di belakang	74
Gambar 4.12	Perbandingan posisi <i>end effector</i> kaki kanan.....	76
Gambar 4.13	Posisi kaki kiri saat kondisi normal	77
Gambar 4.14	Posisi kaki kiri saat berada di belakang sumbu normal	77
Gambar 4.15	Posisi kaki kiri saat melangkah ke depan.....	78
Gambar 4.16	Perbandingan posisi <i>end effector</i> kaki kiri.....	79
Gambar 4.17	Posisi kaki kanan saat kondisi normal ditinjau dari sumbu y, z	81
Gambar 4.18	Posisi kaki kanan saat melangkah ditinjau dari sumbu y, z	81
Gambar 4.19	Posisi kaki kanan saat menjadi titik berat ditinjau dari sumbu y, z.....	82
Gambar 4.20	Perbandingan posisi <i>end effector</i> kaki kanan ditinjau dari sumbu y, z.....	83
Gambar 4.21	Posisi kaki kiri saat kondisi normal ditinjau dari sumbu y, z	84

Gambar 4.22	Posisi kaki kiri saat menjadi titik berat ditinjau dari sumbu y, z	85
Gambar 4.23	Posisi kaki kiri saat melangkah ditinjau dari sumbu y, z	85
Gambar 4.24	Perbandingan posisi <i>end effector</i> kaki kiri saat ditinjau dari sumbu y, z	87
Gambar 4.25	Trayektori Θ_{11}	88
Gambar 4.26	Trayektori Θ_{12}	89
Gambar 4.27	Trayektori Θ_{13}	90
Gambar 4.28	Trayektori Θ_{14}	91
Gambar 4.29	Trayektori Θ_{15}	91
Gambar 4.30	Trayektori Θ_{16}	92
Gambar 4.31	Trayektori Θ_9	93
Gambar 4.32	Trayektori Θ_{10}	94
Gambar 4.33	Trayektori Θ_{17}	94
Gambar 4.34	Trayektori Θ_{18}	95
Gambar 4.35	Trayektori Θ_1	96
Gambar 4.36	Trayektori Θ_2	97
Gambar 4.37	Implementasi hasil trayektori pada robot Bioloid.....	98
Gambar 4.38	Perbandingan posisi sudut saat normal <i>pose</i>	99

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter <i>link</i> tangan kanan robot Bioloid	27
Tabel 3.2	Parameter <i>link</i> tangan kiri robot Bioloid	30
Tabel 3.3	Parameter <i>link</i> kaki kanan robot Bioloid	34
Tabel 3.4	Parameter <i>link</i> kaki kiri robot Bioloid	39
Tabel 3.5	Konfigurasi putaran sendi (<i>joint</i>)11,13, dan 15 kaki kanan	46
Tabel 3.6	Konfigurasi putaran sendi (<i>joint</i>)12,14, dan 16 kaki kiri...	48
Tabel 3.7	Konfigurasi putaran sendi (<i>joint</i>) 9, dan 17 kaki kanan.....	50
Tabel 3.8	Konfigurasi putaran sendi (<i>joint</i>) 10, dan 18 kaki kanan...	52
Tabel 3.9	Perencanaan pola berjalan <i>joint</i> 11 dan <i>joint</i> 12.....	53
Tabel 3.10	Perencanaan pola berjalan <i>joint</i> 13 dan <i>joint</i> 14.....	54
Tabel 3.11	Perencanaan pola berjalan <i>joint</i> 15 dan <i>joint</i> 16.....	55
Tabel 3.12	Perencanaan pola berjalan <i>joint</i> 9 dan <i>joint</i> 10.....	55
Tabel 3.13	Perencanaan pola berjalan <i>joint</i> 17 dan <i>joint</i> 18.....	56
Tabel 3.14	Perencanaan pola berjalan <i>joint</i> 1 dan <i>joint</i> 2.....	57
Tabel 3.15	Nilai posisi <i>end effector</i> kaki kanan pada simulasi Matlab	56
Tabel 4.1	Nilai sudut tangan kanan dengan input posisi (pengujian <i>inverse kinematics</i>)	63
Tabel 4.2	Nilai posisi <i>end effector</i> tangan kanan (pengujian <i>forward</i> <i>kinematics</i>)	66
Tabel 4.3	Nilai <i>error</i> posisi P_x pada tangan kanan.....	66
Tabel 4.4	Nilai <i>error</i> posisi P_z pada tangan kanan.....	66
Tabel 4.5	Nilai sudut tangan kiri dengan input posisi (pengujian <i>inverse kinematics</i>).....	67
Tabel 4.6	Nilai posisi <i>end effector</i> tangan kiri (pengujian <i>forward</i> <i>kinematics</i>)	69
Tabel 4.7	Nilai <i>error</i> posisi P_x pada tangan kiri.....	70
Tabel 4.8	Nilai <i>error</i> posisi P_z pada tangan kiri.....	70
Tabel 4.9	Nilai sudut kaki kanan dengan input posisi (pengujian <i>inverse kinematics</i>).....	72
Tabel 4.10	Nilai posisi <i>end effector</i> kaki kanan (pengujian <i>forward</i> <i>kinematics</i>)	74
Tabel 4.11	Nilai <i>error</i> posisi P_x pada kaki kanan	75
Tabel 4.12	Nilai <i>error</i> posisi P_z pada kaki kanan.....	75
Tabel 4.13	Nilai sudut kaki kiri dengan input posisi (pengujian <i>inverse</i> <i>kinematics</i>)	76
Tabel 4.14	Nilai posisi <i>end effector</i> kaki kiri (pengujian <i>forward</i> <i>kinematics</i>)	78

Tabel 4.15	Nilai <i>error</i> posisi P_x pada kaki kiri	78
Tabel 4.16	Nilai <i>error</i> posisi P_z pada kaki kiri	79
Tabel 4.17	Nilai sudut kaki kanan dengan input posisi ditinjau dari sumbu y,z (pengujian <i>inverse kinematics</i>).....	80
Tabel 4.18	Nilai posisi <i>end effector</i> kaki kanan terhadap sumbu y,z (pengujian <i>forward kinematics</i>).....	82
Tabel 4.19	Nilai <i>error</i> posisi P_y pada kaki kanan dari sumbu y,z	83
Tabel 4.20	Nilai <i>error</i> posisi P_z pada kaki kanan dari sumbu y,z	83
Tabel 4.21	Nilai sudut kaki kiri dengan input posisi terhadap sumbu y,z (pengujian <i>inverse kinematics</i>).....	84
Tabel 4.22	Nilai posisi <i>end effector</i> kaki kiri terhadap sumbu y,z (pengujian <i>forward kinematics</i>).....	86
Tabel 4.23	Nilai <i>error</i> posisi P_y pada kaki kiri dari sumbu y,z	87
Tabel 4.24	Nilai <i>error</i> posisi P_z pada kaki kiri dari sumbu y,z	87
Tabel 4.25	Data sudut kemiringan pada robot Bioloid pada pengujian implementasi	98

BAB I

PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah dan tujuan dari penelitian pada Tugas Akhir ini. Selain itu, dijelaskan juga mengenai metodologi dan sistematika dalam penyelesaian Tugas Akhir, serta relevansi untuk penelitian selanjutnya.

1.1 Latar Belakang

Robotika merupakan salah satu disiplin ilmu yang berkembang pesat seiring dengan kemajuan teknologi. Tujuan utama pembuatan robot adalah sebagai alat bantu manusia dalam menyelesaikan pekerjaan terutama pekerjaan yang memerlukan ketelitian tinggi dan berbahaya. Salah satu teknologi robotika yang banyak digunakan di industri adalah lengan robot atau yang dapat di sebut robot manipulator. Teknologi robot manipulator memiliki beberapa kelebihan untuk membantu pekerjaan manusia, yaitu dapat menekan biaya produksi, meningkatkan produktifitas, mampu menyelesaikan kondisi kerja yang berulang-ulang, memiliki ketelitian tinggi dan kecepatan dalam menyelesaikan tugas serta dapat diprogram ulang sehingga mampu difungsikan untuk menyelesaikan beberapa tugas yang berbeda.

Selain itu, teknologi robotika yang sedang berkembang ialah robot *humanoid*. Robot *humanoid* merupakan robot yang memiliki konstruksi tubuh dan pergerakan menyerupai manusia. Pada robotika, terdapat istilah *DoF* (*Degree of Freedom*) atau derajat kebebasan. Secara umum *DoF* pada robot adalah setiap gerakan linier atau putaran sepanjang atau sekitar pada sebuah sumbu (*axis*).

Analisis kinematika pada robot dapat dibagi menjadi 2 yaitu *forward kinematics* dan *inverse kinematics*. *Forward kinematics* adalah analisis kinematika yang digunakan untuk mendapatkan koordinat posisi (x, y, z) jika diketahui sudut dari tiap sendi (*joint*). Sedangkan *Inverse Kinematics* adalah analisis kinematika untuk mendapatkan besar sudut dari masing-masing *joint* jika diketahui koordinat posisi (x, y, z). Penerapan algoritma *inverse kinematics* akan mendapatkan kombinasi sudut yang dimiliki oleh robot *n-DoF* yang akan berfungsi menghasilkan posisi akhir tertentu dari *end effector* robot.

Pada tugas akhir ini, fokus yang akan dibahas ialah analisis *inverse kinematics* tersegmentasi untuk mendapatkan sudut – sudut pada

joint robot *humanoid* yang akan digunakan untuk melakukan suatu gerakan. Analisis *inverse kinematics* dilakukan secara tersegmentasi, yaitu dengan melakukan analisis perbagian anggota tubuh dari robot *humanoid*. Metode yang digunakan untuk analisis *inverse kinematics* menggunakan pendekatan geometris. Sudut yang telah diperoleh dari analisis *inverse kinematics* akan di olah menggunakan interpolasi polinomial yang bertujuan untuk mendapatkan fungsi polinomial yang sesuai dengan kumpulan titik data (x_n, y_n) yang diketahui. Robot yang digunakan untuk penelitian ialah robot *humanoid* jenis Bioloid.

1.2 Rumusan Masalah

Untuk membuat robot *humanoid* dapat bergerak terkontrol dengan melakukan tujuan tertentu diperlukan algoritma untuk memutar dan menggerakkan *joint* yang terdapat pada robot. Selain itu, permasalahan yang akan diselesaikan adalah analisis *inverse kinematics* tersegmentasi dengan pendekatan geometris untuk mendapatkan nilai sudut pada masing-masing *joint* yang terdapat pada robot.

1.3 Batasan Masalah

Analisis *inverse kinematics* dilakukan secara tersegmentasi, dengan cara dibagi menjadi per- bagian anggota tubuh yaitu kaki dan tangan dengan pendekatan geometris. Pada saat berjalan terdapat *joint* dari bagian tubuh yang aktif bergerak, Oleh karena itu, analisis *inverse kinematics* hanya fokus pada *joint* aktif saat berjalan. Sehingga dapat diasumsikan analisis *inverse kinematics* fokus pada 5 *joint* pada kaki. Sementara pada tangan robot, fokus yang dilakukan pada 1 *joint*. Selain itu, perhitungan dibatasi sampai dengan analisis *inverse kinematics* posisi dan tidak mencakup analisis *dynamic* pada robot. Pada implementasi *walking gait* robot Bioloid dilakukan pada bidang datar.

1.4 Tujuan Penelitian

Robot Bioloid dapat dikontrol agar dapat berjalan mirip dengan manusia dan mempertahankan keseimbangan tubuhnya. Oleh karena itu, diperlukan perancangan pola berjalan atau *walking gait*. Posisi *joint* yang digunakan untuk berjalan akan ditentukan. Lalu, dilakukan analisis *inverse kinematics* secara tersegmentasi dengan pendekatan geometris untuk mendapatkan sudut dari *joint*. Analisis *inverse kinematics* berbasis geometris diharapkan akan mendapatkan nilai sudut dari tiap *joint* aktif. Penggunaan metode kurva interpolasi polinomial diharapkan dapat

menentukan trayektori sudut dari *joint* pada robot Bioloid yang digunakan untuk berjalan. Sehingga, robot Bioloid dapat melakukan implementasi *walking gait* sesuai dengan perencanaan.

1.5 Metode Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam penyusunan Tugas Akhir ini antara lain:

- a. Studi Literatur
Bertujuan untuk memantapkan konsep sistem yang akan dibuat dan mempelajari lebih mendalam tentang teori *forward kinematics* dan *inverse kinematics* pada robot *humanoid* jenis Bioloid.
- b. Perancangan *Walking Gait*
Perancangan pola berjalan robot Bioloid akan menyesuaikan dengan konstruksi tubuh dan konfigurasi *joint* robot. Lalu, perhitungan analisis *inverse kinematics* berbasis geometris berfungsi untuk mendapatkan sudut pada *joint* yang aktif digunakan untuk berjalan. Hasil perhitungan sudut akan menjadi *input* pada proses interpolasi polinomial.
- c. Perancangan Simulasi
Hasil pemodelan *forward kinematics* dan *inverse kinematics* yang didapat akan dirancang ke dalam simulasi *software* Matlab dengan *toolbox* untuk robot dari Peter E Corke.
- d. Perancangan Implementasi
Melakukan implementasi dari hasil analisis *inverse kinematics* kedalam robot.
- e. Analisis
Melakukan analisis terhadap perbandingan hasil rancangan simulasi dengan hasil implementasi, lalu memberikan kesimpulan.
- f. Penulisan Buku
Tahap penyusunan buku, meliputi pendahuluan, teori dasar, desain sistem, hasil dan simulasi serta kesimpulan sebagai penutup.

1.6 Sistematika Penulisan

Pembahasan pada Tugas Akhir ini dibagi menjadi lima Bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

Bab I : Pendahuluan

Pada bab ini menjelaskan mengenai latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, sistematika penulisan, serta relevansi.

Bab II : Teori Dasar

Bab ini menjelaskan mengenai tinjauan pustaka, konsep dasar dari robotika, analisis *forward kinematic*, analisis *inverse kinematics* dengan pendekatan geometris untuk mendapatkan sudut pada masing-masing *joint* .

Bab III : Desain Sistem

Bagian ini berisi pembahasan mengenai desain robot *humanoid* tipe Bioloid. Cara menentukan parameter DH robot Bioloid. Pemodelan matematis dari *forward kinematics* untuk mendapatkan posisi yang diinginkan. Pemodelan matematis dari *inverse kinematics* menggunakan dengan pendekatan geometris untuk mendapatkan sudut dari masing-masing *joint*. Dari kedua pemodelan tersebut dibentuk desain simulasi *forwad kinematics* dan *inverse kinematics* menggunakan *software* Matlab dengan *toolbox Peter Corke* versi 8.

Bab IV : Implementasi dan Analisis Data

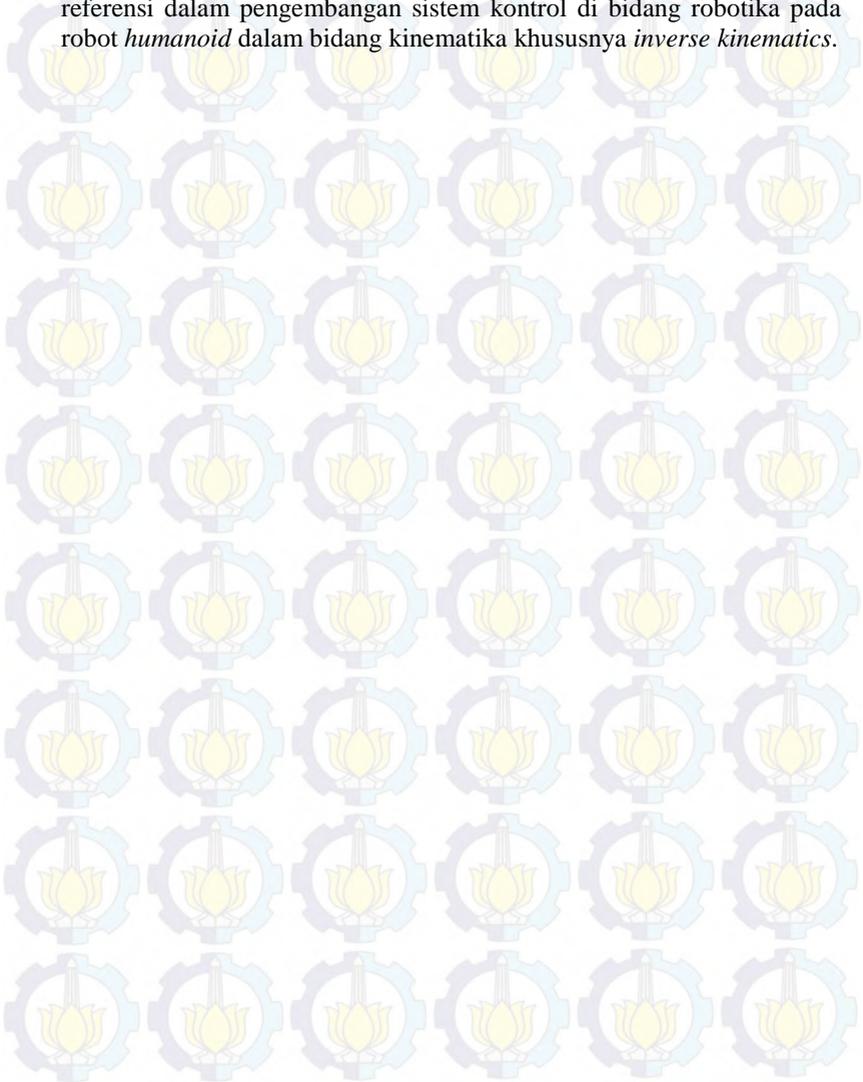
Bab ini memuat hasil simulasi,implementasi beserta analisis data pada setiap pengujian sistem.

Bab V : Penutup

Analisis yang dilakukan pada Bab IV akan diambil suatu kesimpulan Saran diberikan sebagai bahan evaluasi untuk penelitian selanjutnya.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan menjadi referensi dalam pengembangan sistem kontrol di bidang robotika pada robot *humanoid* dalam bidang kinematika khususnya *inverse kinematics*.





BAB II TEORI DASAR

Bab ini berisi materi dasar yang digunakan dalam penyelesaian dari Tugas Akhir ini. Beberapa aspek yang akan dibahas pada bab ini meliputi tinjauan pustaka terkait penelitian robot *humanoid* jenis Bioloid, *modeling* robot Bioloid, serta analisis *forward* dan *inverse kinematics* serta metode interpolasi polinomial yang berfungsi untuk mendapatkan data sudut.

2.1 Tinjauan Pustaka

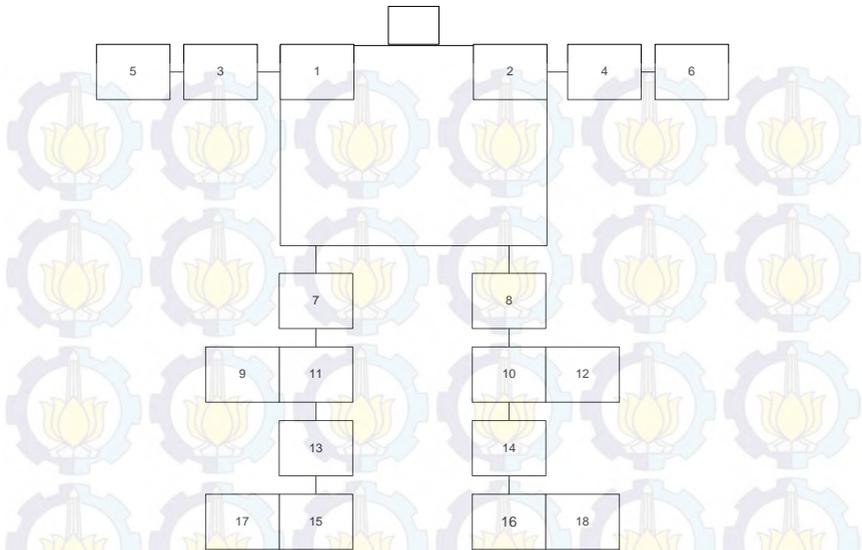
Robot *humanoid* terdiri dari kata robot dan *humanoid*. Kata robot pertama kali diperkenalkan oleh Ceko Karel Capek pada tahun 1920, kata “robot” berasal dari bahasa Ceko yang memiliki arti untuk bekerja. Sedangkan definisi dari *humanoid* adalah segala sesuatu yang memiliki struktur menyerupai manusia. Maka robot *humanoid* dapat di definisikan sebagai sebuah robot yang memiliki karakteristik menyerupai manusia, baik keseluruhan struktur maupun pergerakan dari robot tersebut. Riset mengenai analisis kinematika robot *humanoid* sudah mulai berkembang salah satunya ialah analisis *inverse kinematics* pada robot *humanoid* saat melakukan pergerakan tertentu. Fokus pada tugas akhir ini adalah menyelesaikan analisis *inverse kinematics*. Solusi dalam *inverse kinematics* dapat diklasifikasi ke dalam dua pendekatan yaitu: Solusi analisis *closed form* dan solusi *numeric*

Dalam hal ini solusi *inverse kinematics* yang akan dibahas adalah solusi analisis *closed form* dengan pendekatan geometris untuk menentukan sudut yang diinginkan pada masing-masing *joint* dari robot Bioloid.

Perhitungan sudut yang telah peroleh akan di olah menggunakan interpolasi polinomial untuk mendapatkan nilai sudut dengan margin yang lebih kecil yang berfungsi sebagai acuan gerakan *joint* pada robot Bioloid saat implementasi.

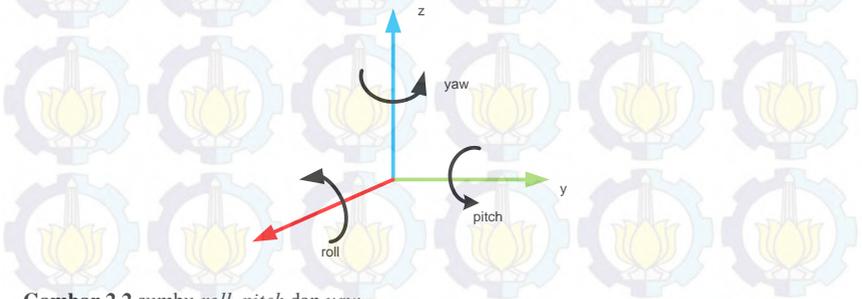
2.2 Robot *Humanoid*

Secara *visual*, struktur bentuk fisik pada robot *humanoid* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



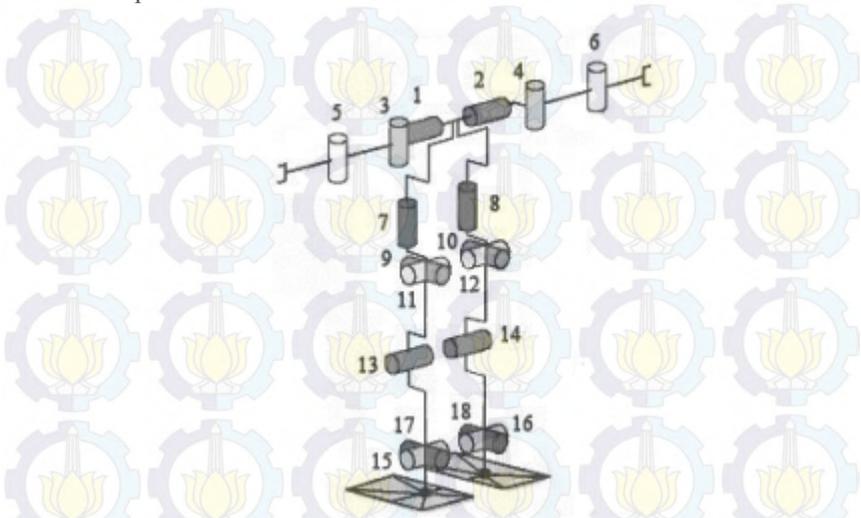
Gambar 2.1 Bagian – bagian robot humanoid jenis Bioloid. [1]

Pada Gambar 2.1, dapat dijelaskan bahwa robot Bioloid memiliki 18 *joint*. Jumlah *joint* padat robot Bioloid dapat dibagi menjadi 4 bagian yaitu : pada tangan terdapat 6 *joint*, dengan tangan kanan sebanyak 3 *joint* dan tangan kiri sebanyak 3 *joint*. Sedangkan, pada kaki terdapat 6 *joint*. Acuan perputaran *joint* pada robot Bioloid dapat dibagi kedalam 3 sumbu, yaitu : *roll* (x), *pitch* (y), dan *yaw* (z) yang dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 sumbu *roll*, *pitch* dan *yaw*

Pergerakan sumbu putar tiap *joint* pada robot Bioloid dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 konfigurasi robot Bioloid

Keterangan :

- a. *Joint* 1, 2 (*shoulder*) sumbu putarnya *pitch*.
- b. *Joint* 3,4 (*shoulder*) sumbu putarnya *yaw*.
- c. *Joint* 5,6 (*elbow*) sumbu putarnya *yaw*.
- d. *Joint* 7,8 (*hip*) sumbu putarnya *yaw*.
- e. *Joint* 9,10 (*hip*) sumbu putarnya *roll*.
- f. *Joint* 11,12 (*hip*) sumbu putarnya *pitch*.
- g. *Joint* 13,14 (*knee*) sumbu putarnya *pitch*.
- h. *Joint* 15, 16 (*ankle*) sumbu putarnya *pitch*.
- i. *Joint* 17, 18 (*ankle*) sumbu putarnya *roll*.

Sendi atau *joint* dari robot Bioloid menggunakan jenis *revolute*. Sendi *revolute*, seperti sebuah engsel dan memungkinkan gerak rotasi antara dua *link*. Selain itu, robot Bioloid ini memiliki kontroler tipe CM-530 dengan CPU tipe ARM Cortex. Kontroler tersebut terletak pada bagian punggung robot.

2.3 Transformasi Homogen

Penggabungan matriks transformasi \mathbf{R} (rotasi), matriks posisi atau gerak translasi dan faktor skala dalam satu matriks merupakan konsep transformasi homogen yang merupakan bagian penting dalam memahami pergerakan robot berkaitan dengan sistem koordinat dalam merepresentasikan posisi dan orientasi sebuah objek[2].

Gerak rotasi dan translasi dari sebuah *link* masing-masing terdiri dari tiga macam yaitu gerak rotasi dan translasi terhadap sumbu x , sumbu y dan sumbu z . Matriks rotasi terhadap sumbu x , sumbu y dan sumbu z masing-masing dituliskan pada Persamaan 2.1-2.3.

$$R_{x,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Sedangkan untuk matriks translasi terhadap sumbu x , sumbu y dan sumbu z masing-masing dituliskan pada Persamaan 2.4-2.6.

$$Trans_{x,a} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$Trans_{y,b} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$Trans_{z,c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Dari persamaan matriks rotasi dan translasi yang telah dijabarkan, maka dapat dibentuk matriks transformasi homogen untuk link-i yang dituliskan pada Persamaan 2.7, dimana R menyakan matriks rotasi dan d adalah matriks posisi.

$$H = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & d_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & s_{1 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \textit{Rotation} & \textit{Translation} \\ \textit{Perspective} & \textit{Scale Factor} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Persamaan transformasi homogen umumnya ditulis seperti Persamaan 2.8.

$$H = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & s & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

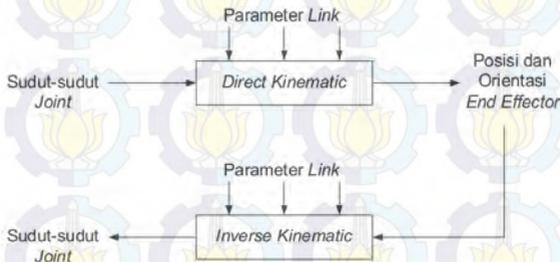
Keterangan :

- Vektor $n = (n_x, n_y, n_z)^T$ merepresentasikan arah sumbu x_i pada $o_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$,
- Vektor $s = (s_x, s_y, s_z)^T$ merepresentasikan arah sumbu y_i , untuk $a = (a_x, a_y, a_z)^T$ merperesentasikan arah sumbu z_i .

- c. Vektor $p = (p_x p_y p_z)^T$ merepresentasikan vektor dari *origin* o_{i-1} menuju *origin* o_i pada *frame* $o_i x_i y_i z_i$.

2.4 Kinematika Robot

Studi kinematika merupakan studi analitis pergerakan kaki atau lengan robot terhadap sistem kerangka koordinat acuan yang diam atau bergerak tanpa memperhatikan gaya yang menyebabkan pergerakan tersebut. Model kinematika merepresentasikan hubungan *end effector* dalam ruang tiga dimensi dengan variabel sendi. Analisis kinematika dibagi menjadi dua yaitu *forward kinematics* dan *inverse kinematics*. Gambar 2.4 merupakan konsep dari *forward kinematics* dan *inverse kinematics*.



Gambar 2.4 Representasi *forward kinematics* dan *inverse kinematics*

Konsep *forward kinematics*, menggunakan *input* sudut dari setiap *joint* untuk mencari posisi dan orientasi *end-effector* sedangkan pada *inverse kinematics* menggunakan *input* posisi dan orientasi untuk mendapatkan nilai sudut dari setiap *joint*.

2.4.1 Forward Kinematics

Permasalahan pada *forward kinematics* adalah menentukan posisi dan orientasi dari *end-effector*, dengan diketahui nilai variabel sudut dari setiap *joint* pada robot. Pada *forward kinematics* untuk melakukan pemodelan robot terdapat standar konvensi yang harus dipenuhi yang dapat menggunakan *DH-convention* atau *Denavit-Hartenberg*. *Denavit-Hartenberg* memperkenalkan pendekatan sistematis dan pendekatan umum menggunakan matriks aljabar untuk menyatakan dan menunjukkan geometri spasial pada link pada lengan robot dengan *frame* yang tetap. Parameter DH dipublikasikan pertama

kali oleh R.S Denavit dan J. Hartenberg pada tahun 1947. Konsepnya, setiap robot dapat digambarkan secara kinematika dengan memberikan empat parameter pada setiap *link*. Untuk memperoleh *forward kinematics* dari *n-link* robot terdapat prosedur yang harus dilakukan berdasarkan kaidah DH. Berikut urutan langkah-langkah yang harus dilakukan :

- Langkah 1** : Menentukan dan memberikan label pada sumbu z_0 sampai z_{i-1} , dimana n adalah jumlah *joint* robot.
- Langkah 2** : Menetapkan *base frame* dan menentukan titik *origin* (o_0) dimana saja sepanjang sumbu z_0 , selanjutnya melengkapi sumbu x_0 dan y_0 sesuai dengan *right hand frame*.
- Langkah 3** : Menentukan titik o_i (untuk $i=1$ sampai $i = n-1$), dengan aturan jika sumbu z_i memotong sumbu z_{i-1} , maka titik o_i ditempatkan pada perpotongannya, dan jika sumbu z_i sejajar dengan sumbu z_{i-1} , maka titik o_i ditempatkan pada *joint* $i+1$.
- Langkah 4** : Menetapkan x_i sepanjang *common normal* antara z_{i-1} dan z_i melalui o_i .
- Langkah 5** : Melengkapi sumbu y_i (untuk $i=1$ sampai $i=n-1$), dengan aturan *right hand frame*.
- Langkah 6** : Menentukan *frame end-effector* $o_n x_n y_n z_n$, dengan mengasumsikan bahwa *joint* ke n adalah *revolute* yaitu *joint* 6 dan arah sumbu z_n yaitu z_6 mengikuti sumbu z terakhir (z_{n-1}), selanjutnya melengkapi titik origin o_n dan x_n, y_n .
- Langkah 7** : Menentukan dan membuat tabel parameter DH. Parameter yang dicari, yaitu :
 a_i = merupakan jarak sepanjang sumbu x_i dari o_i ke perpotongan sumbu x_i dan z_{i+1} .
 d_i = merupakan jarak sepanjang z_{i-1} dari o_{i-1} ke perpotongan sumbu x_i dan z_{i-1} . jika *joint* ke- i adalah prismatic maka d_i bernilai variabel.

α_i = merupakan sudut antara z_{i-1} dan Z_i dengan acuan sumbu x_i .

θ_i = merupakan sudut antara x_{i-1} dan x_i dengan acuan z_{i-1} jika *joint* ke- i adalah *revolute* maka θ_i bernilai variabel.

Langkah 8 : Membentuk matrik transformasi homogen A_i dengan men-subtitusikan nilai pada Tabel *Denavit Hartenberg* kedalam Persamaan 2.9.

$$\begin{aligned}
 A_i &= Rot_z, \theta_i, Trans_z, d_i, Trans_x, a_i, Rot_x, \alpha_i \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \cos \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.9}
 \end{aligned}$$

Langkah 9 : Membentuk matrik transformasi homogen yang menyatakan hubungan antar *joint* seperti pada Persamaan 2.10.

$$T_0^n = A_1 A_2 A_3 \dots A_n \tag{2.10}$$

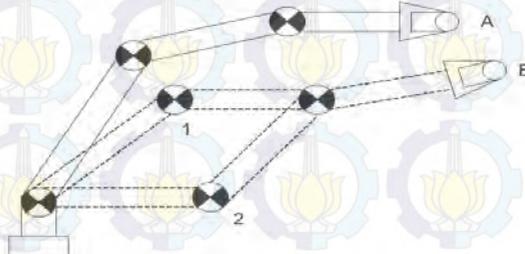
2.4.2 Inverse Kinematics

Permasalahan yang dihadapi pada *inverse kinematics* adalah menentukan sudut setiap *joint* robot dengan posisi dan orientasi *end-effector* yang diketahui. Permasalahan *inverse kinematics* tidak seperti *forward kinematics* yang lebih sederhana, karena persamaannya yang nonlinier, dan juga adanya beberapa solusi yang muncul. Oleh karena itu solusi dari analisis *inverse kinematics* disebut juga dengan *multiple*

solution. Eksistensi dari setiap solusi dapat digunakan jika posisi *end-effector* dan orientasi yang diberikan termasuk dalam ruang kerja (*workspace*).

Apabila posisi dan orientasi (titik tujuan) dari *end effector* berada di dalam area jangkauan (*workspace*), maka sekurang-kurangnya terdapat satu solusi. Apabila solusinya ada, maka kemungkinan lain ialah solusinya lebih dari satu (*multiple solution*).

Pada Gambar 2.5 dibawah ini dapat dilihat bahwa konfigurasi *link* pada lengan robot manipulator saat menuju ke titik yang telah di tentukan.



Gambar 2.5 Konfigurasi posisi lengan robot manipulator pada 2 titik.

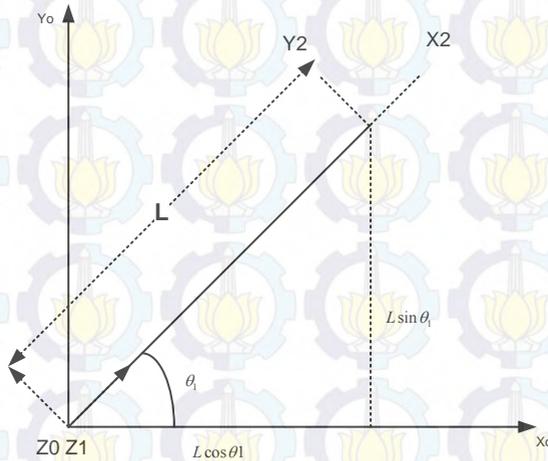
Pada Gambar 2.5 dapat dilihat bahwa terdapat 2 solusi dari konfigurasi posisi *link* robot manipulator saat menuju titik akhir yang telah di tentukan.

Terdapat 3 metode untuk mendapatkan solusi *inverse kinematics*[3], diantaranya adalah :

- a. Pendekatan Analitis
Solusi dengan menggunakan pendekatan transformasi yang merepresentasikan posisi dan orientasi terhadap *base frame*.
- b. Pendekatan Geometris
Memproyeksikan konfigurasi lengan atau bagian tubuh dari robot dengan menggunakan pendekatan geometris untuk mendapatkan solusi *inverse kinematics*.
- c. Pendekatan *Hybrid*
Gabungan antara pendekatan analitis dan geometris.

2.4.2.1 Inverse Kinematics Berbasis Geometris

Solusi *inverse kinematics* berbasis geometris diperoleh berdasarkan sistem koordinat *link* dan pola geometris konfigurasi *joint* robot. Dalam penyelesaiannya, dapat menggunakan trigonometri untuk mendapatkan sudut-sudut dari *joint* robot. Contoh penerapannya dapat dilihat pada analisis *inverse kinematics* dengan 1 *link* robot Planar pada Gambar 2.6.

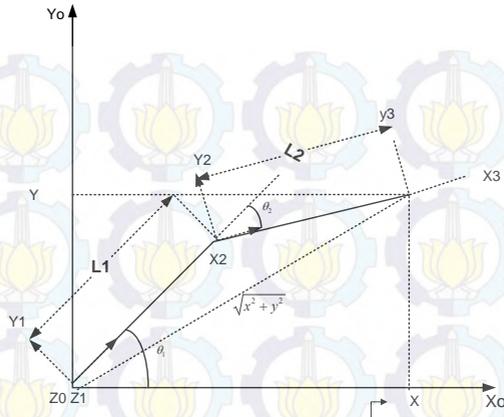


Gambar 2.6 Manipulator planar dengan 1 *link*[3]

Dari Gambar 2.6, penyelesaian *inverse kinematics* dengan menggunakan pendekatan geometris yang terdapat pada Persamaan 2.11.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{L \sin \theta_1}{L \cos \theta_1} \right) = a \tan 2(\sin \theta_1, \cos \theta_1) \quad (2.11)$$

Selain itu, akan dijelaskan tentang konsep penyelesaian *inverse kinematics* menggunakan pendekatan geometris pada robot planar 2 *link*.



Gambar 2.7 Manipulator planar dengan 2 link

Untuk mengetahui nilai dari sudut dari *joint* pada robot planar 2 link, perhitungan dimulai dengan menghitung nilai θ_2 .

Metode geometris untuk mendapatkan nilai θ_2 akan dituliskan dalam Persamaan 2.12–2.15.

$$x^2 + y^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cos(180 - \theta) \quad (2.12)$$

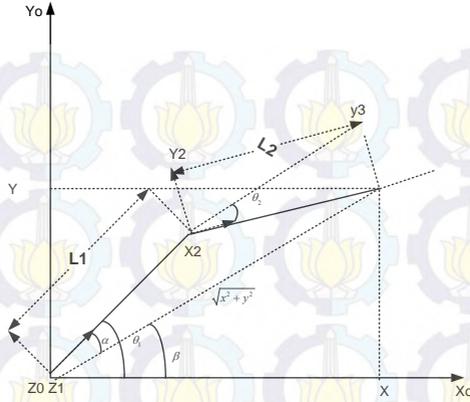
$$\cos(180 - \theta) = -\cos \theta_2 \quad (2.13)$$

Maka :

$$\cos \theta_2 = \frac{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2l_1l_2} \quad (2.14)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2l_1l_2} \right) \quad (2.15)$$

Setelah memperoleh nilai dari θ_2 maka, nilai dari θ_1 dapat diperoleh seperti pada Persamaan 2.16–2.18.



Gambar 2.8 Perhitungan untuk mencari nilai θ_1

$$\theta_1 = \beta - \alpha \quad (2.16)$$

$$\beta = a \tan 2(y, x) \quad (2.17)$$

$$\alpha = a \tan 2(L_2 \sin \theta_2, L_1 + L_2 \cos \theta_2) \quad (2.18)$$

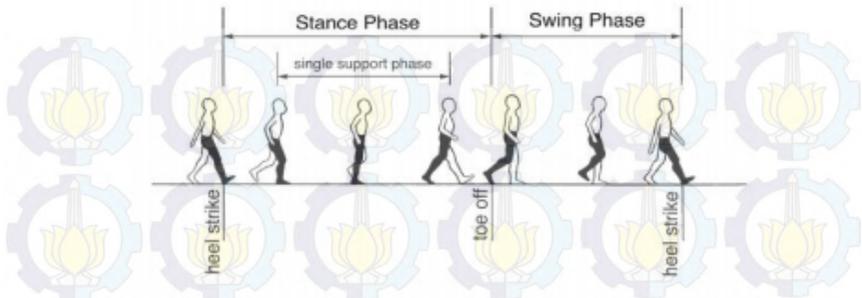
Jadi nilai dari θ_1 adalah :

$$\theta_1 = a \tan 2(y, x) - a \tan 2(L_2 \sin \theta_2, L_1 + L_2 \cos \theta_2) \quad (2.19)$$

2.5 Perencanaan Gaya Berjalan

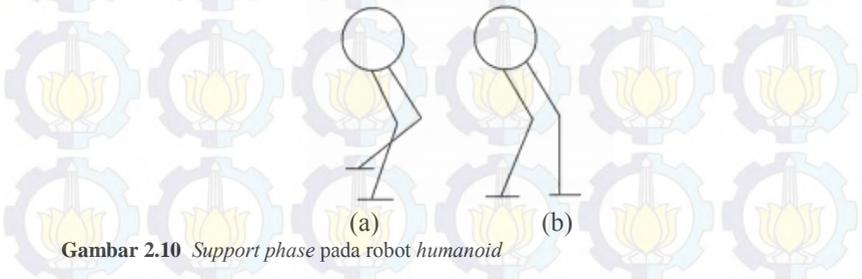
Robot *humanoid* pada umumnya memiliki dua kaki, sehingga dapat disebut dengan istilah *biped* robot yaitu robot yang memiliki dua kaki. Konsep gaya berjalan pada robot bipedal mengikuti pola berjalan manusia.

Gaya normal berjalan manusia dibagi menjadi tahap berdiri (*stance*) diperkirakan (60%) dan tahap berjalan (*swing*) sebesar (40%). *Stance* adalah pada saat kaki berada di tanah seperti tampak pada Gambar 2.9. *Swing* adalah kondisi saat kaki melangkah untuk persiapan ke tahap *stance* selanjutnya. Jika panjang dan kecepatan melangkah dikurangi dapat memungkinkan untuk menambah stabilitas *bipedal*.



Gambar 2.9 Gaya berjalan manusia

Selain itu, pola gaya berjalan dapat dibagi menjadi 2 yaitu: *single support phase* dan *double support phase*. *Single support phase* adalah saat satu kaki menjadi tumpuan titik berat ketika satu kaki yang lain melangkah kedepan, hal tersebut seperti yang terlihat pada Gambar 2.10 bagian (a). Sedangkan *double support phase* adalah kondisi ketika kaki yang sebelumnya melangkah (di *single support phase*) telah menapak ke tanah dan satu kaki yang lainnya juga menapak, hal tersebut seperti yang tertera pada Gambar 2.10 bagian (b). Untuk mendapatkan gaya berjalan yang dinamis maka perpindahan antara *single support phase* dan *double support phase* harus sangat halus[4].



Gambar 2.10 Support phase pada robot humanoid

2.6 Interpolasi

Pencocokan kurva merupakan suatu teknik yang penting dan sangat diperlukan untuk melakukan pengolahan data hasil pengukuran suatu variabel, sehingga diperoleh gambaran yang jelas mengenai sifat-sifat atau perilaku variabel yang diukur. Ada dua alasan kebutuhan mencocokkan data ke kurva dari data hasil pengukuran. Pertama, dengan

cara *fitting* bisa memberikan gambaran secara matematis mengenai hubungan antara dua variabel yang diukur. Kedua, dari persamaan kurva yang diperoleh dapat digunakan untuk memprediksikan nilai variabel tak bebas di suatu titik dengan cara menginterpolasi diantara nilai yang telah di definisikan sebelumnya.

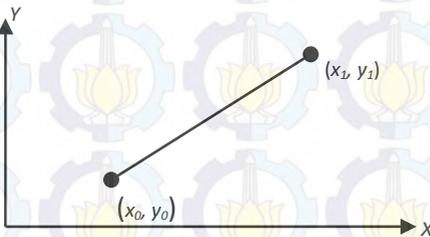
Interpolasi berfungsi untuk menentukan titik-titik antara dari n -buah titik dengan menggunakan suatu fungsi pendekatan tertentu. Metode interpolasi diantaranya ialah: interpolasi linier, interpolasi kuadratik, interpolasi polinomial dan interpolasi lagrange.

2.6.1 Interpolasi Linier

Hubungan yang digunakan untuk menentukan titik-titik antara dari 2 buah titik dengan menggunakan garis lurus. Misal diberikan dua buah titik, (x_0, y_0) dan (x_1, y_1) . Polinom yang menginterpolasi kedua titik itu adalah persamaan garis lurus yang berbentuk: Pendekatan interpolasi linier dapat dilihat pada Persamaan 2.20.

$$p(x) = a_0 + a_1x \quad (2.20)$$

Gambar 2.11, merupakan contoh grafik dari interpolasi linier yang memperlihatkan garis lurus menginterpolasi titik-titik (x_0, y_0) dan (x_1, y_1) .



Gambar 2.11 Interpolasi Linier

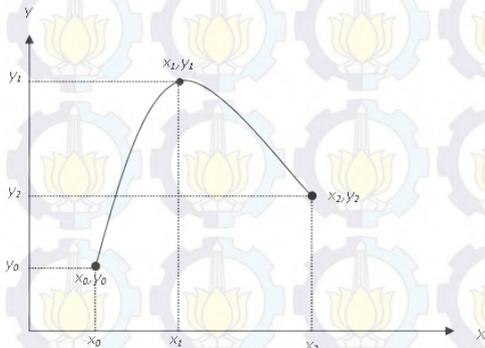
2.6.2 Interpolasi Kuadratik

Metode yang digunakan untuk mencari titik-titik antara dari 3 buah titik $P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$ dan $P_3(x_3, y_3)$ dengan menggunakan pendekatan fungsi kuadrat merupakan konsep interpolasi kuadratik. Misal diberi tiga buah titik data (x_1, y_1) , (x_2, y_2) dan (x_3, y_3) . Polinom

yang menginterpolasi ketiga buah titik itu adalah polinom kuadrat yang berbentuk dari Persaman 2.21 :

$$p_2(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (2.21)$$

Gambar 2.12, merupakan contoh grafik dari interpolasi kuadratik.



Gambar 2.12 Grafik interpolasi kuadratik

2.6.3 Interpolasi Lagrange

Pendekatan interpolasi lagrange yang disusun dalam kombinasi deret dan didefinisikan pada Persaman 2.22 :

$$y = \sum_{i=1}^N y_i \prod_{j \neq i} \frac{(x - x_j)}{(x_i - x_j)} \quad (2.22)$$

2.6.4 Interpolasi Polinomial

Interpolasi polinomial digunakan untuk mencari titik-titik antara dari n buah titik $P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$, $P_3(x_3, y_3)$, $P_n(x_n, y_n)$ dengan menggunakan pendekatan fungsi polinomial pangkat n-1[5]. Pada tugas akhir ini, penulis akan menggunakan interpolasi polinomial yang berfungsi untuk mendapatkan nilai sudut dari titik – titik yang telah diketahui. Persamaan 2.23 diperoleh dari perhitungan interpolasi polinomial.

$$y_1 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + a_3x_1^3 \quad (2.23)$$

Algoritma untuk melakukan perhitungan interpolasi polinomial ialah :

- a. Menentukan jumlah titik N yang diketahui.
- b. Memasukkan titik-titik yang diketahui) $P_i = (x_i , y_i$ untuk $i=1,2,3,\dots,N$
- c. Menyusun matriks dari titik-titik yang diketahui sebagai berikut:

$$J = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^{n-1} & y_1 \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \dots & x_2^{n-1} & y_2 \\ 1 & x_3 & x_3^2 & \dots & x_3^{n-1} & y_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^{n-1} & y_n \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

- d. Menyelesaikan persamaan simultan dengan *augmented* matrik di atas dengan menggunakan metode eliminasi gauss - Jordan.
- e. 5.Menyusun koefisien fungsi polynomial berdasarkan penyelesaian persamaan simultan yang telah dijabarkan diatas.
- f. Memasukkan nilai x yang telah diketahui.
- g. Menghitung nilai y dari fungsi polinomial yang telah dihasilkan.
- h. Menampilkan titik (x,y).

BAB III

PERANCANGAN SISTEM

Bab ini berisi pembahasan mengenai sistem yang akan dibangun pada robot Bioloid meliputi penentuan parameter DH yang digunakan untuk perancangan *forward kinematics*, *inverse kinematics* serta perancangan untuk implementasi pada robot Bioloid.

3.1 Spesifikasi Sistem

Definisi sistem dari penelitian ini adalah konfigurasi robot *humanoid* jenis Bioloid beserta algoritma pola berjalan dari robot tersebut. Fokus pembahasan dari penelitian ini adalah implementasi dari analisis *inverse kinematics* robot Bioloid beserta perencanaan gaya berjalan. Spesifikasi sistem yang diharapkan dapat tercapai adalah sebagai berikut :

- a. Robot *humanoid* jenis Bioloid dengan 5 *DoF* pada masing – masing kaki dan 2 *DoF* pada tangan mampu berjalan maju.
- b. Robot memiliki pola gaya berjalan sesuai dengan perencanaan.

3.2 Identifikasi Kebutuhan

Sistem yang akan dibangun harus mampu memenuhi spesifikasi sistem yang telah di rencanakan. Untuk itu perlu dijabarkan sebagai identifikasi kebutuhan sistem yang di antaranya adalah perencanaan gerak robot, perancangan *inverse kinematics*, konfigurasi perangkat lunak dan perangkat keras robot.

3.3 Perancangan dan Implementasi Sistem

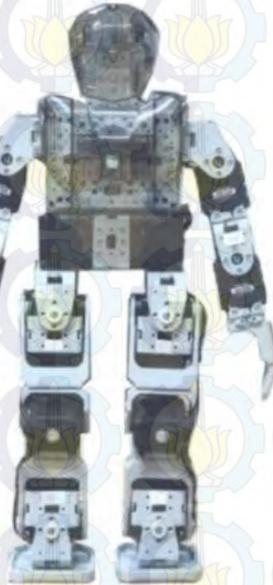
Perancangan dan implementasi sistem dari penelitian ini adalah perencanaan *walking gait* (pola berjalan), analisis *inverse kinematics* untuk mendapatkan sudut yang menjadi acuan gerak robot. Sudut yang diperoleh dari analisis *inverse kinematics* akan disimulasikan terlebih dahulu menggunakan *software* Matlab untuk mengetahui posisi *end effector* lalu implementasi pada robot Bioloid dengan mengkoordinasikan sudut-sudut kedalam aktuator (motor servo) robot Bioloid.

3.3.1 Konfigurasi Robot Bioloid

Robot yang digunakan pada tugas akhir ini adalah robot Bioloid produksi dari Robotis dengan spesifikasi :

- a. Berat : 1,7 Kg
- b. Tinggi : 39,4 cm
- c. Jumlah Sendi : 18

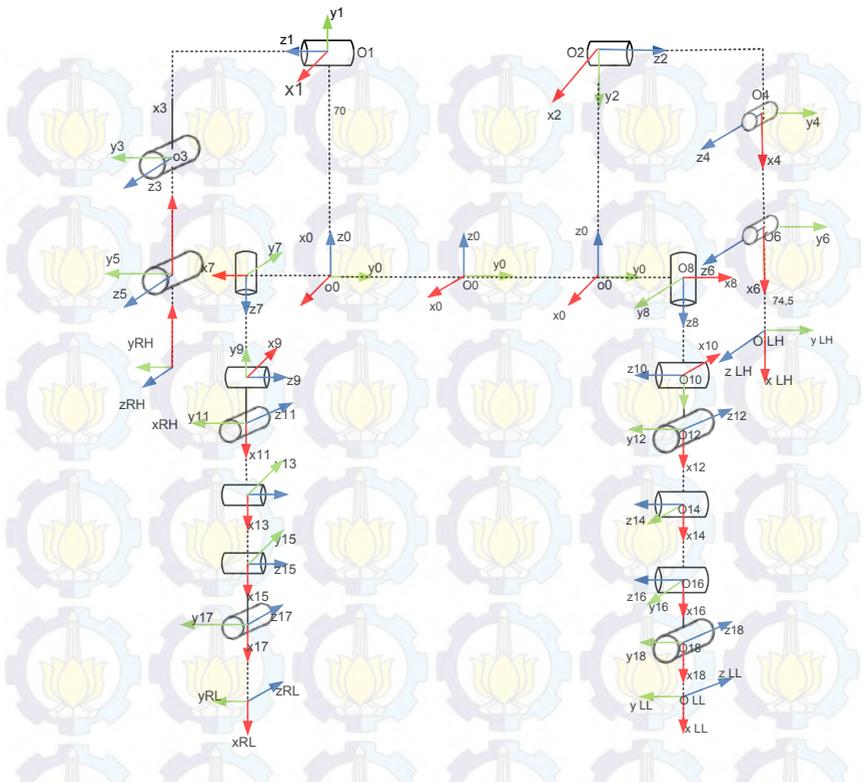
Servo yang digunakan untuk menggerakkan *joint*, tipe dynamixel AX – 12 A dengan kemampuan maksimal saat berputar 300° dan dapat berotasi 360° saat servo berfungsi sebagai roda. Gambar 3.1 merupakan bentuk fisik dari robot Bioloid.



Gambar 3.1 Bentuk fisik robot Bioloid

3.3.2 Perancangan Parameter *Denavit-Hartenberg* Robot Bioloid

Untuk menentukan parameter *Denavit-Hartenberg* maka harus diketahui terlebih dahulu konstruksi *joint* pada robot. Gambar 3.2 merupakan konstruksi *joint* pada robot bioloid.

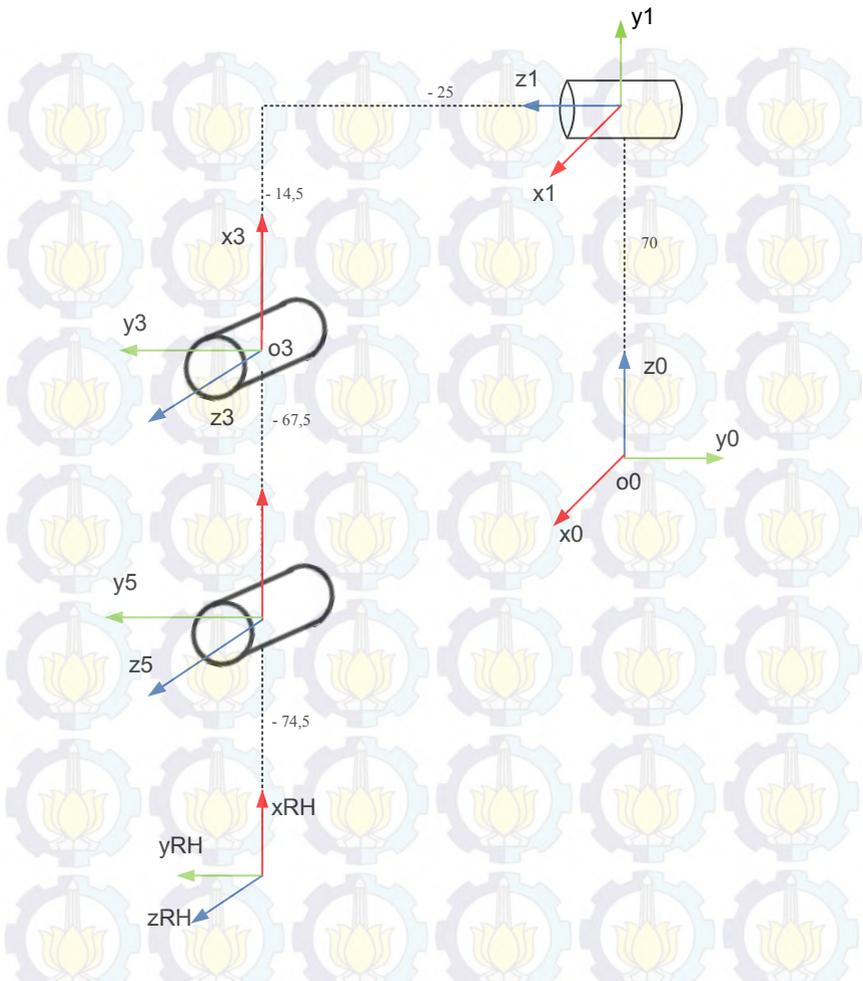


Gambar 3.2 Struktur *joint* secara keseluruhan robot Bioloid

Sesuai dengan teori yang telah di jelaskan pada Bab sebelumnya, parameter D-H dapat di peroleh dengan cara melakukan analisis pada tiap *link* robot. Pada tugas akhir ini untuk mendapatkan parameter D-H, analisis dilakukan secara tersegmentasi.

3.3.2.1 Parameter Denavit-Hartenberg Tangan Robot Bioloid

Bagian pertama, tangan kanan dari robot Bioloid, yang berjumlah 3 *DoF* dengan sumbu putar *revolute*. Gambar 3.3 merupakan konfigurasi *joint* tangan kanan robot Bioloid.



Gambar 3.3 Konfigurasi *joint* tangan kanan robot Bioloid

Pada penomoran *joint* robot untuk bagian kanan akan di atur bernilai ganjil sedangkan untuk bagian kiri akan bernilai genap untuk mempermudah dalam melakukan analisis.

Tabel 3.1 merupakan parameter tiap *link* dari tangan kanan robot Bioloid.

Tabel 3.1 Parameter *link* dari tangan kanan robot Bioloid

<i>Link</i> ke- <i>i</i>	a_i (mm)	α_i (°)	d_i (mm)	Θ_i (°)
1	0	-90	70	0
2	-14,5	90	25	-115~107
3	-67,5	0	0	-38~104
4	-74,5	0	0	0~110

Dari parameter D-H yang telah diperoleh akan menjadi *input* mendapatkan transformasi homogen sebagai solusi dari *forward kinematics*. Persamaan 3.1, merupakan bentuk umum dari transformasi homogen.

$$A_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\alpha_i} & -s_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\theta_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Berikut ini transformasi homogen tangan kanan dari robot Bioloid dengan parameter *link* yang terdapat pada Tabel 3.1.

$$A_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & -s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & c\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 70 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & 0 & s\theta_3 & -14,5c\theta_3 \\ s\theta_3 & 0 & -c\theta_3 & -14,5s\theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & 25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & -67,5c\theta_6 \\ s\theta_5 & c\theta_5 & 0 & -67,5s\theta_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$A_{RH} = \begin{bmatrix} c\theta_{RH} & -s\theta_{RH} & 0 & -74,5c\theta_{RH} \\ s\theta_{RH} & c\theta_{RH} & 0 & -74,5s\theta_{RH} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$T_0^{RH} = (A_1)(A_3)(A_5)(A_{RH}) \quad (3.5)$$

$$n_x = c\theta_1 c\theta_3 (c\theta_5 c\theta_{RH} - s\theta_5 s\theta_{RH}) - s\theta_1 (s\theta_5 c\theta_{RH} + c\theta_5 s\theta_{RH}) \quad (3.6)$$

$$n_y = s\theta_1 c\theta_3 (c\theta_5 c\theta_{RH} - s\theta_5 s\theta_{RH}) - c\theta_1 (s\theta_5 c\theta_{RH} + c\theta_5 s\theta_{RH}) \quad (3.7)$$

$$n_z = -s\theta_3 (c\theta_5 c\theta_{RH} - s\theta_5 s\theta_{RH}) \quad (3.8)$$

$$s_x = c\theta_1 c\theta_3 (-c\theta_5 s\theta_{RH} - s\theta_5 c\theta_{RH}) - s\theta_1 (-s\theta_5 s\theta_{RH} + c\theta_5 c\theta_{RH}) \quad (3.9)$$

$$s_y = s\theta_1 c\theta_3 (-c\theta_5 s\theta_{RH} - s\theta_5 c\theta_{RH}) + c\theta_1 (-s\theta_5 s\theta_{RH} + c\theta_5 c\theta_{RH}) \quad (3.10)$$

$$s_z = -s\theta_3 (c\theta_5 s\theta_{RH} - s\theta_5 c\theta_{RH}) \quad (3.11)$$

$$a_x = c\theta_1 s\theta_3 \quad (3.12)$$

$$a_y = s\theta_1 s\theta_3 \quad (3.13)$$

$$a_z = c\theta_3 \quad (3.14)$$

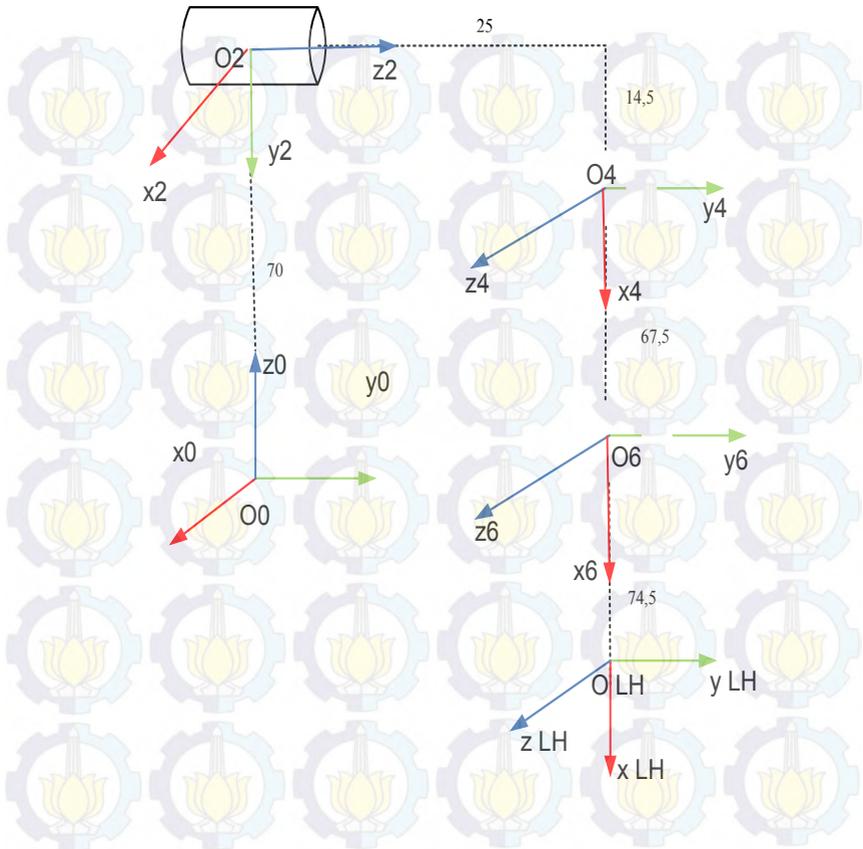
$$p_x = c\theta_1 c\theta_3 (-74,5c\theta_5 c\theta_{RH} + 74,5s\theta_5 s\theta_{RH} - 67,5c\theta_5) - s\theta_1 (-74,5s\theta_5 c\theta_{RH} - 74,5c\theta_5 s\theta_{RH} - 67,5s\theta_5) - 14,5c\theta_1 c\theta_3 - 25s\theta_1 \quad (3.15)$$

$$p_y = s\theta_1 c\theta_3 (-74,5c\theta_5 c\theta_{RH} + 74,5s\theta_5 s\theta_{RH} - 67,5c\theta_5) + c\theta_1 (-74,5s\theta_5 c\theta_{RH} - 74,5c\theta_5 s\theta_{RH} - 67,5s\theta_5) - 14,5s\theta_1 c\theta_3 - 25c\theta_1 \quad (3.16)$$

$$p_z = -s\theta_3 (-74,5c\theta_5 c\theta_{RH} + 74,5s\theta_5 s\theta_{RH} - 67,5c\theta_5) + 14,5s\theta_3 + 70 \quad (3.17)$$

Selanjutnya, menentukan parameter D-H pada bagian tangan kiri robot Bioloid. Tangan kiri robot Bioloid terdiri dari 3 *joint revolute* dengan 1 *end effector*. Pada bagian tangan, analisis *inverse kinematics* akan fokus pada *joint 1* yang terletak pada *shoulder*.

Konfigurasi *joint* pada tangan kiri robot Bioloid dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.4 Konfigurasi *joint* tangan kiri robot Bioloid

Parameter D-H tangan kiri dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Parameter *link* dari tangan kiri robot Bioloid

Link ke- i	a_i (mm)	α_i (°)	d_i (mm)	Θ_i (°)
1	0	-90	70	0
2	14,5	90	25	-107~115
3	67,5	0	0	-104~38

Link ke- i	a_i (mm)	α_i (°)	d_i (mm)	Θ_i (°)
4	74,5	0	0	-110~0

Transformasi homogen tangan kiri pada robot Bioloid dapat dilihat pada Persamaan 3.20 – 3.36.

$$A_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & 0 & -s\theta_2 & 0 \\ s\theta_2 & 0 & c\theta_2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 70 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & s\theta_4 & 14,5c\theta_4 \\ s\theta_4 & 0 & -c\theta_4 & 14,5s\theta_4 \\ 0 & 1 & 0 & 25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & 67,5c\theta_6 \\ s\theta_6 & c\theta_6 & 0 & 67,5s\theta_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$A_{LH} = \begin{bmatrix} c\theta_{LH} & -s\theta_{LH} & 0 & 74,5c\theta_{LH} \\ s\theta_{LH} & c\theta_{LH} & 0 & 74,5s\theta_{LH} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$T_0^{LH} = (A_2)(A_4)(A_6)(A_{LH}) \quad (3.24)$$

$$n_x = c\theta_2 c\theta_4 (c\theta_6 c\theta_{LH} - s\theta_6 s\theta_{LH}) - s\theta_2 (s\theta_6 c\theta_{LH} + c\theta_6 c\theta_{LH}) \quad (3.25)$$

$$n_y = s\theta_2 c\theta_4 (c\theta_6 c\theta_{LH} - s\theta_6 s\theta_{LH}) + c\theta_2 (s\theta_6 c\theta_{LH} + c\theta_6 c\theta_{LH}) \quad (3.26)$$

$$n_z = -s\theta_4 (c\theta_6 c\theta_{LH} - s\theta_6 s\theta_{LH}) \quad (3.27)$$

$$s_x = c\theta_2 c\theta_4 (-c\theta_6 s\theta_{LH} - s\theta_6 s\theta_{LH}) - s\theta_2 (-s\theta_6 s\theta_{LH} + c\theta_6 c\theta_{LH}) \quad (3.28)$$

$$s_y = s\theta_2 c\theta_4 (-c\theta_6 s\theta_{LH} - s\theta_6 s\theta_{LH}) + c\theta_2 (-s\theta_6 s\theta_{LH} + c\theta_6 c\theta_{LH}) \quad (3.29)$$

$$s_z = -c\theta_4 (-c\theta_6 s\theta_{LH} - s\theta_6 s\theta_{LH}) \quad (3.30)$$

$$a_x = c\theta_2 c\theta_4 \quad (3.31)$$

$$a_y = s\theta_2 s\theta_4 \quad (3.32)$$

$$a_z = c\theta_4 \quad (3.33)$$

$$p_x = c\theta_2 c\theta_4 (74,5c\theta_6 c\theta_{LH} - 74,5s\theta_6 s\theta_{LH} + 67,5c\theta_6) - s\theta_2 (74,5s\theta_6 c\theta_{LH} + 74,5c\theta_6 s\theta_{LH} + 67,5s\theta_6) + 14,5c\theta_2 c\theta_4 - 25s\theta_2 \quad (3.34)$$

$$p_y = s\theta_2 c\theta_4 (74,5c\theta_6 c\theta_{LH} - 74,5s\theta_6 s\theta_{LH} + 67,5c\theta_6) + c\theta_2 (74,5s\theta_6 c\theta_{LH} + 74,5c\theta_6 s\theta_{LH} + 67,5s\theta_6) \quad (3.35)$$

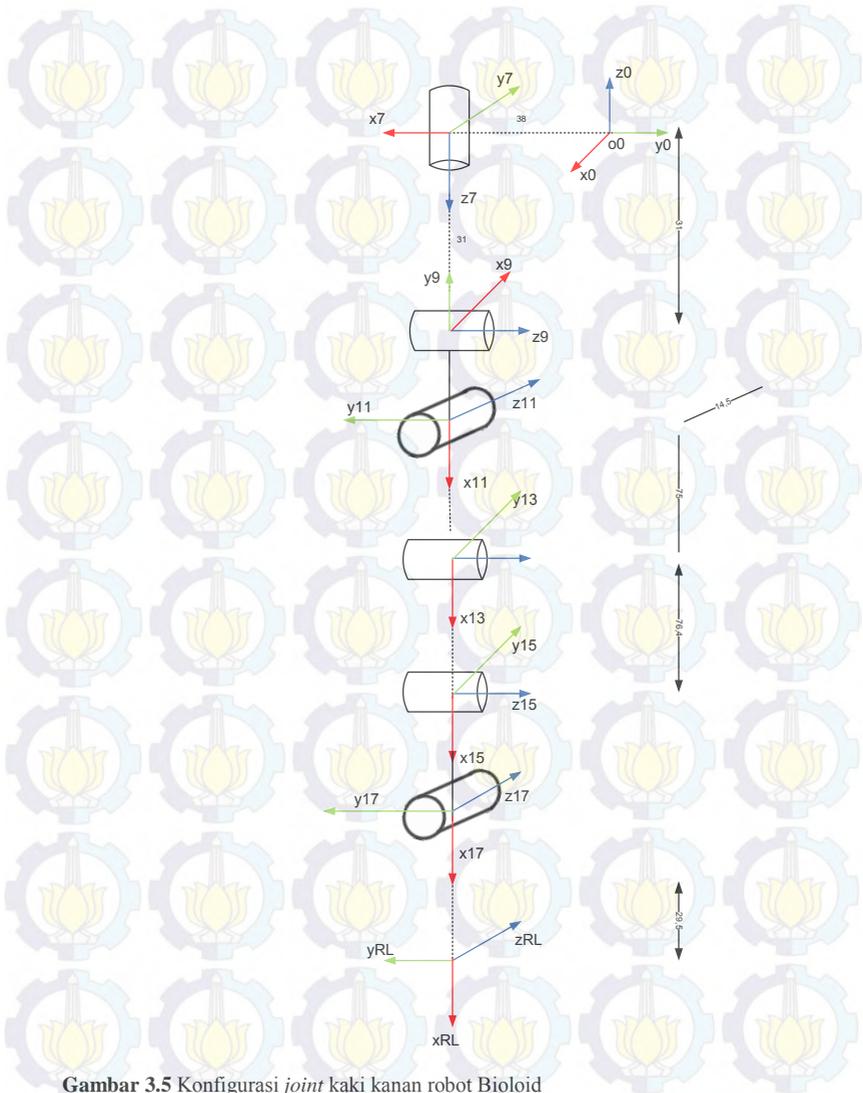
$$+ 14,5s\theta_2 c\theta_4 + 25c\theta_2$$

$$p_z = -s\theta_4 (74,5c\theta_6 c\theta_{LH} - 74,5s\theta_6 s\theta_{LH} + 67,5c\theta_6) - 14,5s\theta_4 + 70 \quad (3.36)$$

3.3.2.2 Parameter *Denavit-Hartenberg* Kaki Robot Bioloid.

Untuk menentukan parameter D-H pada kaki akan dibagi menjadi 2, yaitu : kaki kanan dan kaki kiri. Pada kaki robot Bioloid analisis *inverse kinematics* fokus pada 5 *joint*. Pada kaki kanan fokus pada *joint* 9, 11, 13, 15, 17. Pada kaki kiri fokus pada *joint* 10, 12, 14, 16, 18. *Joint* 11, 12, 13, 14 dan 15 merupakan *joint* yang akan ditinjau dari sumbu x, z. Untuk *joint* 9, 10, 17, 18 akan ditinjau dari sumbu y, z.

Konfigurasi *link* dari kaki kanan robot Bioloid dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Konfigurasi *joint* kaki kanan robot Bioloid

Parameter D-H dari *joint* kaki kanan robot Bioloid dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Parameter *link* dari kaki kanan robot Bioloid

Link ke- i	a_i (mm)	α_i (°)	d_i (mm)	Θ_i (°)
1	38	180	0	0
2	0	-90	31	-30~58
3	0	-90	0	0~36
4	75	90	14,5	-21~124
5	76,4	0	0	0~38
6	0	-90	0	-26~16
7	29,5	0	0	-21~10

Setelah mendapatkan parameter D-H dari kaki kanan robot Bioloid, maka akan diperoleh transformasi homogenya. Transformasi homogen kaki kanan robot Bioloid dapat dilihat pada Persamaan 3.37 – 3.55.

$$A_7 = \begin{bmatrix} c\theta_7 & 0 & s\theta_8 & 38c\theta_7 \\ s\theta_7 & 0 & -c\theta_8 & 38s\theta_7 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

$$A_9 = \begin{bmatrix} c\theta_9 & 0 & -s\theta_9 & 0 \\ s\theta_9 & 0 & c\theta_9 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 31 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} c\theta_{11} & 0 & -s\theta_{11} & 0 \\ s\theta_{11} & 0 & c\theta_{11} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$$A_{13} = \begin{bmatrix} c\theta_{13} & 0 & s\theta_{13} & 75c\theta_{13} \\ s\theta_{13} & 0 & -c\theta_{13} & 75s\theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 & 14,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$A_{15} = \begin{bmatrix} c\theta_{15} & -s\theta_{15} & 0 & -76,4c\theta_{15} \\ s\theta_{15} & c\theta_{15} & 0 & -76,4s\theta_{15} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

$$A_{17} = \begin{bmatrix} c\theta_{17} & 0 & -s\theta_{17} & 0 \\ s\theta_{17} & 0 & c\theta_{17} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

$$A_{RL} = \begin{bmatrix} c\theta_{RL} & -s\theta_{RL} & 0 & 29,5c\theta_{RL} \\ s\theta_{RL} & c\theta_{RL} & 0 & 29,5s\theta_{RL} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

$$T_0^{RL} = (A_7)(A_9)(A_{11})(A_{13})(A_{15})(A_{17})(A_{RL}) \quad (3.44)$$

$$n_x = [c\theta_7 c\theta_9 c\theta_{11} c\theta_{13} + s\theta_7 s\theta_{11} c\theta_{13} + c\theta_7 s\theta_9 c\theta_{13} - s\theta_7 c\theta_9 c\theta_{13}] \\ [(c\theta_{15} c\theta_{17} - s\theta_{15} s\theta_{17}) c\theta_{RL}] - [c\theta_7 c\theta_9 s\theta_{11} + s\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11}] \\ [(s\theta_{15} c\theta_{17} + c\theta_{15} s\theta_{17}) c\theta_{RL}] \quad (3.45)$$

$$n_y = [s\theta_7 c\theta_9 c\theta_{11} c\theta_{13} - c\theta_7 s\theta_9 s\theta_{11} c\theta_{13} - s\theta_7 s\theta_9 s\theta_{13} + c\theta_7 s\theta_9 s\theta_{13}] \\ [(c\theta_{15} c\theta_{17} - s\theta_{15} s\theta_{17}) c\theta_{RL}] \\ - [s\theta_7 c\theta_9 c\theta_{11} - c\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11}] [(s\theta_{15} c\theta_{17} + c\theta_{15} s\theta_{17}) c\theta_{RL}] \\ - [s\theta_7 c\theta_9 c\theta_{11} s\theta_{13} - c\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11} s\theta_{13} - s\theta_7 s\theta_9 c\theta_{13} - c\theta_7 c\theta_9 c\theta_{13}] s\theta_{RL} \quad (3.45)$$

$$n_z = [s\theta_{11}c\theta_{13}] [(c\theta_{15}c\theta_{17} - s\theta_{15}s\theta_{17})c\theta_{RL}] + \quad (3.46)$$

$$c\theta_{11} [(s\theta_{15}c\theta_{17} + c\theta_{15}s\theta_{17})c\theta_{RL}] - [s\theta_{11}s\theta_{13}] s\theta_{RL}$$

$$s_x = [c\theta_7c\theta_9c\theta_{11}c\theta_{13} + s\theta_7s\theta_9c\theta_{11}c\theta_{13} + c\theta_7s\theta_9c\theta_{13} - s\theta_7c\theta_9c\theta_{13}] \quad (3.47)$$

$$[-(c\theta_{15}c\theta_{17} - s\theta_{15}s\theta_{17})s\theta_{RL}]$$

$$s_y = -[s\theta_7c\theta_9c\theta_{11}c\theta_{13} - c\theta_7s\theta_9s\theta_{11}c\theta_{13} - s\theta_7s\theta_9s\theta_{13} + c\theta_7c\theta_9s\theta_{13}] \quad (3.48)$$

$$[(c\theta_{15}c\theta_{17} - s\theta_{15}s\theta_{17})s\theta_{RL}] + [s\theta_7c\theta_9s\theta_{11} - c\theta_7s\theta_9c\theta_{11}]$$

$$[(s\theta_{15}c\theta_{17} + c\theta_{15}s\theta_{17})s\theta_{RL}]$$

$$s_z = -[s\theta_{11}c\theta_{13}] [(c\theta_{15}c\theta_{17} - s\theta_{15}s\theta_{17})s\theta_{RL}] - \quad (3.49)$$

$$c\theta_{11} [(s\theta_{15}c\theta_{17} + c\theta_{15}s\theta_{17})s\theta_{RL}] - s\theta_{11}s\theta_{13}c\theta_{RL}$$

$$a_x = [c\theta_7c\theta_9c\theta_{11}c\theta_{13} + s\theta_7s\theta_9c\theta_{11}c\theta_{13} + c\theta_7s\theta_9s\theta_{13} - s\theta_7c\theta_9s\theta_{13}] \quad (3.50)$$

$$[-c\theta_{15}s\theta_{17} - s\theta_{15}c\theta_{17}] - [c\theta_7c\theta_9s\theta_{11} + s\theta_7s\theta_9c\theta_{11}]$$

$$[-s\theta_{15}s\theta_{17} + c\theta_{15}c\theta_{17}]$$

$$a_y = [c\theta_7c\theta_9c\theta_{11}c\theta_{13} - s\theta_7s\theta_9c\theta_{11}c\theta_{13} - c\theta_7s\theta_9s\theta_{13} + s\theta_7c\theta_9s\theta_{13}] \quad (3.51)$$

$$[-c\theta_{15}s\theta_{17} - s\theta_{15}c\theta_{17}] - [s\theta_7c\theta_9s\theta_{11} - c\theta_7s\theta_9c\theta_{11}]$$

$$[-s\theta_{15}s\theta_{17} + c\theta_{15}c\theta_{17}]$$

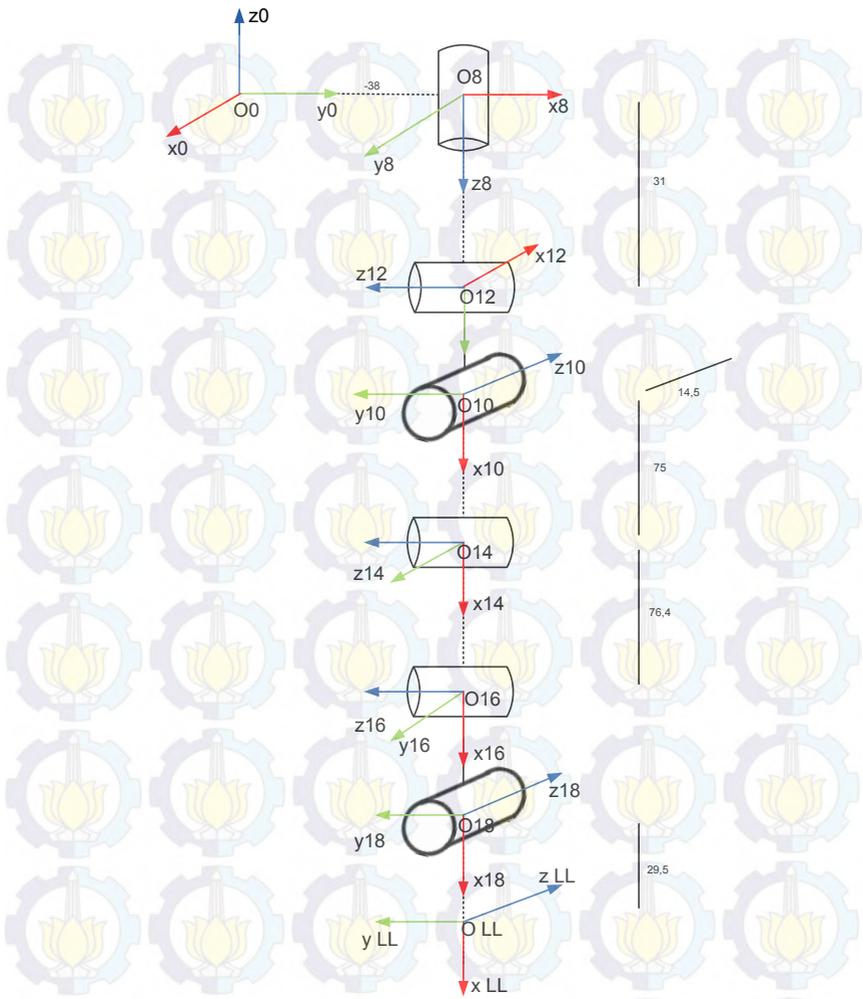
$$a_z = s\theta_{11}c\theta_{13} [-c\theta_{15}s\theta_{17} - s\theta_{15}c\theta_{17}] + c\theta_{11} [-s\theta_{15}s\theta_{17} + c\theta_{15}c\theta_{17}] \quad (3.52)$$

$$\begin{aligned}
p_x = & [c\theta_7c\theta_9c\theta_{11}c\theta_{13} + s\theta_7s\theta_9c\theta_{11}c\theta_{13} + c\theta_7s\theta_{11}c\theta_{13} - s\theta_7c\theta_9c\theta_{13}] \\
& [29,5(c\theta_{15}c\theta_{17} - s\theta_{15}s\theta_{17})c\theta_{RL} + 76,4c\theta_{15}] - \\
& [c\theta_7c\theta_9s\theta_{11} + s\theta_7s\theta_9s\theta_{11}] \\
& [29,5(s\theta_{15}c\theta_{17} + c\theta_{15}s\theta_{17})c\theta_{RL} + 76,4s\theta_{15}] - 29,5 \\
& [c\theta_7c\theta_9c\theta_{11}s\theta_{13} + s\theta_7s\theta_9c\theta_{11}s\theta_{13} - c\theta_7s\theta_9c\theta_{13} + s\theta_7c\theta_9c\theta_{13}]s\theta_{RL} \\
& + \left[(c\theta_7c\theta_9 + s\theta_7s\theta_9)(75c\theta_{11}c\theta_{13} - 14,5s\theta_{11}) + 75c\theta_7s\theta_9s\theta_{13} \right] \\
& \left[-75s\theta_7s\theta_9s\theta_{13} + 38c\theta_7 \right]
\end{aligned} \tag{3.53}$$

$$\begin{aligned}
p_y = & [s\theta_7c\theta_9c\theta_{11}c\theta_{13} - c\theta_7s\theta_9c\theta_{11}c\theta_{13} - s\theta_7s\theta_9s\theta_{13} + c\theta_7c\theta_9s\theta_{13}] \\
& [29,5(c\theta_{15}c\theta_{17} - s\theta_{15}s\theta_{17})c\theta_{RL} + 76,4c\theta_{15}] + \\
& [-s\theta_7c\theta_9c\theta_{11} + c\theta_7s\theta_9c\theta_{11}] \\
& [29,5(s\theta_{15}c\theta_{17} + c\theta_{15}s\theta_{17})c\theta_{RL} + 76,4s\theta_{15}] - 29,5 \\
& [s\theta_7c\theta_9c\theta_{11}s\theta_{13} - c\theta_7s\theta_9c\theta_{11}s\theta_{13}]s\theta_{RL} + \\
& [-s\theta_7s\theta_9c\theta_{13} - c\theta_7c\theta_9c\theta_{13}] \\
& \left[(s\theta_7c\theta_9 - c\theta_7c\theta_9)(75c\theta_{11}c\theta_{13} - 14,5s\theta_{11}) + \right. \\
& \left. 75s\theta_7s\theta_9s\theta_{13} + 75c\theta_7c\theta_9s\theta_{13} + 38c\theta_7 \right]
\end{aligned} \tag{3.54}$$

$$\begin{aligned}
p_z = & [s\theta_{11}c\theta_{13}] [29,5(c\theta_{15}c\theta_{17} - s\theta_{15}s\theta_{17})c\theta_{RL} + 76,4c\theta_{15}] \\
& + c\theta_{11} [29,5(s\theta_{15}c\theta_{17} + c\theta_{15}s\theta_{17})c\theta_{RL} + 76,4s\theta_{15}] - \\
& 29,5 [s\theta_{11}s\theta_{13}] s\theta_{RL} + 75 [s\theta_{11}s\theta_{13}] + 14,5c\theta_{11} - 31
\end{aligned} \tag{3.55}$$

Selanjutnya, struktur *joint* kaki kiri robot Bioloid dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Konfigurasi *joint* kaki kiri robot Bioloid

Dari konfigurasi *joint* kaki kiri dapat diperoleh parameter D-H yang terdapat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Parameter *link* dari kaki kiri robot Bioloid

Link ke- i	a_i (mm)	α_i (°)	d_i (mm)	Θ_i (°)
1	38	180	0	0
2	0	-90	31	-58~30
3	0	-90	0	-36~0
4	75	90	14,5	-124~21
5	76,4	0	0	-38~0
6	0	-90	0	-16~26
7	29,5	0	0	-10~21

Parameter D-H yang telah diperoleh akan menjadi *input* transformasi homogen yang dapat dilihat pada Persamaan 3.56 sampai dengan Persamaan 3.74.

$$A_8 = \begin{bmatrix} c\theta_8 & s\theta_8 & 0 & -38c\theta_8 \\ s\theta_8 & -c\theta_8 & 0 & -38s\theta_8 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

$$A_{10} = \begin{bmatrix} c\theta_{10} & 0 & s\theta_{10} & 0 \\ s\theta_{10} & 0 & -c\theta_{10} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 31 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} c\theta_{12} & 0 & -s\theta_{12} & 0 \\ s\theta_{12} & 0 & c\theta_{12} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

$$A_{14} = \begin{bmatrix} c\theta_{14} & 0 & s\theta_{14} & -75c\theta_{14} \\ s\theta_{14} & 0 & -c\theta_{14} & -75s\theta_{14} \\ 0 & 1 & 0 & 14,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

$$A_{16} = \begin{bmatrix} c\theta_{16} & -s\theta_{16} & 0 & -76,4c\theta_{16} \\ s\theta_{16} & c\theta_{16} & 0 & -76,4s\theta_{16} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

$$A_{18} = \begin{bmatrix} c\theta_{18} & 0 & -s\theta_{18} & 0 \\ s\theta_{18} & 0 & c\theta_{18} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

$$A_{LL} = \begin{bmatrix} c\theta_{LL} & -s\theta_{LL} & 0 & -29,5c\theta_{LL} \\ s\theta_{LL} & c\theta_{LL} & 0 & -29,5s\theta_{LL} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

$$T_0^{LL} = (A_8)(A_{10})(A_{12})(A_{14})(A_{16})(A_{18})(A_{LL}) \quad (3.63)$$

$$\begin{aligned} n_x = & [(c\theta_8 c\theta_{10} + s\theta_8 s\theta_{10})c\theta_{12}c\theta_{14} - (c\theta_8 s\theta_{10} - s\theta_8 c\theta_{10})s\theta_{14}] \\ & [(c\theta_{16}c\theta_{18} - s\theta_{16}s\theta_{18})c\theta_{LL}] - [(c\theta_8 c\theta_{10} + s\theta_8 s\theta_{10})s\theta_{12}] \\ & [(s\theta_{16}c\theta_{18} + c\theta_{16}s\theta_{18})c\theta_{LL}] \\ & - [(c\theta_8 c\theta_{10} + s\theta_8 s\theta_{10})c\theta_{12}s\theta_{14} - (c\theta_8 s\theta_{10} - s\theta_8 c\theta_{10})c\theta_{14}]s\theta_{LL} \end{aligned} \quad (3.64)$$

$$\begin{aligned} n_y = & [(s\theta_8 c\theta_{10} - c\theta_8 s\theta_{10})c\theta_{12}c\theta_{14} - (s\theta_8 s\theta_{10} + c\theta_8 c\theta_{10})s\theta_{14}] \\ & [(c\theta_{16}c\theta_{18} - s\theta_{16}s\theta_{18})c\theta_{LL}] \\ & - [(s\theta_8 c\theta_{10} - c\theta_8 s\theta_{10})s\theta_{12}][[(s\theta_{16}c\theta_{18} + c\theta_{16}s\theta_{18})c\theta_{LL}] \\ & - [(s\theta_8 c\theta_{10} - c\theta_8 s\theta_{10})c\theta_{12}s\theta_{14} - (s\theta_8 s\theta_{10} + c\theta_8 c\theta_{10})c\theta_{14}]s\theta_{LL} \end{aligned} \quad (3.65)$$

$$\begin{aligned} n_z = & -[s\theta_{12}c\theta_{14}][[(c\theta_{16}c\theta_{18} - s\theta_{16}s\theta_{18})c\theta_{LL}] - \\ & c\theta_{12}[(s\theta_{16}c\theta_{18} + c\theta_{16}s\theta_{18})c\theta_{LL}] + s\theta_{12}s\theta_{14}s\theta_{LL} \end{aligned} \quad (3.66)$$

$$\begin{aligned}
s_x = & -\left[(c\theta_8 c\theta_{10} + s\theta_8 s\theta_{10}) c\theta_{12} c\theta_{14} - (c\theta_8 s\theta_{10} - s\theta_8 c\theta_{10}) s\theta_{14} \right] \\
& \left[(c\theta_{16} c\theta_{18} - s\theta_{16} s\theta_{18}) s\theta_{LL} \right] + \left[(c\theta_8 c\theta_{10} + s\theta_8 s\theta_{10}) s\theta_{12} \right] \\
& \left[(s\theta_{16} c\theta_{18} + c\theta_{16} s\theta_{18}) s\theta_{LL} \right] \\
& - \left[(c\theta_8 c\theta_{10} + s\theta_8 s\theta_{10}) c\theta_{12} s\theta_{14} - (c\theta_8 s\theta_{10} - s\theta_8 c\theta_{10}) c\theta_{14} \right] c\theta_{LL}
\end{aligned} \tag{3.66}$$

$$\begin{aligned}
s_y = & -\left[(s\theta_8 c\theta_{10} - s\theta_8 s\theta_{10}) c\theta_{12} c\theta_{14} - (s\theta_8 s\theta_{10} + c\theta_8 c\theta_{10}) s\theta_{14} \right] \\
& \left[(c\theta_{16} c\theta_{18} - s\theta_{16} s\theta_{18}) s\theta_{LL} \right] + \left[(s\theta_8 c\theta_{10} - c\theta_8 s\theta_{10}) s\theta_{12} \right] \\
& \left[(s\theta_{16} c\theta_{18} + c\theta_{16} s\theta_{18}) s\theta_{LL} \right] \\
& - \left[(s\theta_8 c\theta_{10} - c\theta_8 s\theta_{10}) c\theta_{12} s\theta_{14} - (s\theta_8 s\theta_{10} + c\theta_8 c\theta_{10}) c\theta_{14} \right] c\theta_{LL}
\end{aligned} \tag{3.67}$$

$$\begin{aligned}
s_z = & s\theta_{12} c\theta_{14} \left[(c\theta_{16} c\theta_{18} - s\theta_{16} s\theta_{18}) s\theta_{LL} \right] + \\
& c\theta_{12} \left[(s\theta_{16} c\theta_{18} + c\theta_{16} s\theta_{18}) s\theta_{LL} \right] + s\theta_{12} s\theta_{14} c\theta_{LL}
\end{aligned} \tag{3.68}$$

$$\begin{aligned}
a_x = & -\left[(c\theta_8 c\theta_{10} + s\theta_8 s\theta_{10}) c\theta_{12} c\theta_{14} - (c\theta_8 s\theta_{10} - s\theta_8 c\theta_{10}) s\theta_{14} \right] \\
& \left[c\theta_{16} s\theta_{18} + s\theta_{16} c\theta_{18} \right] + \left[(c\theta_8 c\theta_{10} + s\theta_8 s\theta_{10}) s\theta_{12} \right] \\
& \left[s\theta_{16} s\theta_{18} - c\theta_{16} c\theta_{18} \right]
\end{aligned} \tag{3.69}$$

$$\begin{aligned}
 a_y = & -\left[(s\theta_8 c\theta_{10} - c\theta_8 s\theta_{10}) c\theta_{12} c\theta_{14} - (s\theta_8 s\theta_{10} + s\theta_8 c\theta_{10}) s\theta_{14} \right] \\
 & \left[c\theta_{16} s\theta_{18} + s\theta_{16} c\theta_{18} \right] + \left[(s\theta_8 c\theta_{10} - c\theta_8 s\theta_{10}) s\theta_{12} \right] \\
 & \left[s\theta_{16} s\theta_{18} - c\theta_{16} c\theta_{18} \right]
 \end{aligned} \tag{3.70}$$

$$\begin{aligned}
 a_z = & s\theta_{12} c\theta_{14} \left[c\theta_{16} s\theta_{18} + s\theta_{16} c\theta_{18} \right] + c\theta_{12} \left[s\theta_{16} s\theta_{18} - c\theta_{16} c\theta_{18} \right]
 \end{aligned} \tag{3.71}$$

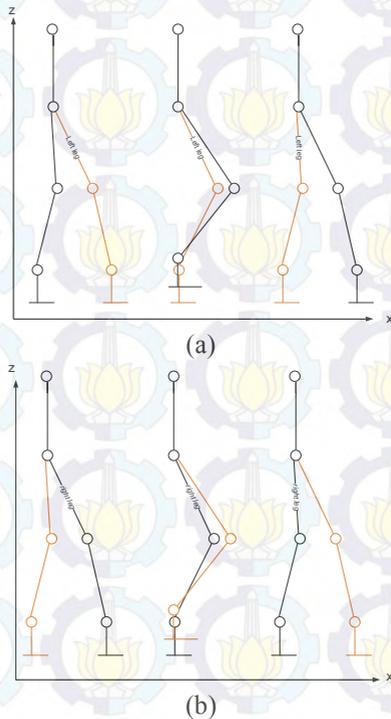
$$\begin{aligned}
 p_x = & \left[(c\theta_8 c\theta_{10} + s\theta_8 s\theta_{10}) c\theta_{12} c\theta_{14} - (c\theta_8 s\theta_{10} - s\theta_8 c\theta_{10}) s\theta_{14} \right] \\
 & \left[-29,5 (c\theta_{16} c\theta_{18} + s\theta_{16} s\theta_{18}) c\theta_{LL} - 76,4 c\theta_{16} \right] \\
 & - \left[(c\theta_8 c\theta_{10} + s\theta_8 s\theta_{10}) s\theta_{12} \right] \\
 & \left[-29,5 (s\theta_{16} c\theta_{18} + c\theta_{16} s\theta_{18}) c\theta_{LL} - 76,4 c\theta_{16} \right] + 29,5 \\
 & \left[(c\theta_8 c\theta_{10} + s\theta_8 s\theta_{10}) c\theta_{12} s\theta_{14} + (c\theta_8 s\theta_{10} - s\theta_8 c\theta_{10}) c\theta_{14} \right] s\theta_{LL} \\
 & - (c\theta_8 c\theta_{10} + s\theta_8 s\theta_{10}) (75 c\theta_{12} c\theta_{14} + 14,5 s\theta_{12}) + \\
 & 75 (c\theta_8 s\theta_{10} - s\theta_8 c\theta_{10}) s\theta_{14} - 38 c\theta_8
 \end{aligned} \tag{3.72}$$

$$\begin{aligned}
 p_y = & \left[(s\theta_8 c\theta_{10} - c\theta_8 s\theta_{10}) c\theta_{12} c\theta_{14} - (s\theta_8 s\theta_{10} + c\theta_8 c\theta_{10}) s\theta_{14} \right] \\
 & \left[-29,5 (c\theta_{16} c\theta_{18} + s\theta_{16} s\theta_{18}) c\theta_{LL} - 76,4 c\theta_{16} \right] \\
 & - \left[(s\theta_8 c\theta_{10} - c\theta_8 s\theta_{10}) s\theta_{12} \right] \\
 & \left[-29,5 (s\theta_{16} c\theta_{18} + c\theta_{16} s\theta_{18}) c\theta_{LL} - 76,4 s\theta_{16} \right] + 29,5 \\
 & \left[(s\theta_8 c\theta_{10} - c\theta_8 s\theta_{10}) c\theta_{12} s\theta_{14} + (s\theta_8 s\theta_{10} + c\theta_8 c\theta_{10}) c\theta_{14} \right] s\theta_{LL} \\
 & - (s\theta_8 c\theta_{10} - c\theta_8 s\theta_{10}) (75 c\theta_{12} c\theta_{14} + 14,5 s\theta_{12}) + \\
 & 75 (s\theta_8 s\theta_{10} + c\theta_8 c\theta_{10}) s\theta_{14} - 38 c\theta_8
 \end{aligned} \tag{3.73}$$

$$\begin{aligned}
 p_z = & -s\theta_{12}c\theta_{14} [-29,5(c\theta_{16}c\theta_{18} + s\theta_{16}s\theta_{18})c\theta_{LL} - 76,4c\theta_{12}] \\
 & - c\theta_{12} [-29,5(s\theta_{16}c\theta_{18} + c\theta_{16}s\theta_{18})c\theta_{LL} - 76,4s\theta_{16}] \\
 & - 29,5s\theta_{12}s\theta_{14}s\theta_{LL} + 75s\theta_{12}c\theta_{14} - 14,5c\theta_{12} - 31
 \end{aligned}
 \tag{3.74}$$

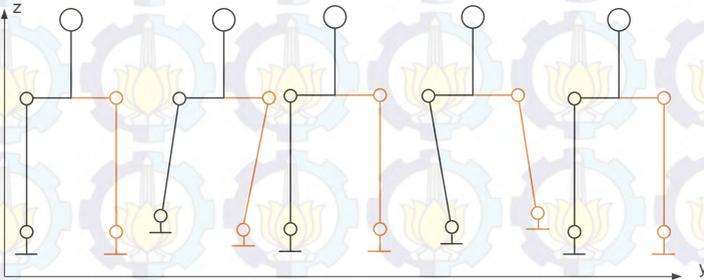
3.3.3 Perencanaan Pola Berjalan Robot Bioloid

Penentuan titik berat pada tubuh robot humanoid saat berjalan akan mempengaruhi keseimbangan. Pada Gambar 3.7 dapat dilihat bahwa terdapat kondisi *single support phase* dan kondisi *double support phase* saat ditinjau terhadap sumbu x. Pada kondisi *single support phase* titik berat robot terletak pada tengah telapak kaki sedangkan untuk kondisi *double support phase* titik berat terletak di antara 2 kaki robot.



Gambar 3.7 Perencanaan pola berjalan robot Bioloid dengan acuan sumbu x

Selain itu, perencanaan pola berjalan robot juga ditinjau dari sumbu y karena dari perencanaan tersebut dapat diketahui sudut dari sendi yang berfungsi untuk menjadi titik berat saat melangkah. Perencanaan pola berjalan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Perencanaan pola berjalan robot Bioloid dengan acuan sumbu $-y$

3.3.4 Inverse Kinematics

Pendekatan berbasis geometris pada *inverse kinematics* bertujuan untuk mendapatkan sudut pada *joint* robot. Selain itu, analisis *inverse kinematics* berfungsi untuk mendapatkan sudut dari *joint* yang telah direncanakan saat robot Bioloid saat implementasi *walking gait*. Pada tahap pertama, analisis *inverse kinematics* dilakukan pada kaki kanan robot Bioloid yang ditinjau dari sumbu x . Sudut yang akan dicari adalah Θ_{11} pada *hip*, Θ_{13} pada *knee* dan Θ_{15} pada *ankle*.

Pada Gambar 3.9 dapat dilihat bahwa terdapat titik koordinat pada *end effector* telah direncanakan, hal ini bertujuan untuk memudahkan analisis *inverse kinematics*. Selain itu, terdapat pula parameter jarak antar *link* dalam satuan millimeter (mm). Solusi *inverse kinematics* pada tiap *joint* saat melangkah ke depan hanya satu karena terdapat keterbatasan *workspace*. Perencanaan posisi untuk mendapatkan sudut saat melangkah dimulai dengan mengatur posisi dari *joint* 11, 13, 15 yang terletak pada kaki kanan.

Perencanaan *inverse kinematics* pada robot Bioloid dengan pendekatan geometris pada kaki kanan saat melangkah ke depan dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Perencanaan *inverse kinematics* kaki kanan robot Bioloid terhadap sumbu x
 Perhitungan *inverse kinematics* pada kaki kanan dapat dilihat pada Persamaan 3.75-3.77.

$$\theta_{11} = \sin^{-1}\left(\frac{25}{75}\right) = 19,47^\circ (-) \quad (3.75)$$

$$\theta_{13} \Rightarrow \theta_\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{25}{75}\right) = 70,52^\circ$$

$$\theta_\beta = \sin^{-1}\left(\frac{5}{75}\right) = 3,82^\circ \quad (3.76)$$

$$\theta_{13} = 180^\circ - 90^\circ - 70,52^\circ - 3,82^\circ = 15,66^\circ (+)$$

$$\theta_{15} \Rightarrow \theta_\gamma = \cos^{-1}\left(\frac{5}{75}\right) = 86,17^\circ \quad (3.77)$$

$$\theta_{15} = 180^\circ - 90^\circ - 86,17^\circ = 3,83^\circ (+)$$

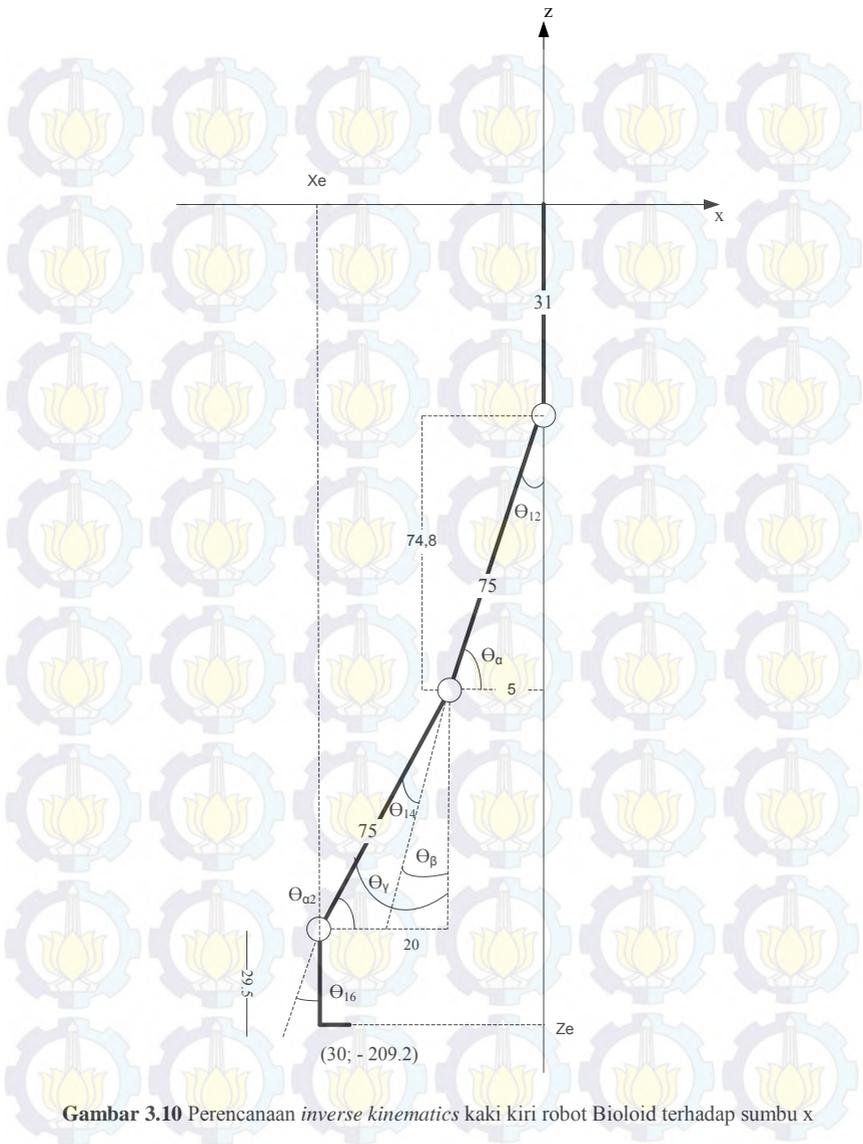
Konfigurasi putaran sendi 11, 13 dan 15 yang terletak pada kaki kanan dapat dilihat pada Tabel 3.5 yang berfungsi sebagai acuan konfigurasi putaran sudut pada robot Bioloid saat kaki kanan melangkah ke depan.

Tabel 3.5 Konfigurasi putaran sendi (*joint*) 11, 13 dan 15 kaki kanan

Sendi (<i>Joint</i>)	konfigurasi Putaran
11 (<i>Hip</i>)	-
13 (<i>Knee</i>)	+
15 (<i>Ankle</i>)	+

Tahap berikutnya, melakukan analisis *inverse kinematics* pada kaki kiri yang direncanakan menjadi titik berat ketika kaki kanan akan mulai melangkah ke depan. *Joint* pada kaki kiri yang akan digunakan untuk melangkah adalah *joint* 12 yang terdapat pada *hip* (pangkal paha), *joint* 14 pada *knee* (lutut) dan *joint* 16 pada *ankle* (mata kaki).

Perencanaan analisis *inverse kinematics* kaki kiri dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Perencanaan *inverse kinematics* kaki kiri robot Bioid terhadap sumbu x

Solusi *inverse kinematics* kaki kiri robot Bioloid dapat dilihat pada Persamaan 3.78 - 3.80.

$$\theta_{12} = \sin^{-1}\left(\frac{10}{75}\right) = 7,6^{\circ} (-) \quad (3.78)$$

$$\theta_{14} \Rightarrow \theta_{\alpha} = \cos^{-1}\left(\frac{10}{75}\right) = 82,33^{\circ}$$

$$\theta_{\beta} = 180^{\circ} - 90^{\circ} - 82,33^{\circ} = 7,67^{\circ}$$

$$\theta_{\gamma} = \sin^{-1}\left(\frac{20}{75}\right) = 15,46^{\circ} \quad (3.79)$$

$$\theta_{14} = 15,46^{\circ} - 7,67^{\circ} = 7,79(-)$$

$$\theta_{16} \Rightarrow \theta_{\alpha 2} = \cos^{-1}\left(\frac{20}{75}\right) = 74,53^{\circ} \quad (3.80)$$

$$\theta_{16} = 180^{\circ} - 90^{\circ} - 74,53^{\circ} = 15,47^{\circ} (+)$$

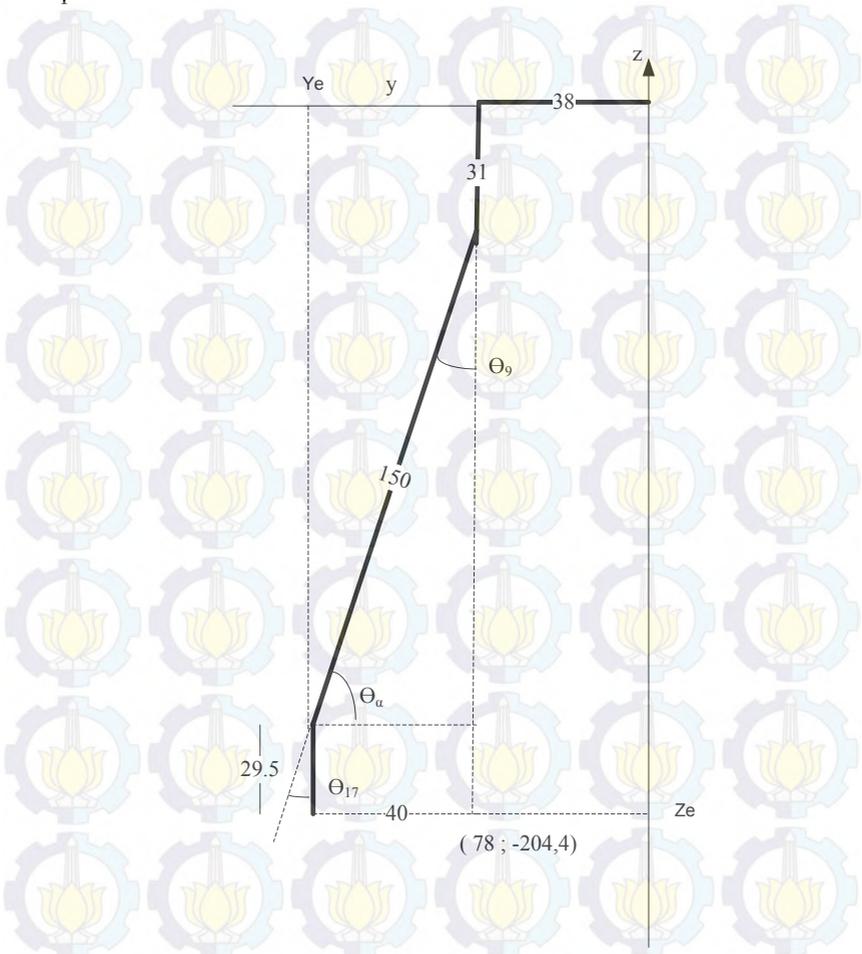
Konfigurasi putaran sendi pada kaki kiri saat di tinjau pada sumbu x dapat dilihat pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Konfigurasi putaran sendi (*joint*) 12, 14 dan 16 kaki kiri

Sendi (<i>Joint</i>)	konfigurasi Putaran
12 (<i>Hip</i>)	-
14 (<i>Knee</i>)	-
16 (<i>Ankle</i>)	+

Tahap selanjutnya, melakukan analisis *inverse kinematics* pada kaki robot Bioloid dengan acuan sumbu y. Perhitungan ini berfungsi untuk mendapatkan kemiringan sudut pada *hip* dan *ankle* yang dapat mempengaruhi keseimbangan robot saat berjalan. Sudut yang akan menjadi acuan ialah sudut pada *joint* 9, 10, 17 dan 18. Perencanaan

inverse kinematics kaki kanan saat ditinjau pada sumbu y dapat dilihat pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Perencanaan *inverse kinematics* kaki kanan robot Bioloid terhadap sumbu y

Dari Gambar 3.11 dapat diperoleh solusi *inverse kinematics* yang terdapat pada Persamaan 3.81 dan 3.82.

$$\theta_9 = \sin^{-1}\left(\frac{40}{150}\right) = 15,46^\circ (+) \quad (3.81)$$

$$\theta_{17} \Rightarrow \theta_\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{40}{150}\right) = 74,5^\circ \quad (3.82)$$

$$\theta_{17} = 180^\circ - 90^\circ - 74,5^\circ = 15,5^\circ (-)$$

Konfigurasi putaran *joint* saat solusi *inverse kinematics* dibutuhkan agar saat simulasi maupun implementasi tidak mengalami kesulitan dalam menentukan putaran dari tiap *joint*. Untuk putaran *joint* 9 dan *joint* 17 dapat dilihat pada Tabel 3.7.

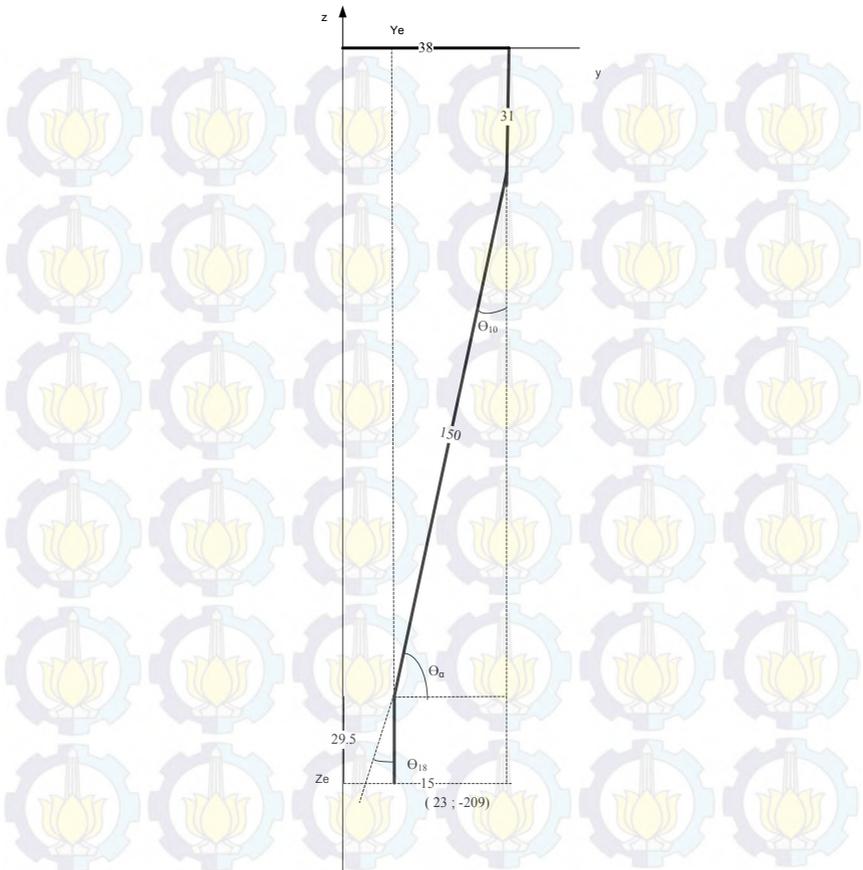
Tabel 3.7 Konfigurasi putaran sendi (*joint*) 9 dan 17 kaki kanan

Sendi (<i>Joint</i>)	Konfigurasi Putaran
9 (<i>Hip</i>)	+
17 (<i>ankle</i>)	-

Berikutnya, analisis *inverse kinematics* pada kaki kiri robot Bioloid dengan acuan sumbu y, z. Pada kondisi ini, kaki kiri akan miring mengikuti arah kemiringan dari kaki kanan namun tetap menjadi titik berat saat kaki kanan melangkah. Oleh karena itu sudut kemiringan kaki kiri yang direpresentasikan oleh *joint* 10 di rencanakan lebih pendek setengah dari jarak kemiringan kaki kanan.

Untuk *joint* 18 pada kaki kiri di rencanakan tetap tegak lurus dengan bidang datar karena berfungsi untuk menjaga keseimbangan badan robot. Proses analisis *inverse kinematics* yang dilakukan pada kaki merupakan perancangan gerak utama robot Bioloid dalam melakukan *walking gait*. Dari perancangan *walking gait* tersebut akan diperoleh sudut dari *joint* aktif yang akan digunakan sebagai *input* untuk proses interpolasi polinomial orde 3 sehingga akan diperoleh rencana gerak secara keseluruhan. Hasil dari interpolasi polinomial merupakan trayektori sudut dari proses *walking gait* robot Bioloid secara keseluruhan.

Perencanaan *inverse kinematics* kaki kiri pada *joint* 10 dan 18 dengan acuan sumbu y, z dapat dilihat pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Perencanaan *inverse kinematics* kaki kiri robot Bioloid terhadap sumbu y

Solusi *inverse kinematics* pada kaki kiri saat ditinjau pada sumbu y dapat dilihat pada Persamaan 3.83 dan 3.84.

$$\theta_{10} = \sin^{-1}\left(\frac{15}{150}\right) = 5,73^\circ (+) \tag{3.83}$$

$$\theta_{18} \Rightarrow \theta_{\alpha} = \cos^{-1}\left(\frac{15}{150}\right) = 84,26^{\circ} \quad (3.84)$$

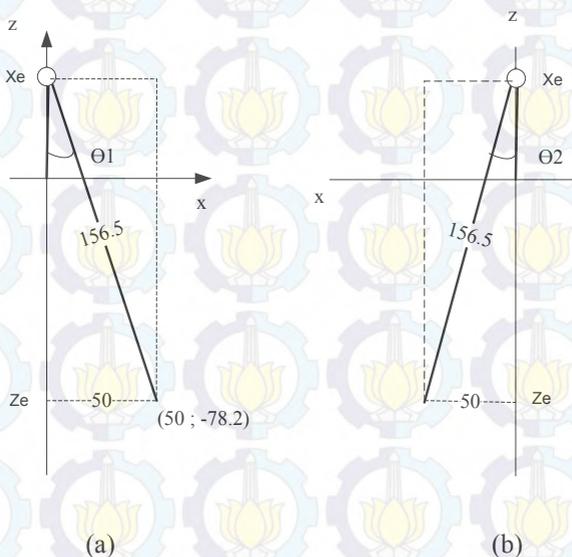
$$\theta_{18} = 180^{\circ} - 90^{\circ} - 84,26^{\circ} = 5,74^{\circ} (-)$$

Untuk konfigurasi putaran *joint* 10 dan *joint* 18 dapat dilihat pada Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Konfigurasi putaran sendi (*joint*) 10 dan 18 kaki kanan

Sendi (<i>Joint</i>)	Konfigurasi Putaran
10 (<i>Hip</i>)	+
18 (<i>ankle</i>)	-

Selain itu, analisis *inverse kinematics* juga dilakukan pada tangan robot Bioloid. Perencanaan gerak pada tangan fokus pada gerakan inti saat tangan mengayun ke depan dan ke belakang. Perencanaan gerak pada tangan dapat dilihat pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Perencanaan *inverse kinematics* tangan kanan dan tangan kiri robot Bioloid terhadap sumbu x

Solusi *inverse kinematics* dari tangan robot Bioloid terdapat pada Persamaan 3.85 dan 3.86.

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{50}{156.5}\right) = 18,63^\circ$$

$$\theta_1 = 90^\circ - 18.63^\circ = 71,37^\circ (-) \quad (3.85)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{50}{156.5}\right) = 18,63^\circ$$

$$\theta_2 = 90^\circ + 18.63^\circ = 108,63^\circ (+) \quad (3.86)$$

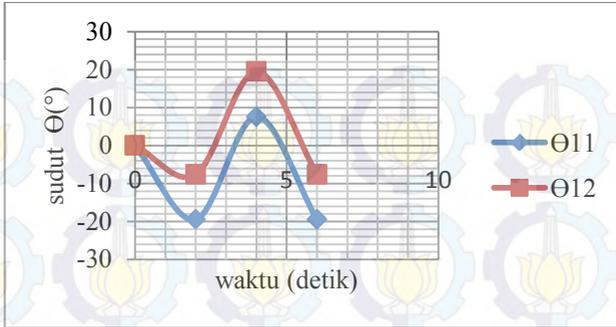
Analisis *inverse kinematics* pada tangan hanya fokus pada 1 *joint* yang berfungsi untuk mengayunkan tangan, yaitu *joint* 1 dan 2 pada *shoulder* Θ_1 untuk tangan kanan dan Θ_2 untuk tangan kiri.

Solusi *inverse kinematics* yang telah didapatkan maka dapat di rencanakan pola berjalan dari robot Bioloid. Perencanaan tiap *joint* akan di notasikan dalam bentuk sudut. Perencanaan trayektori akan mencakup dari tangan dan kaki pada robot Bioloid.

Trayektori sudut pada *joint* 11 dan *joint* 12 yang terletak pada *hip* kaki kanan dan kaki kiri dapat dilihat pada Tabel 3.9. Ilustrasi pada rencana pergerakan *joint* 11 dan 12 terletak pada Gambar 3.14 dengan satuan waktu detik.

Tabel 3.9 Perencanaan pola berjalan *joint* 11 dan *joint* 12

Waktu (detik)	Sudut kaki kanan (<i>joint</i> 11)($^\circ$)	Sudut kaki kiri (<i>joint</i> 12)($^\circ$)
0	0	0
2	-19,47	-7,6
4	7,6	19,47
6	-19,47	-7,6



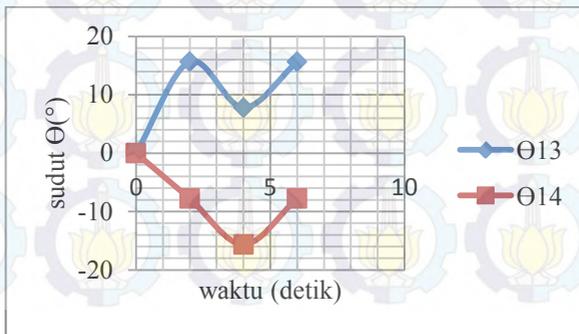
Gambar 3.14 Grafik perencanaan gerak pada *hip* robot Bioloid

Selanjutnya, perencanaan trayektori pada *joint* 13 dan 14 yang terletak pada *knee*. Perencanaan *joint* 13 dan 14 merupakan *joint* yang akan digunakan untuk melangkah.

Dari hasil perencanaan *inverse kinematics* maka hasil sudut yang di peroleh dapat di masukkan kedalam perencanaan berjalan robot Bioloid dengan *sampling* (cacahan) waktu yang telah di rencanakan.

Tabel 3.10 Perencanaan pola berjalan *joint* 13 dan *joint* 14

Waktu (detik)	Sudut kaki kanan (<i>joint</i> 13)(°)	Sudut kaki kiri (<i>joint</i> 14)(°)
0	0	0
2	15,66	-7,79
4	7,79	-15,66
6	15,66	-7,79

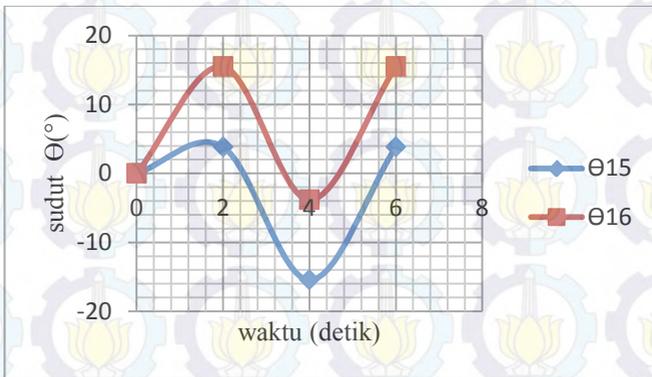


Gambar 3.15 Grafik perencanaan gerak pada *knee* robot Bioloid

Perencanaan trayektori pada *ankle* yang terdapat pada *joint* 15 dan 16 dapat dilihat pada Tabel 3.11. dan Gambar 3.16.

Tabel 3.11 Perencanaan pola berjalan *joint* 15 dan *joint* 16

Waktu (detik)	Sudut kaki kanan (<i>joint</i> 15)(°)	Sudut kaki kiri (<i>joint</i> 16)(°)
0	0	0
2	3,83	15,47
4	-15,47	-3,83
6	3,83	15,47

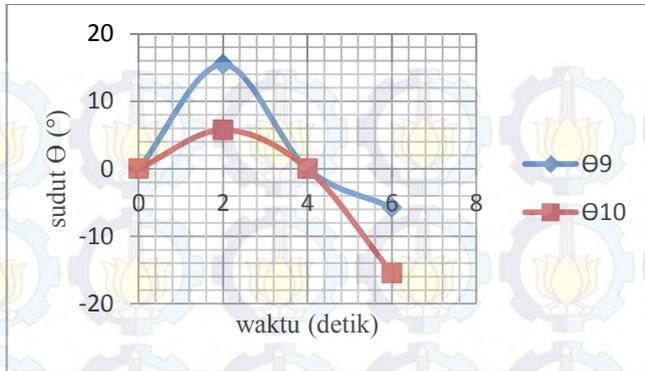


Gambar 3.16 Grafik perencanaan gerak pada *ankle* robot Bioloid

Selanjutnya, perencanaan trayektori pada *hip* dan *ankle* dengan acuan sumbu y, yaitu pada *joint* 9, 10 untuk *hip* dan *joint* 17, 18 untuk *ankle*. Untuk perencanaan trayektori *joint* 9 dan *joint* 10 dapat dilihat pada Tabel 3.12 dan pada Gambar 3.17.

Tabel 3.12 Perencanaan pola berjalan *joint* 9 dan *joint* 10

Waktu (detik)	Sudut kaki kanan (<i>joint</i> 9)(°)	Sudut kaki kiri (<i>joint</i> 10)(°)
0	0	0
2	15,46	5,74
4	0	0
6	-5,74	-15,46

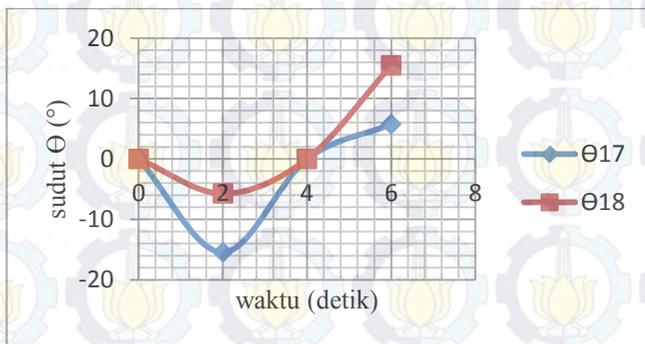


Gambar 3.17 Grafik perencanaan gerak pada *hip* robot Bioloid terhadap sumbu y.

Perencanaan trayektori dalam sudut pada *joint* 17 dan 18 dapat dilihat pada Tabel 3.13 dan pada Gambar 3.18.

Tabel 3.13 Perencanaan pola berjalan *joint* 17 dan *joint* 18

Waktu (detik)	Sudut kaki kanan (<i>joint</i> 17)(°)	Sudut kaki kiri (<i>joint</i> 18)(°)
0	0	0
2	-15,46	-5,74
4	0	0
6	5,74	15,46

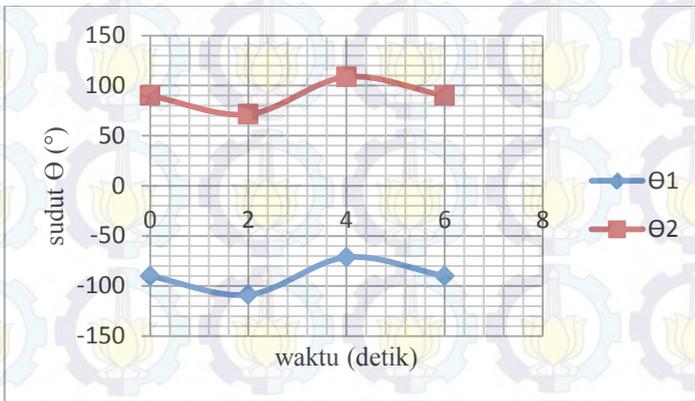


Gambar 3.18 Grafik perencanaan gerak pada *ankle* robot Bioloid terhadap sumbu y

Perancangan trayektori sudut pada tangan kanan dan kiri dapat dilihat pada Tabel 3.14 dan Gambar 3.19.

Tabel 3.14 Perencanaan pola berjalan *joint 1* dan *joint 2*

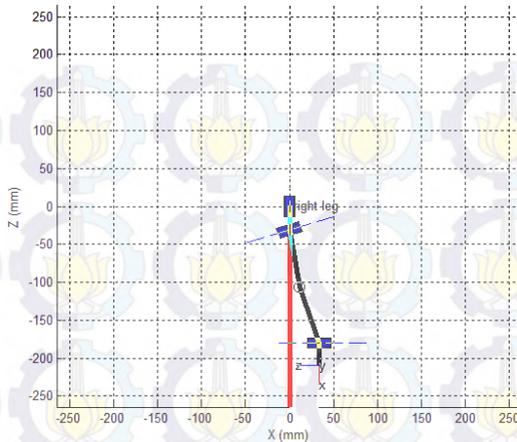
Waktu (detik)	Sudut kaki kanan (<i>joint 1</i>)(°)	Sudut kaki kiri (<i>joint 2</i>)(°)
0	-90	90
2	-108,63	71,37
4	-71,37	108,63
6	-90	90



Gambar 3.19 Grafik perencanaan gerak pada *shoulder* terhadap sumbu x

3.3.5 Perancangan Simulasi

Pada tahap simulasi, parameter sudut yang telah diperoleh dari *inverse kinematics* akan menjadi masukan ke dalam Matlab dengan bantuan *toolbox* Peter E Corke versi 8. Masukan dari simulasi berupa sudut dari masing-masing *joint* pada robot *Bioloid humanoid*. Contohnya dari parameter yang di ambil dari Persamaan 3.75-3.77. sudut yang diperoleh akan menjadi masukan di Matlab. sudut tersebut akan diolah menggunakan *toolbox* robotika buatan dari Peter E corke versi 8. Dari hasil simulasi tersebut, maka akan di peroleh posisi x, y, z dari perencanaan. Hasil desain simulasi perencanaan gerak robot *Bioloid* dapat di lihat pada Gambar 3.20.



Gambar 3.20 Hasil simulasi robot Bioloid pada perencanaan kaki kanan

Dari hasil simulasi tersebut akan di peroleh dari posisi x , y , z yang dapat dilihat pada Tabel 3.15.

Tabel 3.15 posisi *end effector* kaki kanan pada simulasi Matlab

Nilai Θ			Nilai Posisi (mm)		
Θ_{11}	Θ_{13}	Θ_{15}	x	y	z
-19.47	15.66	3.83	33.823	-38	-209.055

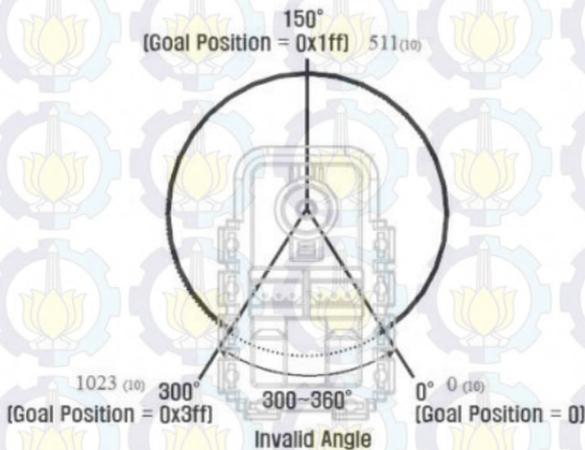
3.3.6 Perancangan Implementasi

Pada tahap implementasi, sudut yang telah diperoleh akan menjadi *input* dengan bantuan *software* Roboplus. Pada *software* ini kontroler yang terpasang pada robot akan dihubungkan dengan menggunakan koneksi serial dengan perantara kabel USB. Ada beberapa fitur pemrograman yang terdapat pada *software* Roboplus, diantaranya memasukkan sudut yang telah dikonversi dalam bentuk desimal yang kedua dengan mengkonversi pergerakan dari robot maka akan diperoleh posisi pada tiap *joint*. Pada tugas akhir ini metode pemrograman yang di gunakan ialah dengan memasukkan sudut. Namun, sudut di masukkan kedalam program harus di ubah terlebih dahulu ke dalam bentuk desimal. Perhitungan konversi sudut ke desimal dapat dilihat pada Persamaan 3.89.

$$Position = \frac{angle^{\circ}}{300^{\circ}} \times 1023 \quad (3.89)$$

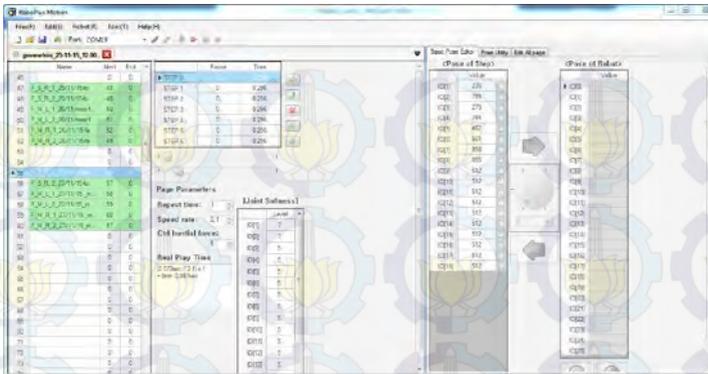
Persamaan tersebut di peroleh dari karakteristik rotasi motor servo yang terdapat pada robot Bioloid. Rotasi dari motor servo yang terdapat pada robot Bioloid ialah dari 0° sampai dengan 300° yang dapat di representasikan pada desimal bernilai 0 sampai 1023. Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa saat desimal bernilai 511 maka sudut pada servo bernilai 150° yakni tepat berada di posisi tengah dari rotasi motor servo. Dari relasi tersebut maka dapat diidentifikasi bahwa perubahan 1 desimal akan bernilai 0,2932°. Namun pada praktiknya perubahan sudut rotasi motor servo tiap 1° terjadi ketika desimal bertambah 4 atau berkurang 4.

Gambar 3.21 merupakan prinsip putaran rotasi dari motor servo sebagai aktuator robot.



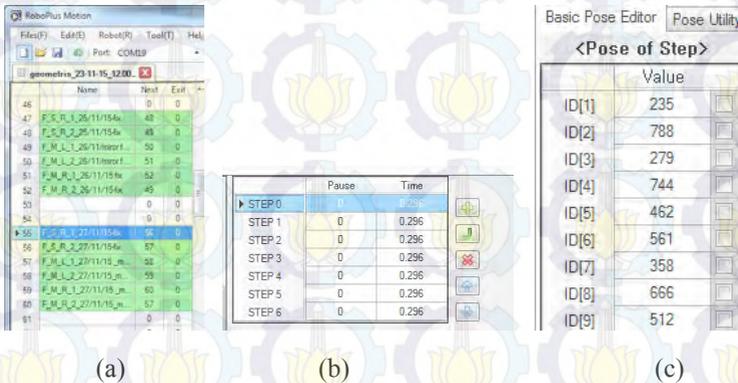
Gambar 3.21 Sudut rotasi dari motor servo robot Bioloid

Berikut ini merupakan tampilan Roboplus Motion yang terdapat beberapa fitur untuk digunakan dalam melakukan pemrograman.



Gambar 3.22 Tampilan RoboPlus Motion

Untuk memasukkan data sudut yang telah di ubah menjadi desimal maka harus dibuat terlebih dahulu suatu *file* yang fungsinya memberikan perintah pada tiap servo motor sesuai dengan sudut yang telah di peroleh.

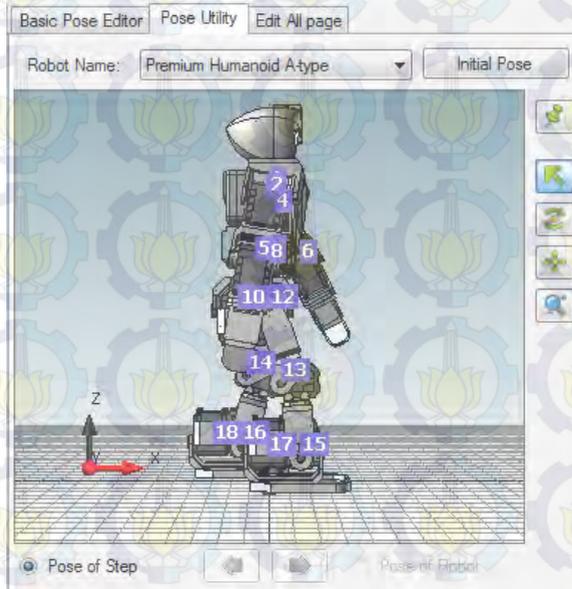


Gambar 3.23 Tampilan dokumen RoboPlus Motion

Gambar 3.23 bagian (a) merupakan tampilan *file* yang merepresentasikan pergerakan dari tiap *joint*. *File* tersebut dapat diisi hingga 225 *file motion* yang membaca posisi servo berupa desimal.. Pada tiap *file* dapat di isi sub *file* yang bisa di sebut *step* seperti tampilan pada Gambar 3.23 bagian (b). Tiap *file* dapat di isi 7 *step* yang akan

dijalankan secara berurutan mulai dari *step* 0 hingga *step* paling akhir sesuai dengan program yang di masukkan. Didalam *step* terdapat sub-bagian yang di sebut *Pose Of Step*. Fungsi dari *Pose Of Step* ialah untuk memberikan *input* berupa posisi pada tiap *joint*. Tiap *joint* memiliki suatu ID *unique* yang di deklarasikan dengan ID[nomor *joint*] seperti yang dapat di lihat pada Gambar 3.23 bagian (c).

Setelah memberikan posisi pada *joint* yang akan digerakkan, pada *software* ini juga dapat dilihat simulasi pergerakan robot yang berada di *Tab Pose Of Step* yaitu *Pose Utility*. Pada *Tab Pose Utility* program yang sudah dibuat dapat di simulasikan dengan output berupa pergerakan robot yang dapat di lihat dengan 3 sudut pandang yang berbeda yaitu terhadap sumbu x, y, z. Hal ini sesuai dengan Gambar 3.24.



Gambar 3.24 Tampilan *Pose Utility* pada RoboPlus Motion



BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS

Bab ini berisi tentang pengujian dan analisis implementasi rancangan pada Matlab, pengujian dan analisis kinematika robot, pengujian dan analisis *walking gait*, lalu akan diimplementasikan robot secara keseluruhan yaitu pada saat robot berjalan maju.

4.1 Pengujian Kinematika Robot

Pengujian kinematika dibagi menjadi beberapa bagian tubuh dari robot Bioloid yaitu tangan kanan, tangan kiri, kaki kanan dan kaki kiri. Pengujian kinematika bertujuan untuk mengetahui hasil desain *forward kinematics* dan *inverse kinematics* dengan cara membandingkan posisi *end effector*.

4.1.1 Pengujian Kinematika Tangan Robot Bioloid

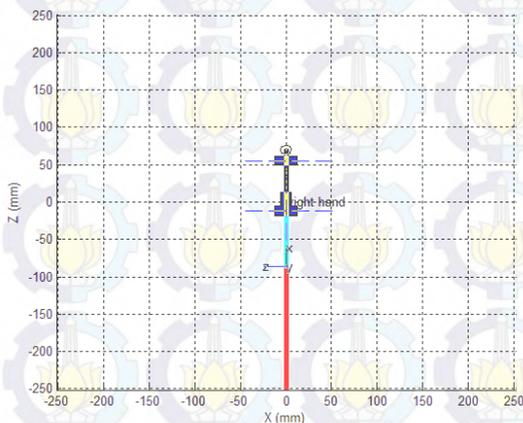
Pengujian kinematika pada tangan di mulai dari tangan kanan robot Bioloid. Pengujian dilakukan dengan cara memberikan *input* berupa posisi *end effector* dalam sumbu x, y dan z kedalam analisis *inverse kinematics*.

Saat robot dalam kondisi berjalan, tangan kanan akan berayun ke depan dan ke belakang sehingga *output* dari pengujian ini adalah sudut *joint 1* yang terletak pada *shoulder* (bahu). Sudut yang diperoleh di persamaan *inverse kinematics* akan menjadi *input* untuk mendapatkan posisi pada pengujian *forward kinematics*. Selanjutnya, akan dibandingkan antara *input* posisi yang telah direncanakan pada pengujian *inverse kinematics* dengan posisi yang di peroleh dari pengujian *forward kinematics*. Pada Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa hasil pengujian *inverse kinematics* dengan *input* berupa posisi dan *output* berupa sudut pada *joint 1*.

Tabel 4.1 Nilai sudut tangan kanan dengan *input* posisi (pengujian *inverse kinematics*)

No	Input (mm)			Output nilai sudut (°)			
	P_x	P_y	P_z	Θ_1	Θ_2	Θ_3	Θ_4
1	0	-25	-86,5	180	-90	0	0
2	-50	-25	-78,2	180	-108,63	0	0
3	50	-25	-78,2	180	-71,37	0	0

Pada Tabel 4.1, dengan data P_x sebesar 0, P_y sebesar -25, P_z sebesar -86,5 merupakan posisi tangan saat kondisi normal *pose* sebelum berjalan, ketika posisi tangan sejajar dengan tubuh. Nilai posisi yang digunakan pada pengujian *inverse kinematics* diperoleh dari konfigurasi *joint* yang telah dijelaskan pada Bab III. Keadaan normal *pose* adalah saat robot dalam keadaan berdiri tegak. Normal *pose* dari robot Bioloid dapat di tentukan sesuai dengan yang di inginkan. Pada Tabel 4.1, sudut Θ_2 yang berada pada *joint* 1 di peroleh sebesar -90° . Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.1.

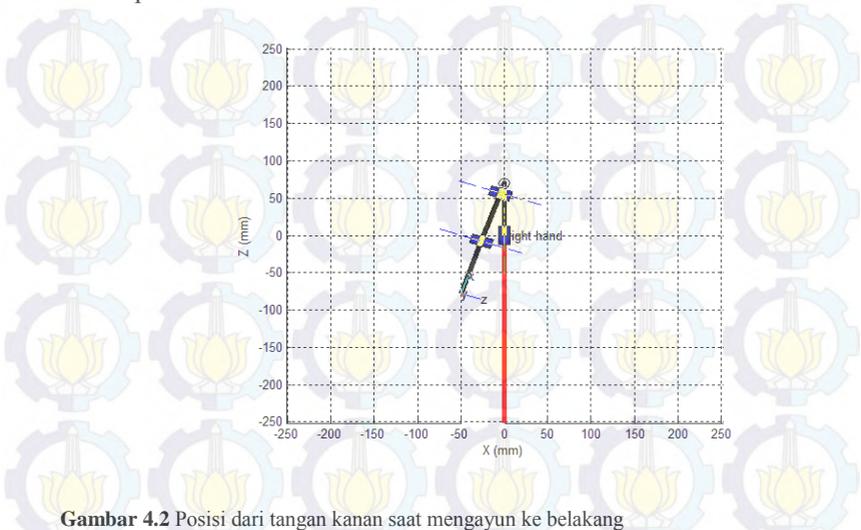


Gambar 4.1 Posisi dari tangan kanan saat kondisi normal

Sudut pada *joint* 1, diatur bernilai -90° saat posisi normal sebelum berjalan karena ketika sudut dari *joint* 1 bernilai 0° posisi tangan berada tegak lurus dengan tubuh robot.

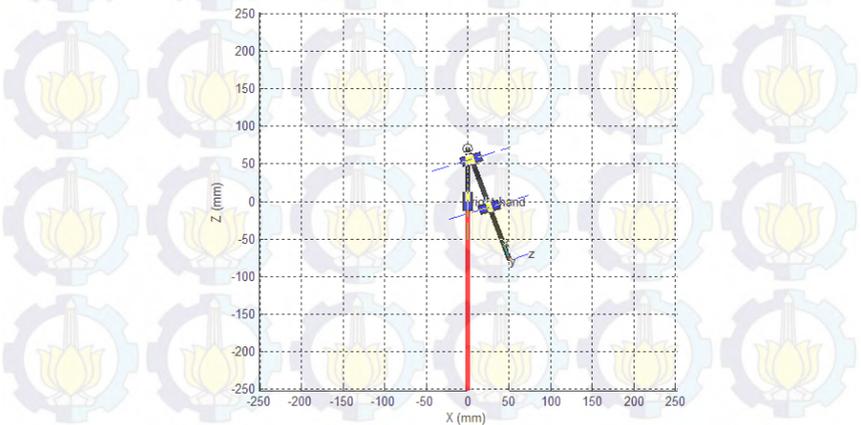
Pada Tabel 4.1 saat P_x bernilai -50, P_y bernilai -25 dan P_z bernilai -78,2, merupakan posisi tangan kanan saat mengayun ke belakang ketika kaki kanan melangkah ke depan dengan sudut pada *joint* 1 diperoleh $-108,63^\circ$ dapat disimpulkan bahwa putaran motor servo dari *joint* 1 mengacu pada sumbu *pitch* hal ini sesuai dengan Gambar 2.3 pada Bab II. Perancangan posisi yang diperoleh dari Tabel 4.1 merupakan hasil dari parameter pada *link* sesuai dengan konfigurasi *joint* dari robot Bioloid.

Ilustrasi saat posisi tangan kanan mengayun ke belakang dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Posisi dari tangan kanan saat mengayun ke belakang

Pada Tabel 4.1 dengan data P_x sebesar 50, P_y sebesar -25 dan P_z sebesar -78,2 merupakan posisi ketika tangan kanan mengayun ke depan.



Gambar 4.3 Posisi dari tangan kanan saat mengayun ke depan

Selanjutnya, *output* berupa sudut dari pengujian *inverse kinematics* menjadi *input* dari *forward kinematics* untuk mendapatkan posisi.

Tabel 4.2 Nilai posisi *end effector* tangan kanan (pengujian *forward kinematics*)

No	Input nilai sudut ($^{\circ}$)				Output nilai posisi (mm)		
	Θ_1	Θ_2	Θ_3	Θ_4	P_x	P_y	P_z
1	0	-90	0	0	0	-25	-86,5
2	0	-108,63	0	0	-50,18	-25	-78,23
3	0	-71,37	0	0	50,18	-25	-78,23

Perbandingan pada pengujian posisi *end effector* tangan kanan menghasilkan posisi yang tidak berbeda jauh antara posisi yang di gunakan dalam pengujian *inverse kinematics* dan *forward kinematics*. Hal tersebut dapat dibuktikan dengan perhitungan *error* yang terdapat pada Tabel 4.3 untuk *error* pada P_x dan Tabel 4.4 untuk *error* pada P_z .

Tabel 4.3 Nilai *error* posisi P_x pada tangan kanan

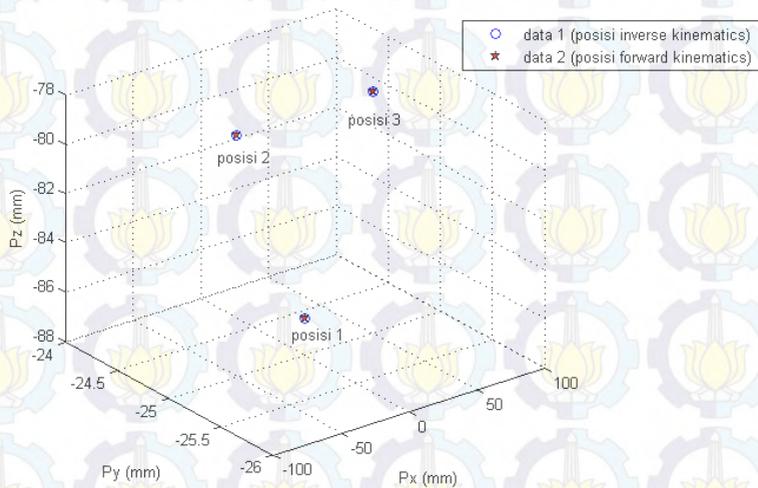
Nilai absolut error P_x			
No.	P_x (input)	P_x (output)	Absolut Error
1	0	0	0
2	-50	-50,18	0,18
3	50	50,18	0,18

Tabel 4.4 Nilai *error* posisi P_z pada tangan kanan

Nilai absolut error P_z			
No.	P_z (input)	P_z (output)	Absolut Error
1	-86,5	-86,5	0
2	-78,2	-78,23	0,03
3	-78,2	-78,23	0,03

Dari perhitungan *error* pada P_x dan P_z dapat dilihat bahwa rata-rata *error* pada P_x sebesar 0,12 mm. Hal tersebut dapat terjadi, karena konfigurasi *joint* pada tangan kanan sesuai dengan konfigurasi *link* robot. Rata-rata *error* pada P_z sebesar 0,02 mm, *error* tersebut cukup kecil, sehingga tidak mempengaruhi perbedaan gerak tangan

kanan dari robot Bioloid dari perencanaan ke implementasi. Selain itu, data dari Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 dapat dilihat perbandingan posisi saat pengujian *inverse kinematics* dengan posisi saat pengujian *forward kinematics* yang terdapat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Perbandingan posisi *end effector* tangan kanan

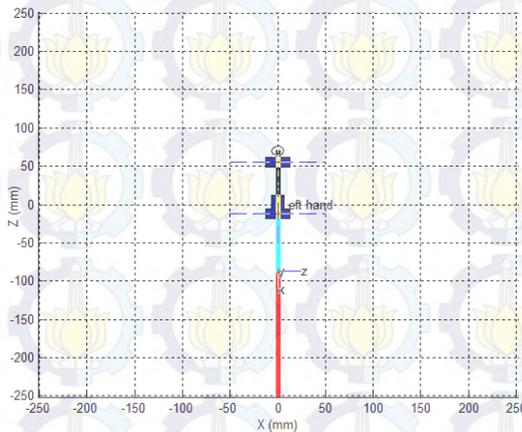
Dari Gambar 4.4 dapat disimpulkan bahwa, perbandingan posisi yang direncanakan dengan posisi yang di dapatkan dari *forward kinematics* dapat menjadi acuan gerak robot saat implementasi. Hal ini dapat dibuktikan dengan mensubstitusikan parameter DH kedalam transformasi homogen pada Persamaan 3.15 dan 3.17 untuk mendapatkan posisi dari *end effector*.

Selanjutnya, pengujian kinematika dilakukan pada tangan kiri robot Bioloid. Konsep pengujian yang dilakukan sama dengan pada tangan kanan. Pada Tabel 4.5 dapat dilihat hasil pengujian *inverse kinematics* dengan *input* berupa posisi dan *output* berupa sudut pada *joint 2*.

Tabel 4.5 Nilai sudut tangan kiri dengan *input* posisi (pengujian *inverse kinematics*)

No	Input (mm)			Output nilai sudut (°)			
	P_x	P_y	P_z	Θ_1	Θ_2	Θ_3	Θ_4
1	0	25	-86,5	0	90	0	0
2	50	25	-78,2	0	108,63	0	0
3	-50	25	-78,2	0	71,37	0	0

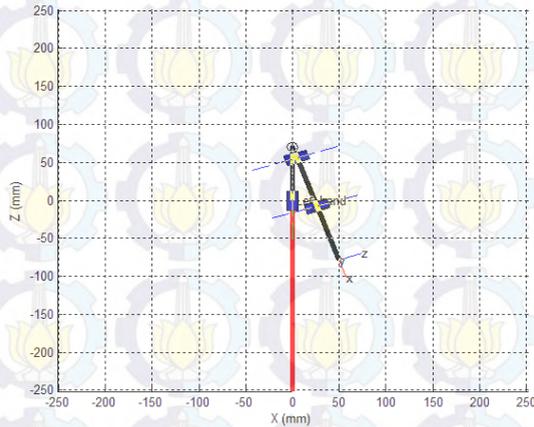
Pada Tabel 4.5 dapat dilihat bahwa posisi tangan kiri saat normal *pose* atau sebelum berjalan lalu saat mengayun ke depan dan saat mengayun ke belakang.



Gambar 4.5 Posisi tangan kiri saat kondisi normal

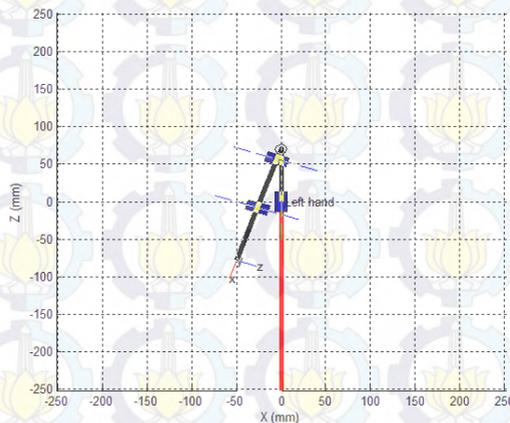
Pada saat posisi normal *pose* sudut *joint 2* bernilai 90° yang posisinya sejajar dengan badan robot. Posisi kedua, ketika tangan kiri mengayun ke depan dengan sudut yang diperoleh $71,37^\circ$. Tangan kiri akan direncanakan melakukan gaya yang berkebalikan dengan tangan kanan. Jadi, ketika tangan kanan mengayun ke belakang tangan kiri akan mengayun ke depan begitu pula sebaliknya. Penentuan posisi *end effector*, baik tangan maupun kaki diperoleh dari titik koordinat yang direncanakan pada tahap perancangan analisis *inverse kinematics*. Pada perencanaan berjalan, kaki kanan akan melangkah ke depan terlebih dahulu maka, tangan kiri akan mengayun ke depan dan tangan kanan

akan mengayun ke belakang. Perencanaan posisi tangan kiri saat kondisi tangan kiri mengayun ke depan dapat dilihat pada Gambar 4.6



Gambar 4.6 Posisi tangan kiri saat kondisi mengayun ke depan

Selanjutnya, saat sudut *joint 2* bernilai $108,63^\circ$ dengan kondisi yang diharapkan adalah tangan kiri mengayun ke belakang. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Posisi tangan kiri saat kondisi mengayun ke belakang

Sudut yang diperoleh pada tangan kiri bernilai positif yang berbeda dengan sudut pada tangan kanan. Hal tersebut dapat terjadi karena konfigurasi putaran dari motor servo. Namun sudut antara tangan kanan dengan tangan kiri dapat dikatakan identik karena putaran motor servo pada *joint* 1 dan 2 mengacu pada sumbu *pitch* .

Selanjutnya, akan dibandingkan posisi pada pengujian *inverse kinematics* dengan posisi yang diperoleh dari pengujian *forward kinematics*. Posisi pada pengujian *forward kinematics* diperoleh dari substitusi parameter DH pada Tabel 3.2 kedalam transformasi homogen pada persamaan 3.34 dan 3.36. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Nilai Posisi end effector tangan kiri (pengujian *forward kinematics*)

No	Input nilai sudut (°)				Output nilai posisi (mm)		
	Θ_1	Θ_2	Θ_3	Θ_4	P_x	P_y	P_z
1	0	90	0	0	0	25	-86,5
2	0	108,63	0	0	49,9	25	-78,29
3	0	71,37	0	0	-49,9	25	-78,29

Posisi yang di peroleh dari pengujian *inverse kinematics* dan *forward kinematics* yang terdapat pada Tabel 4.5 dan Tabel 4.6, maka akan dibandingkan besar *error* yang terjadi yang dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8.

Tabel 4.7 Nilai *error* posisi P_x pada tangan kiri

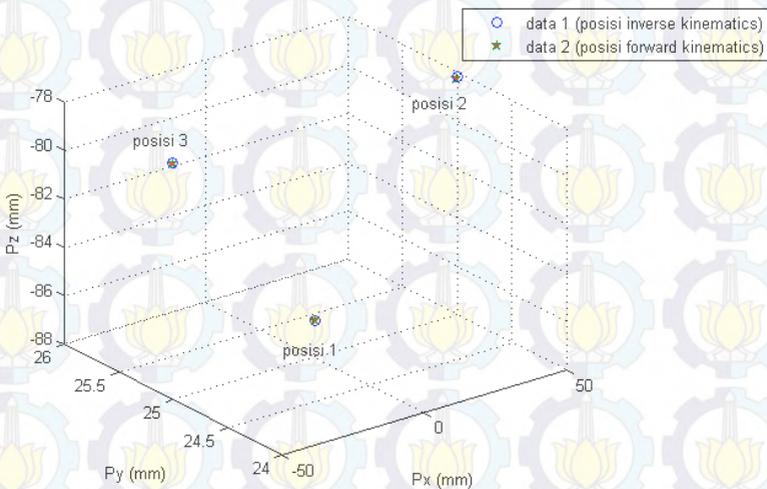
Nilai absolut error P_x			
No.	P_x (input)	P_x (output)	Absolut Error
1	0	0	0
2	50	49,9	0,1
3	-50	-49,9	0,1

Tabel 4.8 Nilai *error* posisi P_z pada tangan kiri

Nilai absolut error P_z			
No.	P_z (input)	P_z (output)	Absolut Error
1	-86,5	-86,5	0
2	-78,2	-78,29	0,09

Nilai absolut error P_x			
No.	P_z (input)	P_z (output)	Absolut Error
3	-78,2	-78,29	0,09

Rata-rata *error* yang diperoleh pada pengujian posisi P_x tangan kiri sebesar 0,06 mm. Selain itu, untuk rata-rata *error* pada P_z adalah 0,06 mm. *Error* tersebut cukup kecil sehingga tidak mempengaruhi perubahan gerak robot. Hal ini dapat terjadi karena perencanaan posisi pada saat analisis *inverse kinematics* hanya mempertimbangkan jarak antar *link* dari tangan robot tanpa memperhitungkan sudut *offset* yang terdapat pada *joint*. Perbandingan posisi dari tangan kiri ketika pengujian *inverse kinematics* dan *forward kinematics* tersebut juga dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Perbandingan posisi *end effector* tangan kiri

Dari Gambar 4.8 dapat disimpulkan bahwa posisi yang di peroleh dari hasil perbandingan posisi antara *inverse kinematics* dengan *forward kinematics* tidak ada perbedaan antara posisi yang direncanakan dengan posisi yang diperoleh dari pengujian.

Pada Gambar 4.8 juga dapat dilihat bahwa terdapat 3 titik posisi yang akan menjadi pola gerak inti saat robot Bioloid mengayunkan tangannya ketika berjalan.

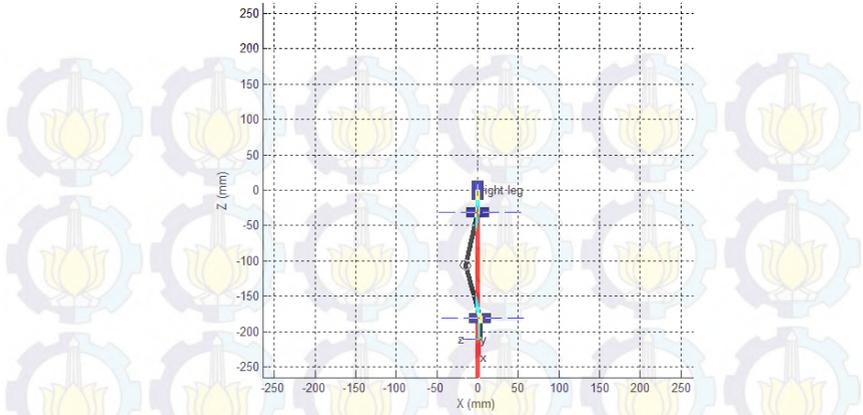
4.1.2 Pengujian Kinematika Kaki Robot Bioloid

Pengujian kinematika selanjutnya, dilakukan pada kaki kanan dan kaki kiri. Konsep dari pengujian kinematika pada kaki sama dengan yang dilakukan pada tangan robot Bioloid. Perbedaannya, sudut yang digunakan pada *joint* yang terletak pada kaki lebih banyak. Pengujian akan dilakukan pada kaki kanan terlebih dahulu dan ditinjau terhadap sumbu x, z dan sumbu y, z. Sudut yang akan digunakan untuk pengujian kaki kanan adalah sudut pada *joint* 11, 13, 15. Parameter yang akan digunakan pada pengujian berupa posisi dan sudut pada kaki kanan dapat dilihat pada Tabel 4.9 yang merupakan pengujian *inverse kinematics*, dari pengujian ini seperti yang telah dilakukan pada tangan yaitu *input* berupa posisi yang di rencanakan dengan *output* berupa sudut.

Tabel 4.9 Nilai sudut kaki kanan dengan *input* posisi (pengujian *inverse kinematics*)

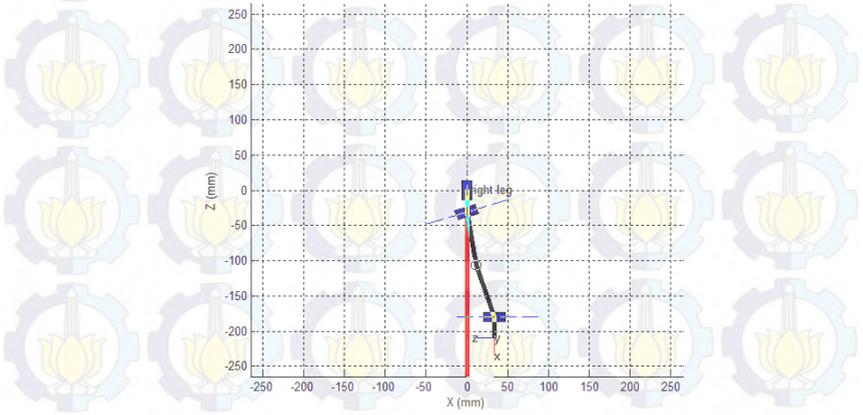
No	Input nilai posisi (mm)			Output nilai sudut (°)		
	P_x	P_y	P_z	Θ_1	Θ_2	Θ_3
1	0	-38	-210.5	0	0	0
2	30	-38	-209.05	-19.47	15.66	3.83
3	-30	-38	-209.2	7.6	7.79	-15.47

Parameter posisi pada Tabel 4.9 merepresentasikan posisi kaki kanan saat dalam kondisi normal *pose*, dengan sudut yang diperoleh 0° untuk semua *joint*. Untuk perencanaan posisi kaki kanan dapat dilihat juga pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Posisi kaki kanan saat kondisi normal

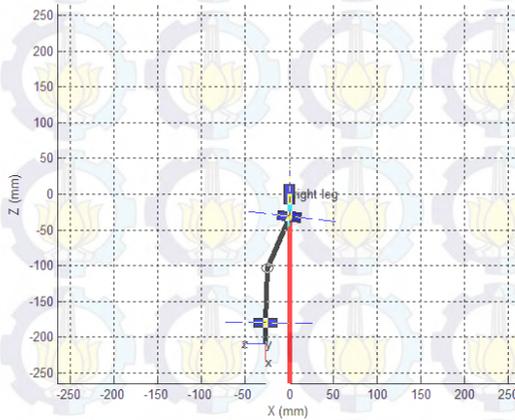
Pada Gambar 4.9 dapat dilihat, bahwa kaki kanan akan terlihat tegak namun terdapat sedikit sudut *offset*. *Offset* tersebut terjadi di sudut pada *joint 13* atau pada *knee* (lutut). Sudut *offset* pada *joint 13* sebesar 13° . Sudut *offset* harus dimasukkan ketika melakukan perencanaan simulasi agar kaki robot dapat berdiri tegak sesuai dengan perencanaan yang dilakukan. Kondisi kedua, yaitu saat kaki kanan melangkah ke depan yang dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Posisi kaki kanan saat melangkah ke depan

Ketika kaki kanan melangkah ke depan sudut pada *joint* 11 yang terletak pada *hip* bernilai negatif karena menurut konfigurasi putaran motor servo pada *joint* 11 mengacu pada sumbu *pitch*. Ketika kaki akan membuka ke depan menjahui sumbu normal maka sudutnya akan bernilai negatif. Sementara sudut pada *knee* (lutut) dan *ankle* (mata kaki) bernilai positif karena pada perencanaan, *knee* dan *ankle* di atur agar dapat menopang tubuh ketika *hip* (pangkal paha) melangkah ke depan.

Kondisi selanjutnya, ketika kaki kanan robot Bioloid berada di belakang. Sudut yang di peroleh pada *hip* bernilai positif karena servo berputar ke dalam mendekati garis normal atau di belakang garis normal kaki kanan. Untuk *joint* 13 sudut yang di peroleh sebesar $7,79^\circ$. Dari perencanaan posisi, saat kondisi ketiga *joint* 11, 13 dan 15 akan menopang badan robot Bioloid saat kaki kiri akan bersiap untuk melangkah. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Posisi kaki kanan saat berada di belakang

Selanjutnya, dari *output* berupa sudut akan di menjadi *input* untuk mendapatkan posisi dari kaki kanan pada pengujian *forward kinematics* yang dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Nilai Posisi *end effector* kaki kanan (pengujian *forward kinematics*)

No	Input nilai sudut ($^\circ$)			Output nilai posisi (mm)		
	Θ_1	Θ_2	Θ_3	P_x	P_y	P_z
1	0	0	0	3.10	-38	-209.84

No	Input nilai sudut ($^{\circ}$)			Output nilai posisi (mm)		
	Θ_1	Θ_2	Θ_3	P_x	P_y	P_z
2	-19.47	15.66	3.83	33.81	-38	-209.055
3	7.6	7.79	-15.47	-27.45	-38	-209.2

Output posisi dari Tabel 4.10 akan dibandingkan dengan input posisi dari Tabel 4.9. Hasil yang diharapkan ialah posisi dari *end effector* pada kaki kanan robot Bioloid sama atau mendekati dari hasil perancangan yang telah dibuat.

Pada perbandingan posisi terdapat *error* yang terjadi dari kondisi awal hingga kondisi akhir dan dapat dilihat pada Tabel 4.11 dan Tabel 4.12.

Tabel 4.11 Nilai posisi *error* P_x pada kaki kanan

Nilai absolut error P_x			
No.	P_x (input)	P_x (output)	Absolut Error
1	0	3.10	3.10
2	30	33.81	3.81
3	-30	-27.45	2.55

Tabel 4.12 Nilai *error* posisi P_z pada kaki kanan

Nilai absolut error P_z			
No	P_z (input)	P_z (output)	Absolut Error
1	-210.5	-209.84	0.66
2	-209.05	-209.055	0.005
3	-209.2	-209.2	0

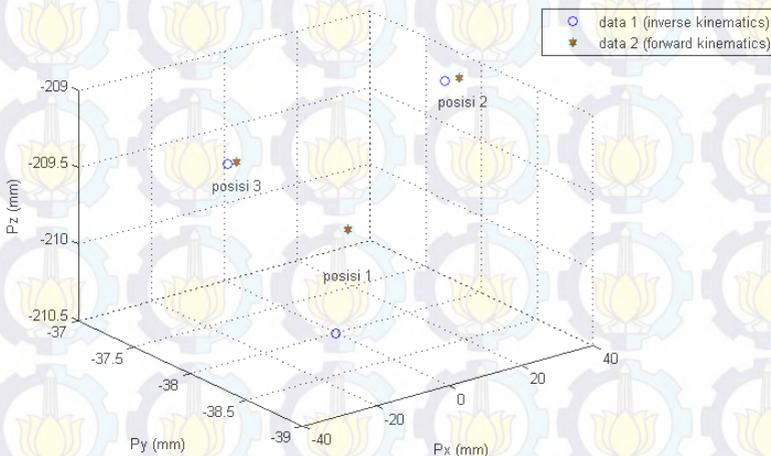
Rata-rata *error* yang terjadi pada posisi P_x yang terdapat pada Tabel 4.11 adalah 3,1mm. Hal ini dapat terjadi karena perencanaan konfigurasi *joint* pada kaki kanan di asumsikan jarak pada P_x saat kondisi kaki kanan pada normal *pose* bernilai 0.

Namun, pada hasil pengujian *forward kinematics* posisi P_x bernilai 3,1 mm saat posisi *normal pose*. *Error* yang terjadi hanya mempengaruhi pergerakan posisi P_x sebesar 3,1 mm atau 0,31 cm sehingga kaki robot tidak mengalami perubahan gerak yang signifikan

dan masih dapat digunakan sebagai acuan gerak robot. Untuk rata-rata *error* pada posisi P_z , diperoleh sebesar 0.22 mm.

Error pada posisi P_z sangat kecil dan hasil pengujian posisi P_z masih dianggap sesuai dengan perencanaan gerak pada kaki kanan robot Bioloid. Selain itu nilai posisi yang diperoleh pada pengujian *forward kinematics* untuk kaki kanan dapat diperoleh dari substitusi parameter DH pada Tabel 3.3 kedalam transformasi homogen pada Persamaan 3.53 dan 3.55.

Selain itu, Pada Gambar 4.12 dapat dilihat perbandingan posisi pada kaki kanan saat pengujian posisi *inverse kinematics* dengan pengujian posisi saat *forward kinematics*.



Gambar 4.12 Perbandingan posisi *end effector* kaki kanan

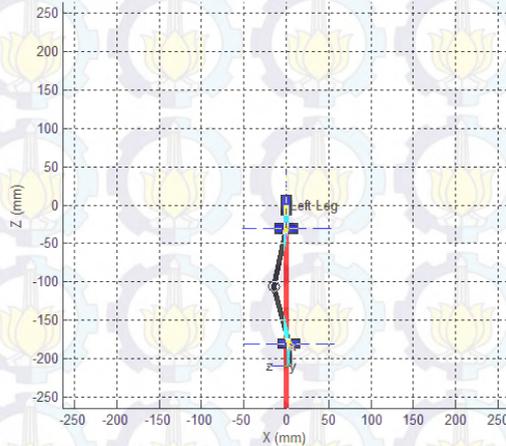
Selanjutnya, pengujian posisi *end effector* dilakukan pada kaki kiri robot Bioloid. Untuk parameter *input* dan *output* pada pengujian *inverse kinematics* yang akan digunakan pada tahap pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Nilai sudut kaki kiri dengan *input* posisi (pengujian *inverse kinematics*)

No	Input nilai posisi (mm)			Output nilai sudut ($^{\circ}$)		
	P_x	P_y	P_z	Θ_1	Θ_2	Θ_3
1	0	38	-210,5	0	0	0

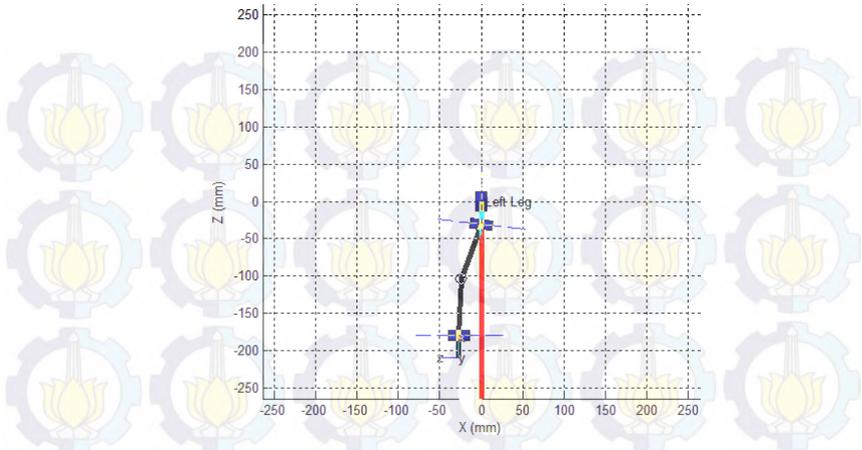
No	Input nilai posisi (mm)			Output nilai sudut ($^{\circ}$)		
	P_x	P_y	P_z	Θ_1	Θ_2	Θ_3
2	-30	38	-209,2	-7,6	-7,79	15,47
3	30	38	-209,05	19,47	-15,66	-3,83

Dari Tabel 4.13, dapat diketahui perencanaan gerak kaki kiri dari posisi normal *pose* hingga posisi pada saat melangkah. Untuk kondisi pertama adalah saat kaki kiri dalam kondisi normal *pose*, diperoleh sudut 0° pada setiap *joint* yang berada di kaki kiri yaitu *joint* 12, 14, 16. Hal tersebut juga dapat dilihat pada Gambar 4.13.



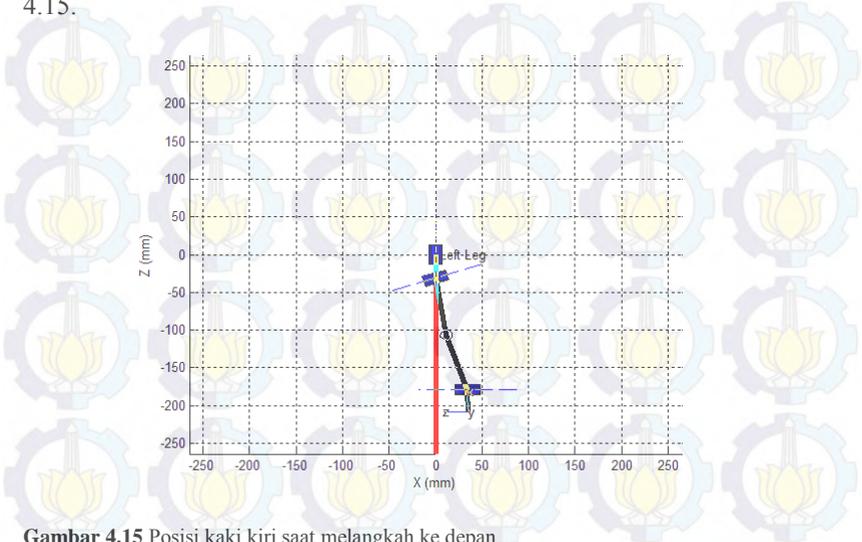
Gambar 4.13 Posisi kaki kiri saat kondisi normal

Kondisi kedua, ketika kaki kiri berada di belakang garis normal yang fungsinya untuk menjaga keseimbangan badan ketika kaki kanan melangkah ke depan. Pada saat kondisi kedua perubahan posisi terjadi pada P_x , hal ini dapat dilihat pada Tabel 4.13 saat kondisi kedua nilai posisi P_x sebesar -30 mm. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Posisi kaki kiri saat kondisi berada di belakang sumbu normal

Kondisi berikutnya, saat kaki kiri melangkah ke depan atau berada di depan garis normal. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Posisi kaki kiri saat melangkah ke depan

Setelah mendapatkan sudut dari Tabel 4.13 maka dapat di peroleh posisi sebagai *output* (pengujian *forward kinematics*) seperti pada data yang ada di Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Nilai Posisi *end effector* kaki kiri (pengujian *forward kinematics*)

No	Input nilai sudut ($^{\circ}$)			Output nilai posisi (mm)		
	Θ_1	Θ_2	Θ_3	P_x	P_y	P_z
1	0	0	0	3.10	38	-209.84
2	-7.6	-7.79	15.47	-26.89	38	-209.2
3	19.47	-15.66	-3.83	34.61	38	-208.89

Dari data Tabel 4.13 dan 4.14 maka dapat diperoleh *error* antara posisi saat pengujian *inverse kinematics* dengan data pengujian posisi saat *forward kinematics* yang dapat dilihat pada Tabel 4.15 dan 4.16.

Tabel 4.15 Nilai *error* posisi P_x pada kaki kiri

Nilai absolut error P_x			
No	P_x (input)	P_x (output)	Absolut Error
1	0	3,10	3,10
2	-30	-26,89	3,11
3	30	34,61	4,61

Tabel 4.16 Nilai *error* pada P_z kaki kiri

Nilai absolut error P_z			
No.	P_z (input)	P_z (output)	Absolut Error
1	-210,5	-209,84	0,66
2	-209,2	-209,2	0
3	-209,05	-208,89	0,16

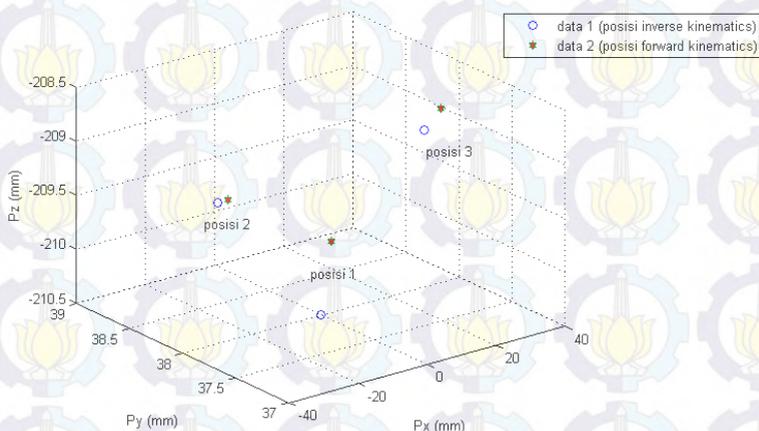
Pada Tabel 4.15 dapat diperoleh rata-rata *error* posisi P_x sebesar 3,6 mm. Seperti yang terjadi pada kaki kanan untuk posisi pada P_x terjadi perbedaan posisi 3,1 mm atau 0,31 cm, hal ini dapat terjadi karena saat perencanaan kondisi normal *pose* pada kaki kanan pada P_x di asumsikan 0 atau tepat pada sumbu normal. Sementara itu, untuk rata-rata *error* pada P_z sebesar 0,27 mm.

Nilai *error* yang terjadi dapat disebabkan oleh perancangan analisis *inverse kinematics* saat posisi normal dengan asumsi berada

pada titik koordinat (0,0). Namun, *error* yang terjadi tidak terlalu besar dan tidak merubah pergerakan robot secara signifikan dari yang direncanakan.

Selain itu, sudut yang diperoleh untuk kaki kanan dan kaki kiri saat ditinjau dari sumbu x, z bersifat identik yang membedakan hanya tanda positif dan negatif bergantung dari konfigurasi putaran motor servo yang terletak pada tiap *joint*.

Secara konsep, sumbu putar pada *joint* 11,12,13,14,15 dan 16 mengacu pada sumbu *pitch*. Perbandingan posisi pada kaki kiri, juga dapat dilihat pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Perbandingan posisi *end effector* kaki kiri.

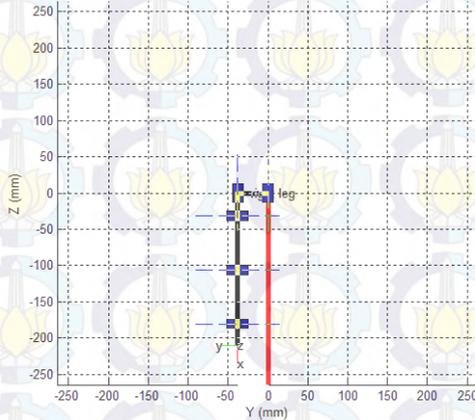
Untuk pengujian kinematika pada kaki robot Bioloid akan dilakukan sebanyak 2 kali. Pertama, pengujian kinematika saat ditinjau dari sumbu x, z seperti yang telah di jabarkan dan berikutnya pengujian kinematika saat ditinjau dari sumbu y, z. Pengujian tersebut fokus pada *joint* yang berada pada *joint* 9,10 untuk *hip*, *joint* 17, 18 untuk *ankle*. Fungsi dari *joint* tersebut untuk menjadi titik berat robot Bioloid saat melangkah atau untuk menjaga keseimbangan tubuh robot ketika berjalan. Perencanaan yang diharapkan adalah sudut kemiringan *joint* tersebut dapat menjaga keseimbangan robot ketika berjalan agar tidak jatuh. Perbandingan posisi akan dilakukan terhadap posisi P_y dan P_z .

Pada Tabel 4.17 dapat dilihat parameter posisi yang akan digunakan sebagai *input* untuk mendapatkan sudut.

Tabel 4.17 Nilai sudut kaki kanan dengan *input* posisi ditinjau dari sumbu y,z (pengujian *inverse kinematics*)

No	Input nilai posisi (mm)			Output nilai sudut ($^{\circ}$)	
	P_x	P_y	P_z	Θ_1	Θ_2
1	3,10	-38	-210,5	0	0
2	3,10	-78	-204,4	15,46	-15,5
3	3,10	-23	-209	-5,74	5,74

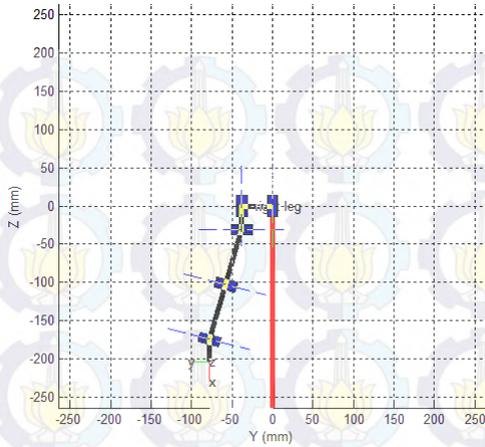
Parameter Tabel 4.17, dapat dilihat bahwa posisi kaki kanan saat ditinjau dari sumbu y, z saat kondisi normal *pose* sudut yang di peroleh sebesar 0° untuk *joint* 9 dan *joint* 17. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Posisi kaki kanan saat kondisi normal ditinjau dari sumbu-y, z

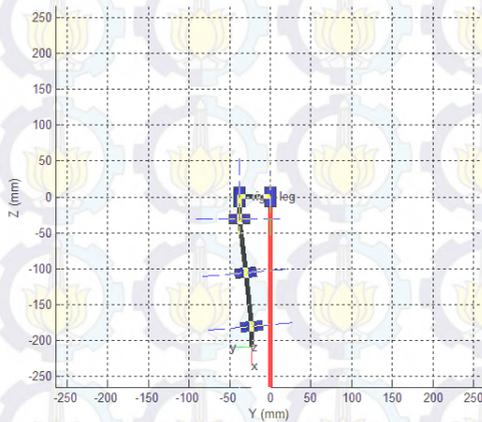
Pengujian kedua, saat kondisi kaki kanan melangkah ke depan *joint* 9 akan di atur miring menjauhi garis normal agar kaki kanan dapat melangkah ke depan dan tidak terjadi gesekan antara telapak kaki kanan dengan telapak kaki kiri.

Sudut saat kondisi kedua bernilai $15,46^{\circ}$, sudut di *joint* 9 dan bernilai $-15,5^{\circ}$ pada *joint* 17. Gambar 4.18 menunjukkan posisi kaki kanan saat kondisi melangkah ke depan ditinjau dari sumbu y, z.



Gambar 4.18 Posisi kaki kanan saat kondisi melangkah ditinjau dari sumbu- y, z

Kondisi ketiga, ketika kaki kanan akan menjadi titik berat saat kaki kiri melangkah ke depan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.19.



Gambar 4.19 Posisi kaki kanan saat menjadi titik berat ditinjau dari sumbu- y, z

Dari sudut yang diperoleh pada Tabel 4.18 akan di ubah menjadi *input* (pengujian *forward kinematics*) untuk mendapatkan posisi yang dapat dilihat pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Nilai Posisi *end effector* kaki kanan terhadap sumbu *y,z* (pengujian *forward kinematics*)

No	Input nilai sudut (°)		Output nilai posisi (mm)		
	Θ_1	Θ_2	P_x	P_y	P_z
1	0	0	3,10	-38	-209,84
2	15,46	-15,5	3,10	-77,69	-204,4
3	-5,74	5,74	3,10	-23,07	-209,09

Posisi yang diperoleh pada Tabel 4.18 akan dibandingkan dengan posisi pada pengujian *forward kinematics*. Lalu, akan diperoleh *error* dari perbandingan tersebut yang dapat dilihat pada Tabel 4.19 dan 4.20.

Tabel 4.19 Nilai *error* pada P_y kaki kanan ditinjau dari sumbu *y,z*

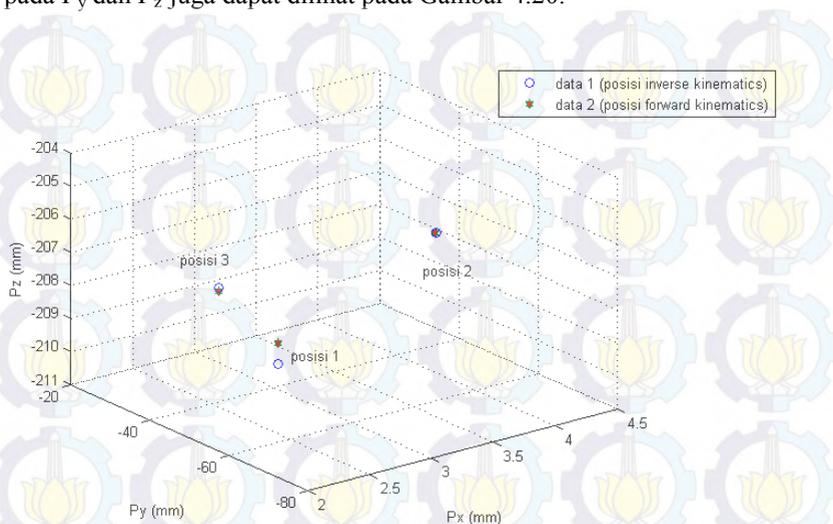
Nilai absolut error P_y			
No	P_y (<i>input</i>)	P_y (<i>output</i>)	Absolut <i>Error</i>
1	-38	-38	0
2	-78	-77,69	0,31
3	-23	-23,07	0,07

Tabel 4.20 Nilai *error* pada P_z kaki kanan dari sumbu *y,z*

Nilai absolut error P_z			
No	P_z (<i>input</i>)	P_z (<i>output</i>)	Absolut <i>Error</i>
1	-210,5	-209,84	0,66
2	-204,4	-204,4	0
3	-209	-209,09	0,09

Rata-rata *error* pada posisi P_y sebesar 0,12 mm. Sedangkan untuk rata-rata *error* pada posisi P_z adalah 0,25 mm. Hal ini dapat terjadi karena pada *joint* 9 dan 17 tidak dipengaruhi *offset* sudut. Sudut dari *joint* 9 dan 17 hanya berbeda tanda positif dan negatif hal tersebut karena sumbu putar pada *joint* 9 dan 17 mengacu pada *roll*. Pada pengujian posisi kaki dengan acuan sumbu *y, z* nilai P_y dan P_z pada pengujian *forward kinematics* merupakan substitusi dari parameter DH

pada Tabel 3.3 kedalam Persamaan 3.54 dan 3.55. Perbandingan posisi pada P_y dan P_z juga dapat dilihat pada Gambar 4.20.



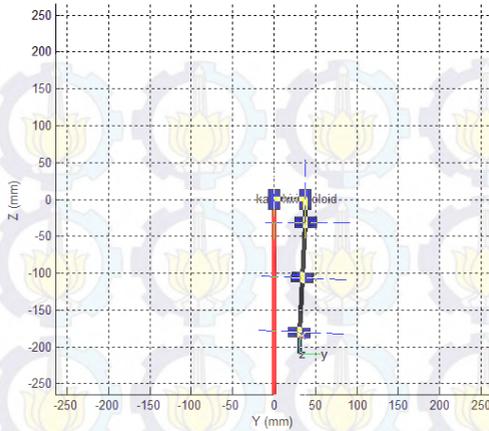
Gambar 4.20 Perbandingan posisi *end effector* kaki kanan saat ditinjau dari sumbu y, z .

Selanjutnya, pengujian kinematika dilakukan pada kaki kiri saat ditinjau dari sumbu y, z . Konsep pengujian yang dilakukan sama dengan pengujian untuk kaki kanan. Parameter *input* posisi pada *joint* 10 dan 18 pada pengujian *inverse kinematics* dapat dilihat pada Tabel 4.21.

Tabel 4.21 Nilai sudut kaki kiri dengan *input* posisi ditinjau dari sumbu y, z (pengujian *inverse kinematics*)

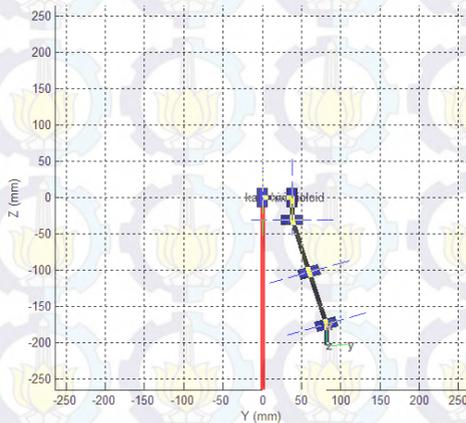
No	<i>Input</i> nilai posisi (mm)			<i>Output</i> nilai sudut ($^{\circ}$)	
	P_x	P_y	P_z	Θ_1	Θ_2
1	3,10	38	-210,5	0	0
2	3,10	23	-209	5,73	-5,74
3	3,10	78	-204,4	-15,46	15,5

Posisi awal saat kondisi kaki kiri berdiri tegak atau saat kondisi normal *pose* dengan sudut pada *joint* 10 dan *joint* 18 sebesar 0°



Gambar 4.22 Posisi kaki kiri saat menjadi titik berat ditinjau dari sumbu- y, z

Kondisi ketiga ialah saat posisi kaki kiri akan melangkah ketika ditinjau dari sumbu y, z . Sedangkan pada kaki kanan akan menjadi titik berat untuk menjaga keseimbangan robot Bioloid. Sudut yang diperoleh ialah sebesar $-15,46$ untuk *joint* 10 dan bernilai $15,5$ untuk *joint* 18. Posisi kaki kiri saat kondisi ketiga dapat dilihat pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23 Posisi kaki kiri saat melangkah ke depan ditinjau dari sumbu- y, z

Selanjutnya, *output* pada sudut yang di dapat pada Tabel 4.21 akan menjadi *input* untuk mendapatkan posisi sebagai pengujian *forward kinematics*.

Tabel 4.22 Nilai Posisi *end effector* kaki kiri terhadap sumbu y,z (pengujian *forward kinematics*)

No	Input nilai sudut (°)		Output nilai posisi (mm)		
	Θ_1	Θ_2	P_x	P_y	P_z
1	0	0	3,10	38	-209,84
2	5,73	-5,74	3,10	23,07	-209,09
3	-15,46	15,5	3,10	82,3	-203,3

Error posisi pada pengujian *inverse kinematics* dengan posisi yang di peroleh dari *forward kinematics* dapat dilihat pada Tabel 4.23 dan 4.24.

Tabel 4.23 Nilai *error* pada P_y kaki kiri ditinjau dari sumbu y,z

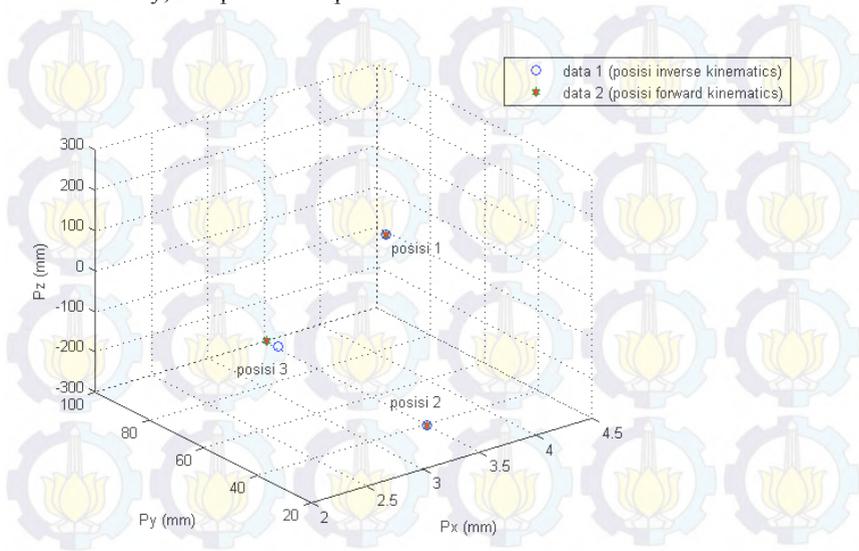
Nilai absolut error P_y			
No	P_y (input)	P_y (output)	Absolut Error
1	38	38	0
2	23	23,07	0,07
3	78	82,3	4,3

Tabel 4.24 Nilai *error* pada P_z kaki kiri dari sumbu y,z

Nilai absolut error P_z			
No	P_z (input)	P_z (output)	Absolut Error
1	-210,5	-209,84	0,66
2	-209	-209,09	0,09
3	-204,4	-203,3	1,1

Pada Tabel 4.23 dan 4.24, dapat dilihat bahwa rata-rata *error* pada posisi P_y sebesar 1,43 mm. Namun *error* tersebut masih dapat di toleransi dan tidak membuat robot jatuh saat implementasi. Untuk rata-rata *error* pada posisi P_z , adalah 0,61 mm, *error* yang terjadi sangat kecil. Selain itu untuk sudut dari *joint* 10 dan 18 bernilai identik karena putaran sudut dari *joint* tersebut ialah sumbu *roll*.

Hasil perbandingan posisi P_y dan P_z pada kaki kiri saat ditinjau dari sumbu y, z dapat dilihat pada Gambar 4.24.



Gambar 4.24 Perbandingan posisi *end effector* kaki kiri ditinjau dari sumbu- y, z

4.2 Pengujian *Walking Gait* Robot Bioloid

Tahap pengujian berikutnya adalah menentukan trayektori robot Bioloid saat berjalan. Pada pengujian ini, akan di implementasikan perencanaan trayektori pada robot Bioloid. Pada perencanaan trayektori yang sudah dijelaskan pada bab 3, perencanaan trayektori dilakukan untuk mendapatkan pola berjalan dari robot Bioloid. Untuk mendapatkan sudut dari tiap gerakan saat melangkah maka akan dilakukan perhitungan trayektori sudut menggunakan metode kurva interpolasi polinomial. Metode kurva interpolasi polinomial di pilih karena diharapkan dari perencanaan trayektori yang telah di buat akan di peroleh sudut yang akan menjadi acuan pola berjalan saat di implementasi. Metode interpolasi polinomial yang di gunakan ialah interpolasi polinomial orde 3.

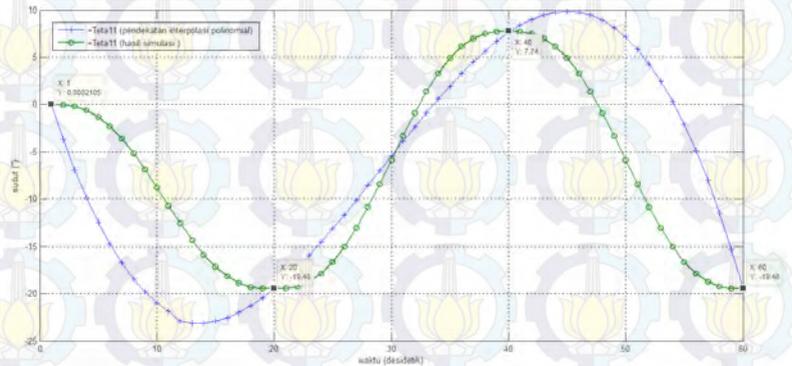
4.2.1 Pengujian *Walking Gait* Kaki Robot Bioloid

Tahap pertama adalah pengujian trayektori yang dilakukan pada *joint* 11 pada *hip* yang terletak pada kaki kanan. Mengacu pada

persamaan interpolasi polinomial pada Persamaan 2.22 maka akan diperoleh trayektori sudut pada *joint* 11 dengan hasil interpolasi polinomial seperti pada Persamaan 4.1.

$$y = 0 - 38,15x_1 + 18,4025x_1^2 - 2,0975x_1^3 \quad (4.1)$$

Persamaan 4.1 merupakan persamaan yang diperoleh dari metode kurva interpolasi polinomial. Dari persamaan tersebut variabel x_1 merupakan variabel waktu. *Sampling* dari variabel waktu (t) pada pengujian ini adalah per 0,1 s. Mengacu pada Tabel 3.9 maka *sampling* waktu yang akan diberikan mulai dari 0 – 6 s dengan *sampling* per 0,1 s. Dari perhitungan tersebut maka akan diperoleh trayektori sudut pada *joint* 11 akan dibandingkan dengan hasil perhitungan trayektori saat simulasi dengan menggunakan Matlab yang dapat dilihat pada Gambar 4.25.



Gambar 4.25 Trayektori Θ_{11}

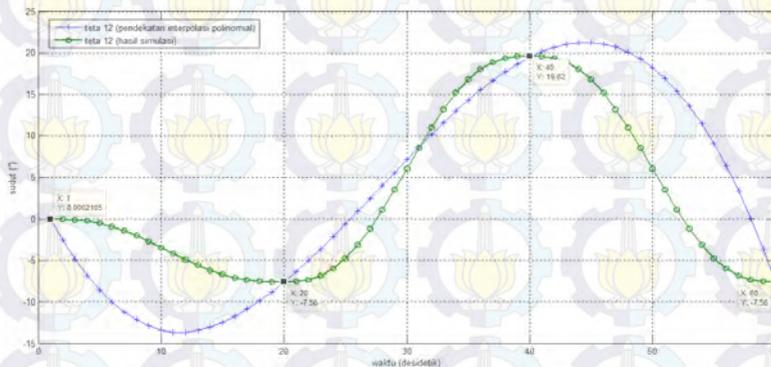
Selanjutnya, trayektori yang telah diperoleh akan digunakan sebagai *input* posisi yang digunakan untuk implementasi pada robot Bioloid. *Sampling* waktu per 0,1 s bertujuan untuk mendapatkan transisi sudut pada tiap *step* gerakan menjadi sangat halus. Pada implementasi, sudut trayektori yang berasal dari simulasi Matlab ketika di implementasikan akan menghasilkan pergerakan robot yang lebih halus. Hal ini dapat terjadi karena nilai trayektori sudut yang diperoleh dari simulasi Matlab menggunakan *toolbox* Peter E. corke menghasilkan

nilai yang memiliki selisih yang kecil. Pada saat simulasi sudut pada Θ_{11} saat $t = 0,7$ bernilai $-5,14^\circ$. Sedangkan pada saat perhitungan interpolasi polinomial bernilai $-18,4^\circ$.

Berikutnya merupakan trayektori pada *joint* 12. Untuk persamaan interpolasi polinomial dapat dilihat pada Persamaan 4.2.

$$y = 0 - 27,2692x_1 + 15,4350x_1^2 - 1,8502x_1^3 \quad (4.2)$$

Dari persamaan tersebut akan diperoleh perbandingan trayektori sudut pada *joint* 12 dari perhitungan interpolasi orde 3 menggunakan Persaman 4.2 dengan hasil simulasi yang dapat dilihat pada Gambar 4.26.



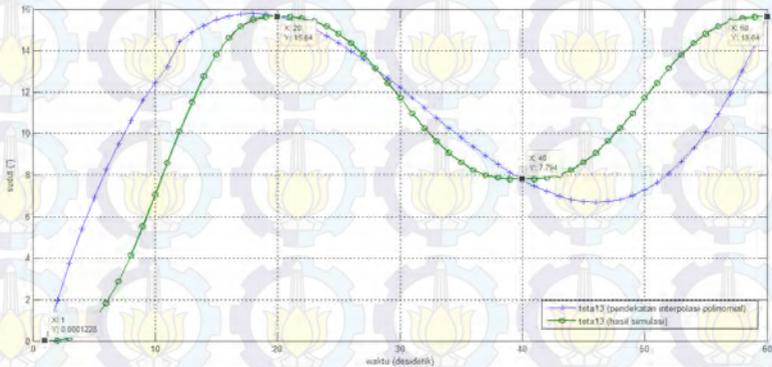
Gambar 4.26 Trayektori Θ_{12}

Berikutnya, merupakan trayektori pada *joint* 13 dan 14 pada *knee* (lutut). Hasil perhitungan polinomial dari sudut *joint* 13 dapat dilihat pada Persamaan (4.3)

$$y = 0 + 20,2575x_1 - 7,8500x_1^2 + 0,8181x_1^3 \quad (4.3)$$

Dari Persamaan 4.3 maka dapat dibandingkan trayektori sudut pada *joint* 13 yang merupakan hasil perhitungan interpolasi polinomial dengan hasil simulasi dari Matlab. Pada Gambar 4.26 dapat dilihat bahwa dari perhitungan interpolasi polinomial dan perhitungan simulasi

dari Matlab tidak berbeda jauh. Sehingga, pada saat implementasi gerakan dari kaki robot akan sesuai dengan trayektori yang telah di rencanakan Hasil dari trayektori setiap sudut, pada akhirnya akan menjadi *input* dari program yang akan diimplementasikan ke dalam robot Bioloid. Sudut dari masing–masing *joint* akan berkoordinasi untuk membentuk pola berjalan.



Gambar 4.27 Trayektori Θ_{13}

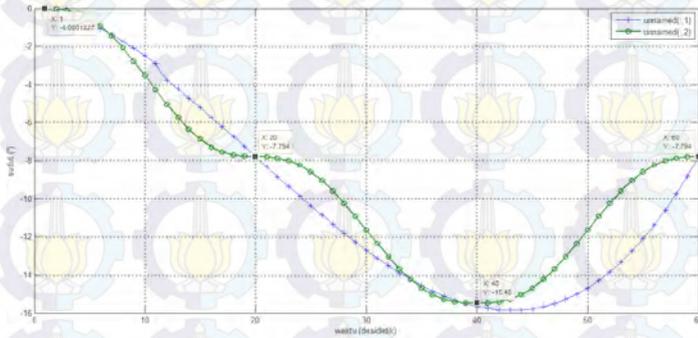
Dari Gambar 4.27, dapat dilihat bahwa titik temu antara perhitungan simulasi dan perhitungan dengan pendekatan interpolasi polinomial berada pada saat 0, 2, 4, 6 s. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa gerakan *knee* pada robot dapat mengacu hasil trayektori tersebut.

Pengujian selanjutnya, merupakan trayektori sudut dari *joint* 14 yang merupakan lutut dari kaki kiri. Persamaan polinomial pada sudut *joint* 14 dapat dilihat pada Persamaan 4.4.

$$y = 0 - 1,2383x_1 - 1,9875x_1^2 + 0,3296x_1^3 \quad (4.4)$$

Dari Persamaan 4.4 variabel x_1 sama seperti sebelumnya yaitu merupakan variabel waktu yang akan dimasukkan kedalam persamaan 4.4 dimulai dari 0,1 s sampai dengan 6s. setelah melakukan *sampling* waktu per 0,1 s, akan diperoleh sudut untuk *joint* 14 dari tiap *step* (langkah) yang akan menjadi *input* pada program implementasi. Sudut yang diperoleh pada perhitungan interpolasi polinomial akan di

konversikan terlebih dahulu menjadi desimal dengan mengacu pada Persamaan 3.89 agar dapat terbaca oleh program yang akan di *download* ke dalam kontroler robot Bioloid. Hasil perhitungan dari Persamaan 4.4 dapat dilihat pada Gambar 4.28.

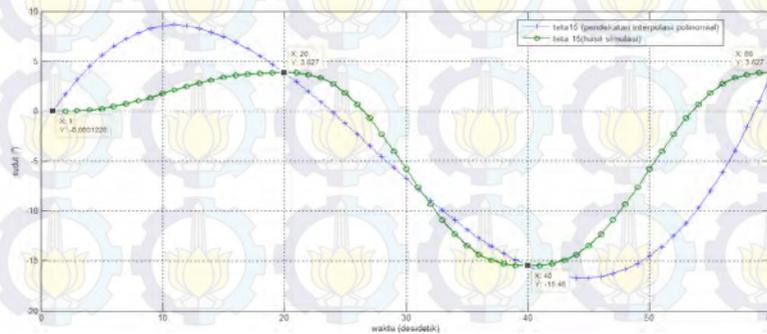


Gambar 4.28 Trayektori Θ_{14}

Pengujian berikutnya, pada *ankle* kaki kanan dan kiri yang terletak pada *joint* 15 dan 16. Hasil perhitungan interpolasi mendapatkan persamaan pada Persamaan 4.5

$$y = 0 + 17,9858x_1 - 10,6075x_1^2 + 1,2860x_1^3 \quad (4.5)$$

Perbandingan trayektori sudut pada *joint* 15 pada Gambar 4.29.

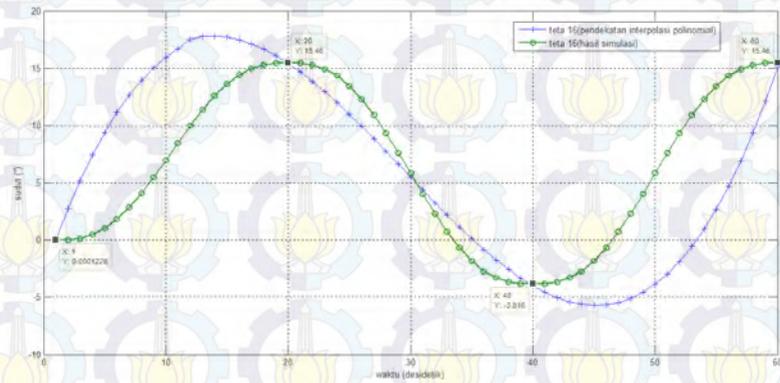


Gambar 4.29 Trayektori Θ_{15}

Selanjutnya pengujian pada *joint* 16, *ankle* yang berada pada kaki kiri robot. Seperti pengujian sebelumnya, trayektori sudut diperoleh menggunakan interpolasi polinomial yang dapat dilihat pada Persamaan 4.6

$$y = 0 + 28,6558x_1 - 13,5275x_1^2 + 1,5285x_1^3 \quad (4.6)$$

Dari Persamaan 4.6, nilai x_1 akan dimasukkan berupa waktu *sampling* dari 0-6s per 0,1 s. Sehingga akan diperoleh Gambar 4.30.



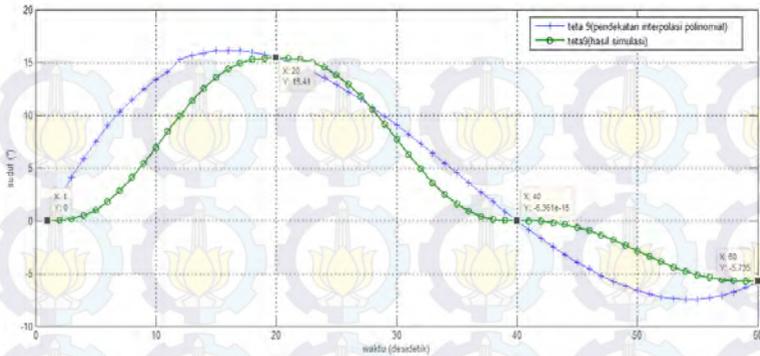
Gambar 4.30 Trayektori Θ_{16}

Seperti yang telah dijelaskan, trayektori dari setiap sudut yang diperoleh dari pengujian ini akan di menjadi *input* pada program yang akan digunakan untuk implementasi. Namun untuk pengujian pada kaki dilakukan 2 kali yaitu pengujian trayektori pada *joint* 11, 12, 13 14, 15 dan 16 lalu pengujian pada *joint* 9,10,17 dan 18 yang digunakan untuk menjaga keseimbangan robot ketika melangkah.

Untuk trayektori sudut pada *joint* 9 yang terletak pada *hip* robot dapat dilihat pada Persamaan (4.7).

$$y = 0 + 22,2333x_1 - 8,9450x_1^2 + 0,8467x_1^3 \quad (4.7).$$

Hasil dari perhitungan interpolasi polinomial akan mendapatkan trayektori sudut yang dapat dilihat pada Gambar 4.31.

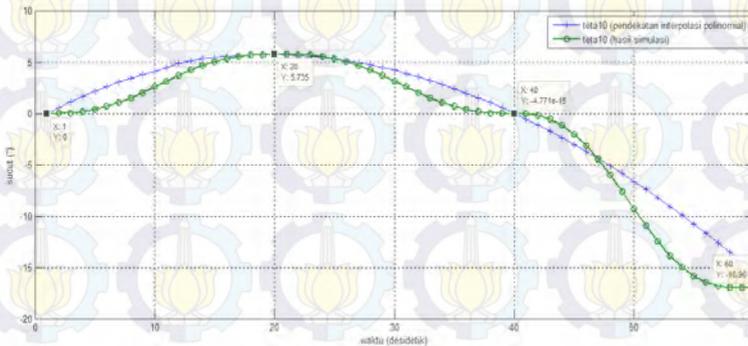


Gambar 4.31 Trayektori Θ_9

Selanjutnya pengujian dilakukan pada *joint* 10 yang merupakan bagian *hip* atau pangkal paha dari kaki kiri Robot Bioloid. Persamaan Polinomial untuk trayektori sudut dapat dilihat dibawah ini.

$$y = 0 + 6,0333x_1 - 1,6550x_1^2 + 0,0367x_1^3 \quad (4.8)$$

Dari Persamaan 4.8, maka akan di peroleh trayektori sudut dari pendekatan interpolasi polinomial orde 3 yang akan dibandingkan dengan hasil perhitungan Matlab. Hasil dari trayektori pada *joint* 10 dapat dilihat pada Gambar 4.32.



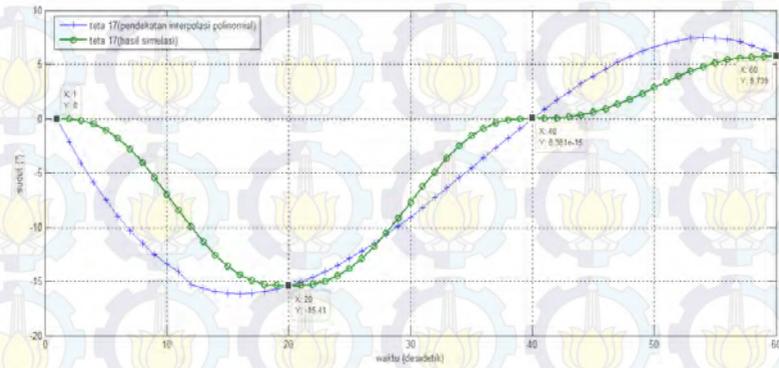
Gambar 4.32 Trayektori Θ_{10}

Untuk pengujian pada *ankle* yaitu pada *joint* 17 dan 18 akan diperoleh hasil seperti Persamaan 4.9 -4.10.

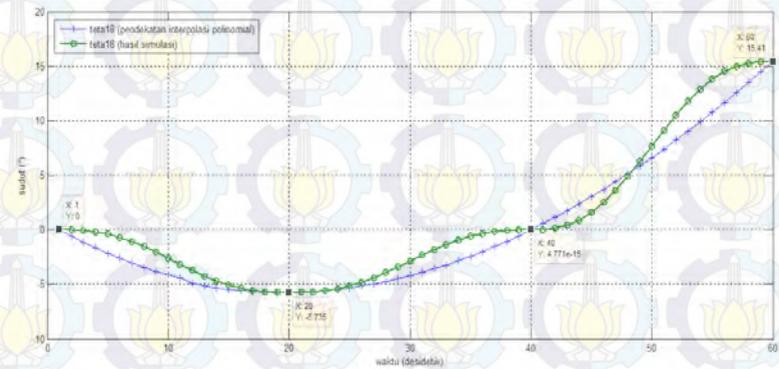
$$y = 0 - 22.2333x_1 + 0.89450x_1^2 - 0.8467x_1^3 \quad (4.9)$$

$$y = 0 - 6.0333x_1 + 1.6550x_1^2 - 0.0367x_1^3 \quad (4.10)$$

Hasil dari persamaan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.33 dan Gambar 4.34.



Gambar 4.33 Trayektori Θ_{17}



Gambar 4.34 Trayektori Θ_{18}

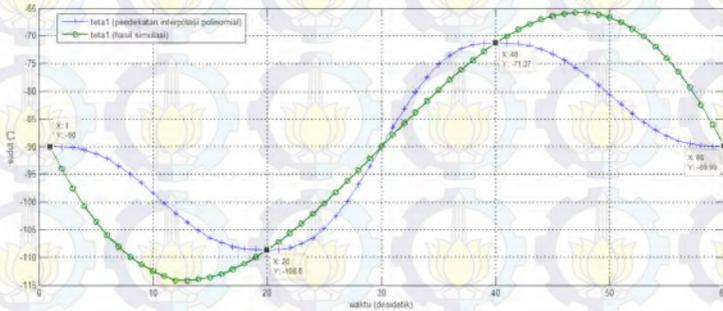
4.2.2 Pengujian *Walking Gait* Tangan Robot Bioloid

Pengujian juga dilakukan pada tangan robot Bioloid untuk hasil dari pengujian tersebut dapat dilihat pada Persamaan 4.11 untuk tangan kanan dan Persaman 4.12 untuk tangan kiri.

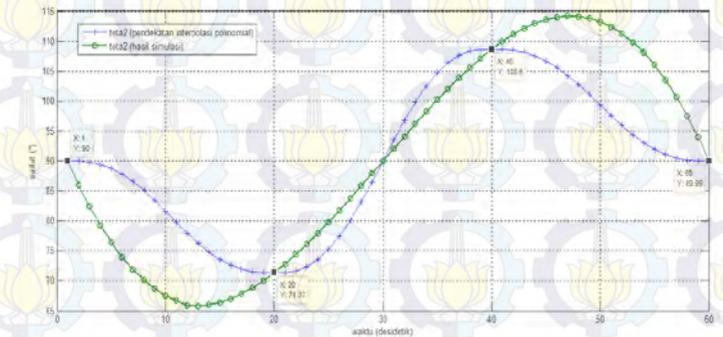
$$y = -90 - 41,9175x_1 + 20,9587x_1^2 - 2,3287x_1^3 \quad (4.11)$$

$$y = -90 - 41,9175x_1 + 20,9587x_1^2 - 2,3287x_1^3 \quad (4.12)$$

Dari persamaan tersebut akan diperoleh perbandingan sudut yang diperoleh berdasarkan hasil interpolasi dengan hasil simulasi. Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.35 dan 4.36.

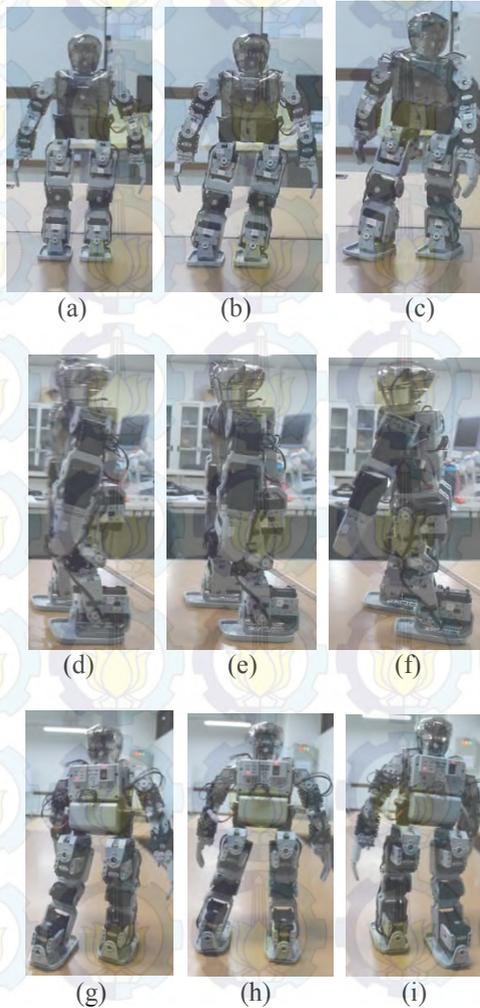


Gambar 4.35 Trayektori θ_1



Gambar 4.36 Trayektori θ_2

Dari hasil pengujian trayektori yang sudah dilakukan maka sudut dari semua taryektori akan dikonversi kedalam bentuk desimal untuk menjadi *input* saat implementasi pada robot Bioloid. Hasil dari trayektori akan di tampilkan pada Gambar 4.37.



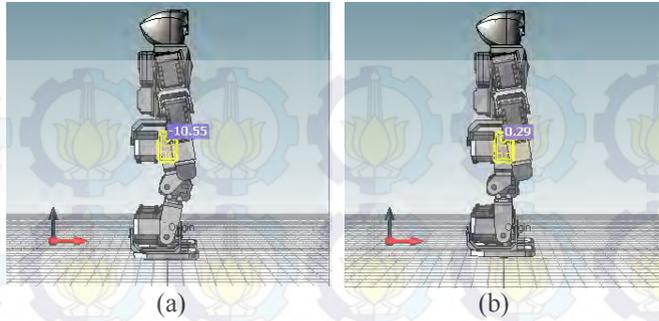
Gambar 4.37 Implementasi hasil trayektori pada robot Bioloid

Pada Gambar 4.37 dapat dilihat bahwa implementasi robot Bioloid dari trayektori yang telah direncanakan. Pada Gambar 4.37 bagian (a), (b), (c) merupakan serangkaian pola berjalan dimulai dari posisi normal lalu titik berat kaki berada di sebelah kiri dengan kaki kanan yang bersiap untuk melangkah. Pada bagian (c) terlihat kaki kanan robot sudah mengayun ke depan. Pada Gambar bagian (d), (e), (f) merupakan proses kaki kanan yang melangkah ke depan ketika dilihat dari samping. Sedangkan untuk bagian (g) merupakan proses transisi dari kaki kanan, kaki kiri bersiap untuk melangkah. Pada implementasi *walking gait* tersebut, diperoleh data berupa sudut kemiringan dari sumbu normal saat robot berjalan.

Tabel 4.25 Data sudut kemiringan pada robot Bioloid pada pengujian implementasi

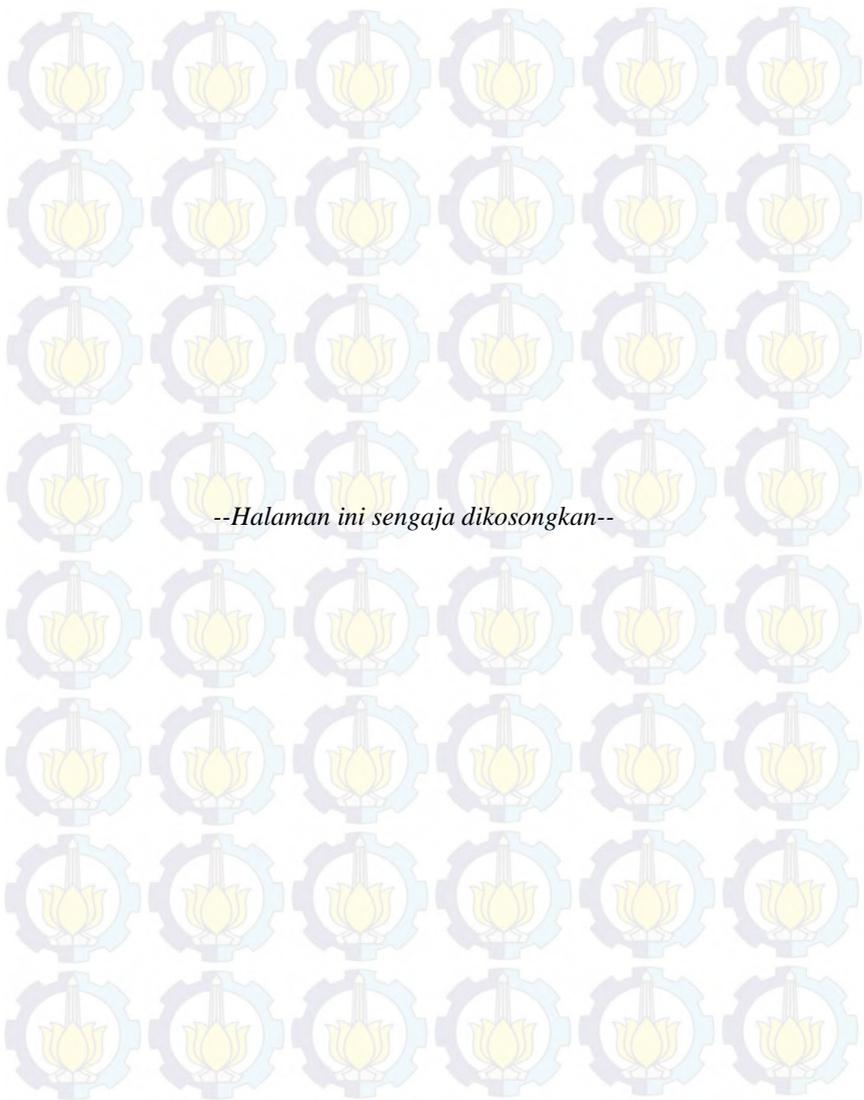
No.	Waktu (s)	Jarak (cm)	Sudut (°)
1	20	14	11,3
2	40	27,3	14,7
3	60	39,6	26,1
4	80	57	36,9

Pada Tabel 4.25 dapat dilihat bahwa pengujian dilakukan dengan menggunakan variabel waktu per 20 detik selama 80 detik. Jarak tempuh robot Biolid selama 80 detik adalah 57 cm dengan rata-rata sudut kemiringan sebesar 22.5° . Saat implementasi, robot Bioloid dapat berjalan lurus ke depan namun, saat perpindahan transisi dari kaki kanan ke kaki kiri jalan robot terlihat miring dan menjauhi posisi normal karena dipengaruhi oleh sensor keseimbangan robot (*gyro sensor*) yang tidak di aktifkan. Selain itu dari perancangan analisis *inverse kinematics* kaki robot Bioloid berada pada sudut 0° yang ditandai dengan kondisi tegak. Sehingga, saat melangkah posisi kaki robot Bioloid tidak terlihat melayang dan mengakibatkan gesekan yang terjadi pada telapak kaki robot. Solusi yang dapat dilakukan ialah dengan mengubah posisi normal *pose* saat robot bersiap melangkah dengan membuat sudut kaki robot Bioloid pada *joint* 11 bernilai $-10,8^\circ$ dan $12\ 11^\circ$. Hal ini akan membuat robot Bioloid terlihat berjongkok yang dapat dilihat pada Gambar 4.38.



Gambar 4.38 Perbandingan sudut saat *normal pose*

Pada Gambar 4.38 (a) dapat dilihat pada saat sudut *joint 11* bernilai $-10,5^\circ$ dan sudut pada *joint 13* bernilai $21,97^\circ$. Sedangkan pada Gambar 4.38(b) posisi *normal pose* dengan sudut pada *joint 11* dan *joint 13* bernilai 0° . Hal ini akan mempengaruhi kondisi saat robot melakukan implementasi *walking gait*.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan simulasi dan implementasi, ada beberapa hal yang dapat disimpulkan dari penelitian pada Tugas Akhir ini, yaitu:

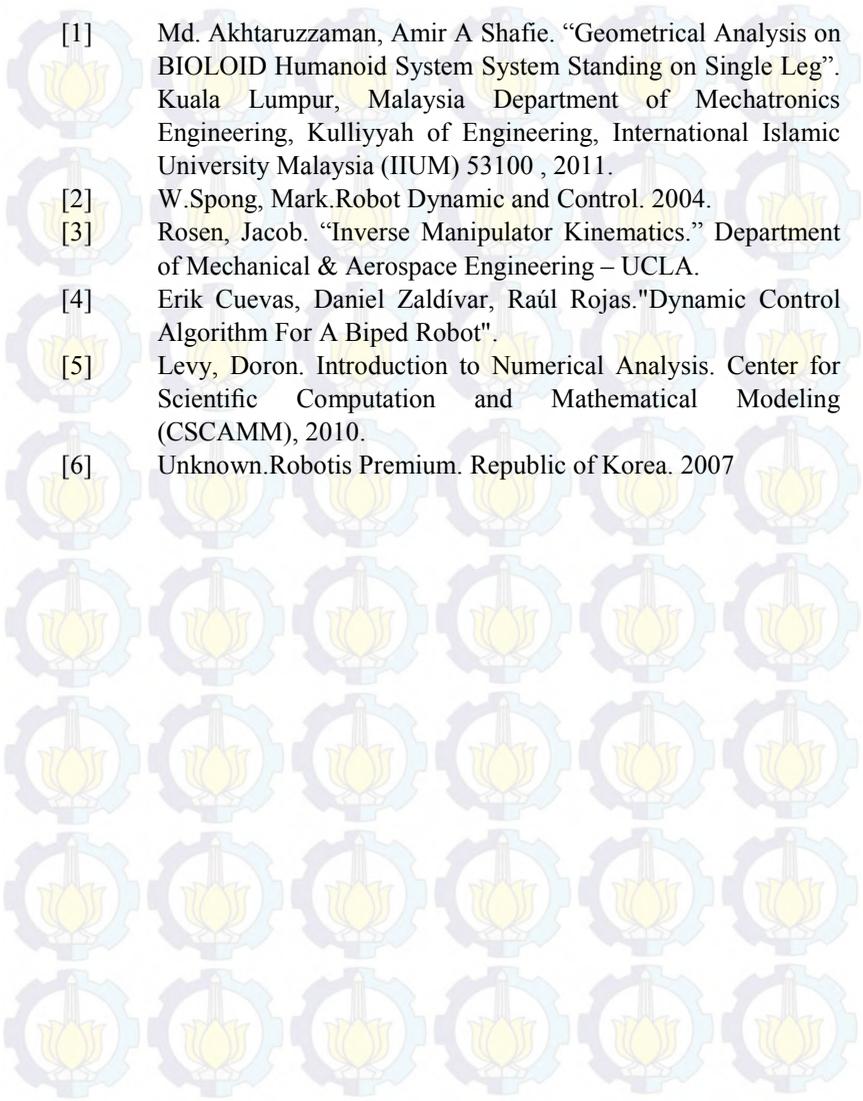
- a. Analisis *inverse kinematics* dilakukan secara tersegmentasi dengan menggunakan pendekatan geometris mampu memberikan respon posisi sesuai dengan perancangan yang di inginkan. Hal ini dapat dibuktikan dengan nilai rata-rata error pada pengujian posisi tangan dan kaki. Rata-rata *error* tangan kanan pada P_x sebesar 0,12 mm, pada P_z sebesar 0,02 mm. Rata-rata *error* pada posisi P_x dan p_z untuk tangan kiri sebesar 0,06 mm.
- b. Analisis *inverse kinematics* pada kaki dilakukan 2 kali yaitu ditinjau pada sumbu x,z dan pada sumbu y,z . Untuk kaki kanan rata-rata *error* saat di tinjau dari sumbu x, z , untuk P_x sebesar 3,1 mm pada P_z sebesar 0,22 mm, sedangkan pada kaki kiri rata-rata *error* posisi pada P_x adalah 3,60 mm dan pada P_z adalah 0,27 mm. Saat ditinjau dari sumbu y,z rata-rata *error* pada posisi P_y dan P_z untuk kaki kanan adalah 0,12mm dan 0,25mm. Sedangkan pada kaki kiri, nilai rata-rata *error* posisi pada P_y sebesar 1,43 mm dan P_z sebesar 0,61mm.
- c. Pengujian *walking gait* pada robot Bioloid terdapat kemiringan sudut yang menyebabkan robot tidak dapat berjalan lurus ke depan, saat berjalan selama 20 detik dengan jarak 14 cm terdapat kemiringan sudut $11,3^\circ$, saat berjalan selama 40 detik dengan jarak 14 cm sebesar $14,7^\circ$, saat berjalan selama 60 detik dengan jarak 39,6 cm sebesar $26,1^\circ$ dan saat berjalan selama 80 detik kemiringan sudut dari sumbu normal sebesar $36,9^\circ$.
- d. Pendekatan interpolasi polinomial orde 3 pada trayektori sudut sudah dapat digunakan untuk implementasi pola berjalan robot Bioloid.

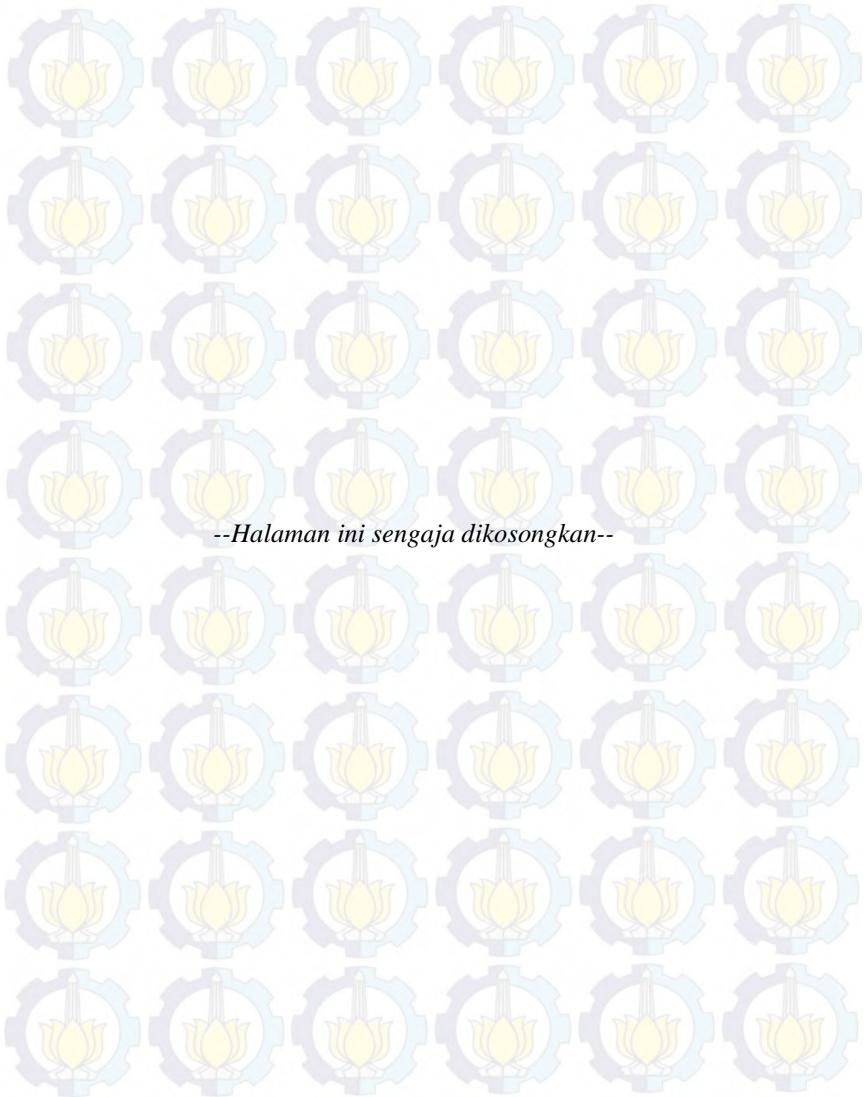
5.2 Saran

Berdasarkan pembelajaran yang telah dilakukan pada Tugas Akhir ini, ada beberapa hal yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya, yaitu:

- a. Untuk melakukan analisis kinematika dapat dibandingkan dengan menggunakan pendekatan yang lain sehingga metode yang digunakan dapat lebih bervariasi dan dapat digunakan sebagai perbandingan.
- b. Untuk menjaga keseimbangan pada robot, sensor yang telah terpasang pada robot dapat diaktifkan sehingga implementasi gerak pada robot lebih variatif.

DAFTAR PUSTAKA

- 
- [1] Md. Akhtaruzzaman, Amir A Shafie. "Geometrical Analysis on BIOLOID Human System System Standing on Single Leg". Kuala Lumpur, Malaysia Department of Mechatronics Engineering, Kulliyah of Engineering, International Islamic University Malaysia (IIUM) 53100 , 2011.
- [2] W.Spong, Mark. Robot Dynamic and Control. 2004.
- [3] Rosen, Jacob. "Inverse Manipulator Kinematics." Department of Mechanical & Aerospace Engineering – UCLA.
- [4] Erik Cuevas, Daniel Zaldívar, Raúl Rojas."Dynamic Control Algorithm For A Biped Robot".
- [5] Levy, Doron. Introduction to Numerical Analysis. Center for Scientific Computation and Mathematical Modeling (CSCAMM), 2010.
- [6] Unknown. Robotis Premium. Republic of Korea. 2007



LAMPIRAN

a. Program Kaki kanan

```
% Inisialisai antar link berdasarkan Tabel DH Parameter Right leg
%Li = link([alpha a theta d R/P
%1
Lbf = link([pi 38 -pi/2 0 0]);
%2
L7 = link([-pi/2 0 pi/2 31 0]);
%3
L9 = link([-pi/2 0 -pi/2 0 0]);
%4
L11 = link([pi/2 75 0 14.5 0]);
%5
L13 = link([0 76.4 -pi*0.074 0 0]);
%6
L15 = link([-pi/2 0 pi*0.074 0 0]);
%7
L17 = link([0 29.5 0 0 0]);

bioloid=robot({Lbf L7 L9 L11 L13 L15 L17});
bioloid.name='right leg'

q0=[-pi/2 pi/2 -pi/2 0 -pi*0.074 pi*0.074 0];
q1=[-pi/2 pi/2 -pi*0.6081 0 pi*0.0129 pi*0.09526 0];
q2=[-pi/2 pi/2 -pi*0.457 0 -pi*0.0307 -pi*0.0119 0];
q3=[-pi/2 pi/2 -pi*0.6081 0 pi*0.0129 pi*0.09526 0];

t=(0 : 100 : 2000) % sampling waktu
jt=jtraj(q2,q3,t)
plot(bioloid, q0)
drivebot(bioloid);
```

b. Program Kaki Kiri

```
%joint %alpha %a %theta %d %type
```

```
L1 = link([ pi -38 pi/2 0 0 ]);
```

```
L2 = link([ pi/2 0 -pi/2 31 0 ]);
```

```
L3 = link([ -pi/2 0 pi/2 0 0 ]);
```

```
L4 = link([ pi/2 -75 0 14.5 0 ]);
```

```
L5 = link([ 0 -76.4 -0.074*pi 0 0 ]);
```

```
L6 = link([ -pi/2 0 0.074*pi 0 0 ]);
```

```
L7 = link([ 0 -29.5 0 0 0 ]);
```

```
q0=([-pi/2 pi/2 -pi/2 0 0.074*pi -0.074*pi 0])
```

```
q1=([-pi/2 pi/2 -pi*0.542 0 0.0307*pi 0.0119*pi 0])
```

```
q2=([-pi/2 pi/2 -pi*0.391 0 -0.012*pi -0.0952*pi 0])
```

```
q3=([-pi/2 pi/2 -pi*0.542 0 0.0307*pi 0.0119*pi 0])
```

```
R=robot({L1 L2 L3 L4 L5 L6 L7});
```

```
R.name='Left Leg';
```

```
t=(0 : 100 : 2000) % sampling waktu
```

```
jt=jtraj(q2,q3,t)
```

```
%T=fkine(R, q2)
```

```
%plot(R,q2)
```

```
%drivebot(R);
```

c. Program Tangan Kanan

```
%joint %alpha %a %theta %d %type
L1 = link([ pi -38 pi/2 0 0 ]);
L2 = link([ pi/2 0 -pi/2 31 0 ]);
L3 = link([ -pi/2 0 pi/2 0 0 ]);
L4 = link([ pi/2 -75 0 14.5 0 ]);
L5 = link([ 0 -76.4 -0.074*pi 0 0 ]);
L6 = link([ -pi/2 0 0.074*pi 0 0 ]);
L7 = link([ 0 -29.5 0 0 0 ]);
```

```
q0=[-pi/2 pi/2 -pi/2 0 0.074*pi -0.074*pi 0]
```

```
q1=[-pi/2 pi/2 -pi*0.542 0 0.0307*pi 0.0119*pi 0]
```

```
q2=[-pi/2 pi/2 -pi*0.391 0 -0.012*pi -0.0952*pi 0]
```

```
q3=[-pi/2 pi/2 -pi*0.542 0 0.0307*pi 0.0119*pi 0]
```

```
R=robot({L1 L2 L3 L4 L5 L6 L7});
```

```
R.name='Left Leg';
```

```
t=(0 : 100 : 2000) % sampling waktu
```

```
jt=jtraj(q2,q3,t)
```

```
%T=fkine(R, q2)
```

```
%plot(R,q2)
```

```
%drivebot(R);
```

d. Program Tangan Kiri

```
%joint %alpha %a %theta %d %type
```

```
L1 = link([ -pi/2 0 pi 70 0 ]);
```

```
L2 = link([ pi/2 14.5 0 25 0 ]);
```

```
L3 = link([ 0 67.5 pi/2 0 0 ]);
```

```
L4 = link([ 0 74.5 pi 0 0 ]);
```

```
q0=( [0 pi/2 0 0] )
```

```
q1=( [0 0.6035*pi 0 0] );
```

```
q2=( [0 0.3965*pi 0 0] );
```

```
R=robot({L1 L2 L3 L4});
```

```
R.name='Left hand';
```

```
T=fkine(R,q2)
```

```
plot(R,q2)
```

```
drivebot(R);
```

e. Program Implementasi

The screenshot displays the RoboPlus Motion software interface. The main window shows a sequence of steps in a table, with a detailed view of the 'Page Parameters' for the selected step.

Name	Next	Exit
50 F_M_L_2_26/11/mirrorf...	51	0
51 F_M_R_1_26/11/15 fix	52	0
52 F_M_R_2_26/11/15 fix	49	0
53	0	0
54	0	0
55 F_S_L_2_27/11/15 fix	56	0
56 F_S_R_2_27/11/15 fix	57	0
57 F_M_L_1_27/11/15 m...	58	0
58 F_M_L_2_27/11/15 m...	59	0
59 F_M_R_1_27/11/15 m...	60	0
60 F_M_R_2_27/11/15 m...	57	0
61	0	0
62	0	0
63	0	0
64	0	0
65	0	0
66	0	0
67	0	0
68	0	0
69	0	0
70	0	0
71	0	0
72	0	0
73	0	0
74	0	0
75	0	0
76	0	0
77	0	0
78	0	0

STEP	Pause	Time
STEP 0	0	
STEP 1	0	0,296
STEP 2	0	0,296
STEP 3	0	0,296
STEP 4	0	0,296
STEP 5	0	0,296
STEP 6	0	0,296

Page Parameters

Repeat time: 1

Speed rate: 2.1

Ctrl Inertial force: 5

Real Play Time
 $(2.072\text{sec} / 2.1) \times 1 = 0.987\text{sec}$

[Joint Softness]

ID	Level
ID[1]	7
ID[2]	7
ID[3]	5
ID[4]	5
ID[5]	5
ID[6]	5
ID[7]	5
ID[8]	5
ID[9]	5
ID[10]	5
ID[11]	5
ID[12]	5
ID[13]	5

Ready



RIWAYAT PENULIS



Praditya Handi Setiawan

Penulis dilahirkan di Surabaya pada tanggal 19 Desember 1991. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Muhammadiyah (1998-2004), SMPN 1 Taman (2004-2007), SMA Negeri 6 Surabaya (2007-2010) dan D3 Jurusan Teknik Telekomunikasi Politeknik Elektronika Negeri Surabaya (2010-2013) Selanjutnya terdaftar di Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan bidang studi Teknik Sistem Pengaturan.

Contact Person :

Email : radithandi@gmail.com