

PENGEMBANGAN PROTOTIPE ROBOT MANIPULATOR DAN SISTEM MONITORING BERBASIS DEEP LEARNING



PROPOSAL SKRIPSI

PUTU HERDY KURNIAWAN
ABDULLAH GHULLAM RAFLIANSYAH

444 19 020
444 19 002

PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN TEKNIK MEKATRONIKA
JURUSAN TEKNIK MESIN
POLITEKNIK NEGERI UJUNG PANDANG
MAKASSAR
2023

HALAMAN PERSETUJUAN

Proposal skripsi ini dengan judul "Pengembangan Prototipe Robot Manipulator dan Sistem Monitoring berbasis *Deep Learning*" oleh Putu Herdy Kurniawan NIM 444 19 020 dan Abdullah Ghullam Rafliansyah NIM 444 19 002 dinyatakan layak untuk diseminarkan.


Makassar, 16 Februari 2023

Mengetahui
Koordinator Program Studi



Dr. Ir. Simon Ka'ka, M.T
NIP. 19590913 198803 1 001

Menyetujui,
Dosen Pengarah,




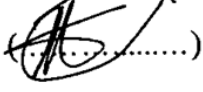
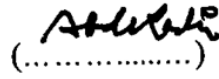
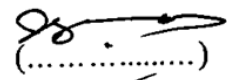
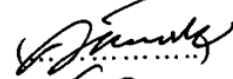

Ir. Remigius Tandoga, M.Eng.Sc.
NIP. 19621210 199003 1 005

HALAMAN PENERIMAAN

Pada hari ini, hari Kamis tanggal 16 Februari 2023, tim penguji seminar proposal skripsi telah menerima hasil seminar proposal skripsi oleh mahasiswa: Putu Herdy Kurniawan NIM 444 19 020 dan Abdullah Ghullam Rafliansyah NIM 444 19 002 dengan judul “Pengembangan Prototipe Robot Manipulator dan Sistem Monitoring berbasis *Deep Learning*”.

Makassar, 16 Februari 2023

Tim Seminar Proposal Skripsi:

1. Mukhtar, S.Pd., M.Eng.	Ketua	 (.....)
2. Firman Hamzah, S.T., M.T.	Sekretaris	 (.....)
3. Dr.Eng. Abdul Kadir Muhammad, S.T., PG.Dipl., M.Eng.	Anggota	 (.....)
4. Prof. A.M. Shiddiq Yunus, S.T., M.Eng.Sc., Ph.D.	Anggota	 (.....)
5. Dr. Ir. Simon Ka'ka, M.T.	Anggota	 (.....)
6. Ir. Remigius Tandioga, M.Eng.Sc.	Pengarah	 (.....)

DAFTAR ISI

	hlm.
HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN PERSETUJUAN.....	ii
HALAMAN PENERIMAAN	iii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR TABEL.....	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
BAB I: PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Ruang Lingkup Penelitian.....	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II: TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Pengantar Robotika	5
2.2 Pengantar Manipulasi dalam Robotika.....	5
2.3 Konsep Dasar Robot Manipulator.....	7
2.4 Bagian-bagian Robot Manipulator	8
2.5 Konsep Kinematika Robot Manipulator.....	9
2.6 Matriks Transformasi <i>Homogenous</i>	13
2.7 Motor Servo Dynamixel AX-12A.....	14
2.8 Motor Servo MG996R.....	16
2.9 Motor Servo SG90	18
2.10 Raspberry Pi.....	19
2.11 <i>Shield</i> Kontroler Dynamixel	22

2.12 <i>End Effector</i>	23
2.13 Tinjauan Penelitian Sebelumnya.....	24
BAB III: METODE PENELITIAN	27
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	27
3.2 Alat dan Bahan	28
3.3 Langkah Kerja	30
3.4 Langkah-langkah Pengujian Alat	42
3.5 Teknik Analisis Data	43
DAFTAR PUSTAKA	45
LAMPIRAN	47

DAFTAR TABEL

	hlm.
Tabel 2.1 Spesifikasi Utama Dynamixel AX-12A.....	15
Tabel 2.2 Spesifikasi Motor Servo MG996R.....	17
Tabel 2.3 Spesifikasi Motor Servo SG90.....	18
Tabel 2.4 Spesifikasi Raspberry Pi 4 Model B	20
Tabel 2.5 Spesifikasi Dynamixel <i>Shield</i>	23
Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian	27
Tabel 3.2 Alat yang Digunakan pada Penelitian.....	28
Tabel 3.3 Bahan yang Dibutuhkan dalam Penelitian	29

DAFTAR GAMBAR

	hlm.
Gambar 2.1 Bagian-bagian Robot Manipulator	9
Gambar 2.2 <i>Inverse Kinematic</i> 3 DOF.....	11
Gambar 2.3 Sambungan antar <i>Link</i> dan Parameternya	12
Gambar 2.4 Matriks Homogen (4 x 4).....	13
Gambar 2.5 Matriks Rotasi (3 x 3).....	14
Gambar 2.6 Dynamixel AX-12A	15
Gambar 2.7 Motor Servo MG996R	16
Gambar 2.8 Motor Servo SG90	18
Gambar 2.9 Raspberry Pi 4 Model B.....	19
Gambar 2.10 Dynamixel <i>Shield</i>	22
Gambar 2.11 <i>End Effector</i> sebagai <i>Gripper</i>	23
Gambar 2.12 <i>End Effector</i> sebagai <i>Tools (Welding)</i>	24
Gambar 2.13 Robot Manipulator pada Penelitian Pertama.....	25
Gambar 2.14 Robot Manipulator pada Penelitian Kedua	26
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	32
Gambar 3.2 Matriks Rotasi Mengelilingi Sumbu Z.....	33
Gambar 3.3 Matriks Rotasi Mengelilingi Sumbu Y	34
Gambar 3.4 Matriks rotasi mengelilingi sumbu X.....	35
Gambar 3.5 1 DOF Manipulator	36
Gambar 3.6 2 DOF Manipulator	37
Gambar 3.7 3 DOF Manipulator	39

Gambar 3.8 Diagram Skematik Alat.....	41
Gambar 3.9 Diagram Alir Percobaan Robot.....	42
Gambar 3.10 Diagram Blok Pengontrolan.....	43
Gambar 3.11 Desain Robot Manipulator	43
Gambar 3.12 Dimensi Robot Manipulator dalam Satuan Milimeter	44

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di era modern saat ini, kemajuan industri mengarah pada otomatisasi produksi. Otomatisasi industri merupakan suatu proses memanfaatkan teknologi dan sistem kontrol untuk mengoptimalkan dan mempercepat proses produksi dan operasi industri. Otomatisasi industri melibatkan penggunaan peralatan mekanik dan elektronik, termasuk robot industri, sistem pemrosesan data, sistem kontrol proses, dan teknologi sensor, untuk mengendalikan dan memantau proses produksi dan operasi. Tujuan dari otomatisasi industri adalah untuk meningkatkan produktivitas, efisiensi, dan kualitas produk serta meminimalkan margin kegagalan dan waktu berhenti (*down-time*) mesin. Otomatisasi industri juga membantu mengurangi biaya dan memperbaiki keselamatan kerja bagi pekerja yang bekerja dengan mesin dan peralatan. Otomatisasi produksi memberi kontribusi terhadap efisiensi dan peningkatan kualitas produk yang dihasilkan.

Salah satu elemen utama dari otomatisasi industri adalah penggunaan sistem robotika yang terdiri dari manipulator mekanis dan sistem kontrol. Kelebihan dari menggunakan robot manipulator yaitu dapat mengurangi biaya produksi. Namun, kelemahannya adalah harga robot manipulator saat ini sangat mahal, namun hal tersebut dapat diatasi dengan jumlah produksi yang meningkat (Goryanina et al., 2018:1).

Robot Manipulator pertama kali ditemukan pada awal tahun 1950-an oleh George Charles Devol, seorang penemu dari Louisville, Kentucky. Dia berhasil membuat penemuan dan mematenkan sebuah manipulator yang dapat diprogram

ulang bernama “Unimate” dari “Universal Automation”. Kemudian selama satu dekade, Devol berusaha untuk menjual produknya di industri tetapi tidak berhasil. Pada tahun 1960-an, seorang pebisnis dan juga insinyur bernama Joseph Frederick Engleberger akhirnya membeli paten robot yang dimiliki oleh Devol. Engleberger berhasil memodifikasinya menjadi sebuah robot industri dan membentuk perusahaan bernama Unimation Inc. untuk memproduksi dan memasarkan robotnya. Karena kesuksesan itu, Engleberger dikenal dalam industri sebagai “Bapak Robotika”.

Dalam robotika, manipulator adalah sebuah alat yang digunakan untuk memanipulasi material/obyek tanpa melakukan kontak fisik secara langsung oleh operator. Awalnya penggunaannya ditujukan untuk menangani bahan radioaktif dan bahan kimia berbahaya, atau untuk digunakan di tempat yang sulit diakses. Saat ini robot manipulator telah digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti otomatisasi pengelasan, bedah menggunakan robot, aplikasi luar angkasa, hingga industri manufaktur.

Pada tahun 2021, terjadi peningkatan yang signifikan terhadap volume instalasi robot industri global sehingga menyebabkan rekor baru dalam peningkatan jumlah instalasi robot industri sepanjang sejarah. Hal ini diungkapkan oleh *International Federation of Robotics* (IFR) dalam laporan terbarunya *World Robotics 2022* (International Federation of Robotics, 2022:9).

Pada Program Studi Sarjana Terapan Teknik Mekatronika, Politeknik Negeri Ujung Pandang. Robot Manipulator telah dibuat oleh peneliti sebelumnya yang bernama Andi Baso dan John Michael Adiputra pada tahun 2017, namun belum

dilengkapi sistem monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT) maupun *Deep Learning*. Selain itu, robot yang telah dibuat pada penelitian tersebut juga menggunakan PCB buatan sendiri yang kurang andal (*not reliable*) dan tidak tahan lama (*not durable*). Hal ini menyebabkan sistem kontrol dan pengembangan menjadi lebih sulit karena harus mengganti PCB yang sudah ada. Perlu adanya modul yang lebih solid dan tahan lama (*durable*) serta mudah dikonfigurasi, sehingga mudah dikembangkan dan mudah dilakukan eksperimen terus menerus oleh peneliti selanjutnya. Maka dari itu perlu adanya pengembangan pada sistem elektronik dan kontrolnya, serta menambahkan IoT pada sistem monitoring robot manipulator ini.

Berdasarkan latar belakang di atas, maka penulis membuat tugas akhir dengan judul “Pengembangan Robot Manipulator dan Sistem Monitoring”. Prototipe robot manipulator yang dibuat terdiri dari 5 *Degree of Freedom* (DOF) dengan memperkuat sistem kontrol serta meningkatkan teknologi sistem monitoringnya.

Robot manipulator dan sistem monitoring saat ini menjadi hal yang penting dalam berbagai bidang, termasuk industri, pertanian, dan rumah tangga. Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk mengembangkan sebuah robot manipulator yang efisien dan berkualitas, serta sistem monitoring untuk memantau aktivitas robot tersebut.

Melalui penelitian dan pengembangan ini, diharapkan dapat memberikan solusi bagi masalah yang terjadi dalam pemanfaatan robot manipulator saat ini, sekaligus meningkatkan efisiensi dan akurasi dari sistem monitoring. Hasil akhir

dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan sumbangsih bagi pengembangan robot manipulator dan sistem monitoring pada masa yang akan datang.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dibahas adalah, sebagai berikut:

1. Bagaimana meningkatkan sistem mekanik, elektronik dan kontrol robot manipulator?
2. Bagaimana mengembangkan sistem monitoring robot manipulator?

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Adapun ruang lingkup penelitian dibuat agar dalam pengerjaan proyek akhir ini dapat berjalan dengan baik antara lain sebagai berikut:

1. Pengembangan robot manipulator dalam bentuk prototipe.
2. Pengembangan sistem kontrol robot manipulator 5 DOF.
3. Pengembangan sistem monitoring robot manipulator 5 DOF yang berbasis *Deep Learning*.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Meningkatkan sistem elektronik dan kontrol robot manipulator.
2. Mengembangkan sistem monitoring robot manipulator.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat memberikan solusi bagi masalah yang terjadi dalam pemanfaatan robot manipulator.

2. Dapat melengkapi media pembelajaran praktikum robotika.
3. Dapat digunakan sebagai media pembelajaran mata kuliah Praktikum Robotika.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengantar Robotika

Robot adalah perangkat mekanis yang dapat dikendalikan secara otomatis melalui komputer atau pengontrol lainnya untuk melakukan berbagai tugas dan operasi. Robot dapat dibedakan menjadi berbagai jenis, termasuk robot industri, robot mobil, dan robot pribadi.

Robot industri digunakan dalam berbagai industri untuk melakukan tugas seperti pengelasan, pemotongan, dan pembuatan produk. Robot mobil digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk pengangkutan, pemetaan, dan pembersihan. Sedangkan robot pribadi digunakan untuk berbagai keperluan seperti asisten rumah tangga, hiburan, dan pengajaran.

Robot dapat dilengkapi dengan berbagai sensor dan peralatan, seperti kamera, mikrofon, dan alat ukur, yang memungkinkan mereka untuk menerima masukan (*input*) dari lingkungan dan melakukan tugas yang lebih kompleks. Robot juga dapat dikendalikan dengan berbagai metode, termasuk perintah suara, perintah sentuh, dan perintah komputer.

Secara umum, robot digunakan untuk meningkatkan efisiensi, menurunkan biaya, dan meningkatkan kualitas dalam berbagai bidang, mulai dari industri hingga rumah tangga.

2.2 Pengantar Manipulasi dalam Robotika

Manipulasi adalah suatu proses menggunakan tangan untuk mengatur ulang lingkungan seseorang. Manipulasi dapat dikatakan merupakan sebuah seni, teknik,

dan juga sekaligus sebuah disiplin ilmu. Disebut seni karena itu dipraktikkan oleh semua orang, tanpa pemahaman yang sistematis serta mendasar. Disebut disiplin teknik karena ada beberapa alat sistematis untuk menerapkan manipulasi robot ke berbagai masalah. Disebut disiplin ilmu karena merupakan proses yang melibatkan keingintahuan manusia yang dapat dipelajari melalui metode ilmiah (Mason, 2001:1).

Manipulasi lebih dari sekedar hanya mengambil sesuatu dan memindahkannya ke tempat lain. Masalah mengenai “Mengambil dan Menempatkan” merupakan suatu aplikasi yang sangat baik pada manipulasi robot. Robot telah melakukan ini selama beberapa dekade di pabrik-pabrik. Namun dalam praktiknya, tidak ada sistem manipulasi robot yang canggih hingga saat ini yang menggunakan teori kontrol yang ketat untuk merancang atau bahkan memberikan umpan balik tingkat rendah yang menentukan kapan robot membuat dan memecahkan kontak dengan objek yang dimanipulasi, sehingga menyebabkan pergerakan serta dinamika kontrol robot manipulator dapat menjadi lebih halus (Tedrake, 2022:7).

Lengan robot pada umumnya terdiri dari bahu, persendian dan tangan yang bisa berupa sebuah *gripper* atau tangan yang memiliki jari seperti halnya tangan manusia sebagai pengambil objek. Bagian tangan robot dikenal sebagai manipulator tangan, yaitu sistem gerak yang berfungsi untuk manipulasi (memegang, mengambil, mengangkat, memindahkan, mengolah) objek. Untuk melakukan pengambilan objek lengan robot ini dilengkapi dengan *end-effector* (*gripper*) yang berupa jari-jari seperti halnya jari manusia. Lengan robot didesain agar dapat mengikuti gerak sesuai dengan gerakan yang dilakukan oleh gerakan

lengan manusia, *input* pengontrol dibuat dengan potensiometer untuk persendian lengan dan *flex Sensor* yang diletakkan pada jari-jari manusia dengan cara membuat pengendali yang sesuai dengan bentuk lengan dan jari-jari manusia agar dapat digunakan sebagai penggerak sendi-sendi pada lengan robot (Muslimin dkk., 2014:8).

2.3 Konsep Dasar Robot Manipulator

Manipulator merupakan sistem mekanik yang menunjukkan pergerakan dari robot. Sistem mekanik ini terdiri dari susunan *link* (rangka) dan *joint* (engsel) yang mampu menghasilkan gerakan yang terkontrol, sebagai rangkaian umpan balik terbuka maupun rangkaian umpan balik tertutup yang dihubungkan dengan sendi-sendi dan dapat melakukan gerakan-gerakan secara bebas.

Manipulator robot adalah sebuah perangkat atau mesin yang digunakan untuk memindahkan atau menangani objek. Manipulator robot biasanya terdiri dari sekumpulan lengan mekanis yang dapat digerakkan dengan menggunakan motor atau hidrolik. Manipulator robot digunakan dalam berbagai bidang, seperti industri, pembuatan, dan pengiriman.

Derajat kebebasan atau juga sering disebut *Degree of Freedom* (DOF) suatu robot merupakan jumlah gerakan independen yang dapat dilakukan oleh *manipulator* terhadap sistem koordinat yang dapat menyebabkan perubahan posisi atau orientasi manipulator, dalam hal ini dimaksud dengan robot manipulator (Muhammad dkk., 2016: 2).

Robot tangan dengan 5 DOF biasanya memiliki lima sendi, yang memungkinkannya untuk bergerak dalam lima cara yang berbeda. Lima sendi ini

memungkinkan tangan robot untuk bergerak pada sumbu x, y, dan z, serta berputar pada dua sumbu tambahan.

Tiga sendi pertama, yang disebut sendi bahu, siku, dan pergelangan tangan, memungkinkan tangan robot untuk bergerak pada sumbu x, y, dan z secara masing-masing. Sendi-sendi ini memungkinkan tangan robot untuk bergerak ke atas dan ke bawah, ke kiri dan ke kanan, serta ke depan dan ke belakang.

Sendi keempat, yang disebut sendi putar pergelangan tangan, memungkinkan tangan robot untuk berputar di sekitar sumbu z. Sendi ini memungkinkan tangan robot untuk memutar alat atau *gripper* di ujung tangannya.

Sendi kelima, yang disebut sendi pada *gripper*, memungkinkan alat atau *gripper* di ujung tangan robot untuk dibuka dan ditutup. Sendi ini memungkinkan tangan robot untuk memegang dan memanipulasi benda.

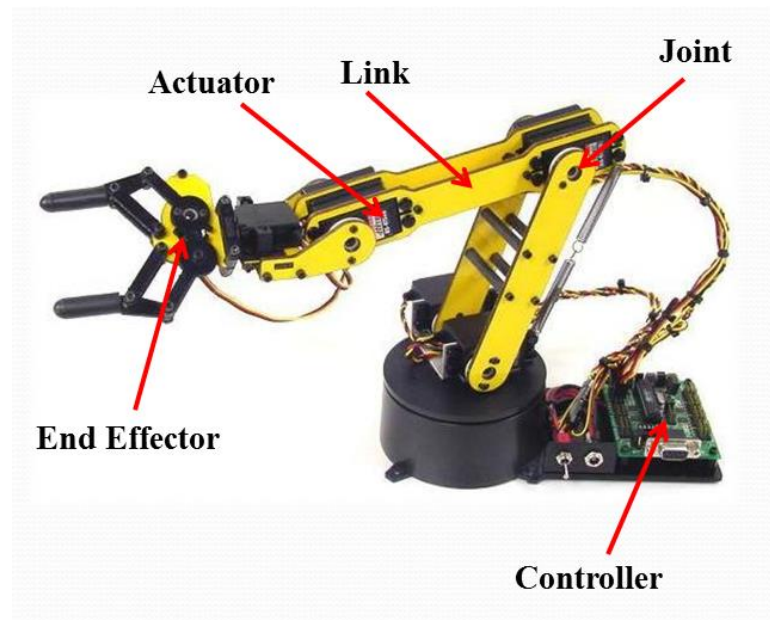
Robot manipulator dengan 5 DOF memungkinkan jangkauan gerak yang lebih luas dan serbaguna, sehingga dapat melakukan berbagai tugas, seperti mengambil dan meletakkan, mengelas, mengecat, dan menyusun bagian-bagian kecil.

2.4 Bagian-Bagian Robot Manipulator

Secara umum manipulator lengan robot terdiri dari:

1. *Joint* (sendi) yaitu koneksi antar *link* yang dapat menentukan pergerakan.
2. *Link* merupakan bagian-bagian kerangka yang kaku yang dihubungkan secara bersamaan sehingga membentuk suatu rangkaian kinematik.
3. *Controller* merupakan bagian dari sistem yang berfungsi untuk mengatur semua kegiatan yang terjadi pada robot.

4. *Actuator* merupakan media penggerak lengan robot. Bisa berupa motor servo, motor DC, dan sebagainya.
5. *End Effector* merupakan aktuator tambahan yang digunakan untuk memegang dan menahan sebuah objek serta dapat digunakan sebagai peralatan-peralatan (*tools*) dalam melakukan operasi tertentu.



Gambar 2.1 Bagian-bagian Robot Manipulator
(Sumber: Baso, 2017)

2.5 Konsep Kinematika Robot Manipulator

Kinematika dalam robotika adalah cabang dari ilmu mekanika yang mempelajari gerak dan posisi suatu objek tanpa memperhatikan penyebab gerak tersebut. Dalam hal ini, objek yang dibahas adalah robot dan bagaimana robot bergerak dan mencapai posisi yang diinginkan.

Ilmu kinematika menggunakan representasi matematis untuk menggambarkan konfigurasi dan gerakan robot. Beberapa konsep yang sering digunakan dalam kinematika termasuk:

1. Transformasi Ruang: Kinematika mempelajari bagaimana mengubah posisi dan orientasi suatu objek dalam ruang. Ini dilakukan dengan menggunakan transformasi seperti translasi dan rotasi.
2. Analisis Jari-jari: Jari-jari adalah garis yang menghubungkan titik tetap pada suatu objek dengan titik yang bergerak pada objek tersebut. Analisis jari-jari mempelajari bagaimana jari-jari terkait dengan gerakan robot.
3. Interpolasi Gerak: Interpolasi adalah teknik untuk memperkirakan posisi dan orientasi suatu objek pada waktu tertentu berdasarkan posisi dan orientasi saat ini dan posisi dan orientasi yang diinginkan.
4. Analisis Denavit-Hartenberg (DH): Analisis ini menggunakan representasi matematis untuk menggambarkan konfigurasi robot, termasuk posisi dan orientasi jari-jari dan bidang pengait.

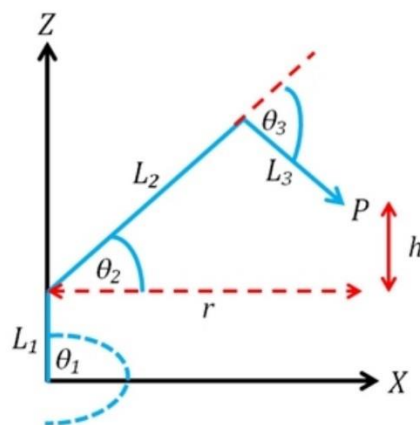
Kinematika memiliki aplikasi penting dalam pemrograman robot dan membantu dalam menentukan bagaimana robot harus bergerak untuk mencapai tujuannya. Misalnya, kinematika dapat membantu dalam memecahkan masalah seperti menentukan jarak dan arah yang harus ditempuh oleh robot untuk mencapai suatu titik tertentu, atau menentukan bagaimana robot harus bergerak untuk melakukan tugas tertentu seperti memegang benda.

Mengenai kinematika dan dinamika pada robot, terdapat penjelasan yang representatif dikemukakan oleh Herizon dan Ade Diana (2014: 67) di bawah ini.

Kinematika dapat dianalisis dalam dua kajian, yaitu analisa kinematik dan analisa dinamik. Analisa kinematik berkaitan dengan gerakan robot tanpa memandang efek inersia yang terjadi ketika robot melakukan gerakan,

sedangkan analisa dinamik berhubungan dengan efek inersia dari struktur robot secara fisik hasil dari gerakan yang ditimbulkan oleh torsi aktuator ketika robot sedang melakukan pergerakan.

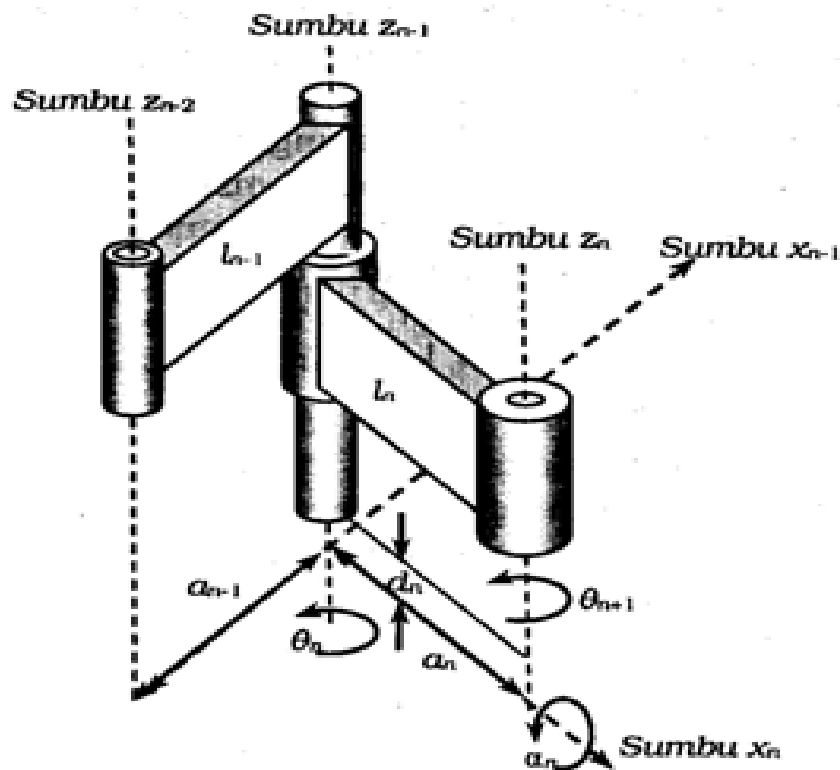
Langkah awal yang dilakukan untuk mendapatkan formulasi robot manipulator 5 DOF yaitu membuat formulasi *inverse kinematic* (kinematik mundur) robot manipulator 3 DOF untuk mendapatkan θ_1 , θ_2 , dan θ_3 (Taufik dkk., 2017:205).



Gambar 2.2 *Inverse Kinematic* 3 DOF
(Sumber: Taufik, 2017)

Model kinematika robot manipulator dapat ditentukan dengan menggunakan metode Denavit-Hertenberg. Prinsip dasar metode ini adalah melakukan transformasi koordinat antar dua *link* yang berdekatan. Hasilnya adalah suatu matriks (4x4) yang menyatakan sistem koordinat dari suatu *link* dengan *link* yang terhubung pada pangkalnya (*link* sebelumnya). Dalam konfigurasi serial, koordinat (ujung) *link*-1 dihitung berdasarkan sendi-0 atau sendi pada tubuh robot. Sistem koordinat *link*-2 dihitung berdasarkan posisi sendi-1 yang berada diujung *link*-1 dengan mengasumsikan *link*-1 adalah basis gerakan *link*-2. Demikian seterusnya, *link*-3 dihitung berdasarkan *link*-2, hingga *link* ke-n dihitung

berdasarkan *link*-($n-1$). Dengan cara ini maka tiap langkah perhitungan atau transformasi hanya melibatkan sistem 1-DOF saja. Terakhir, posisi koordinat lengan atau posisi ujung robot/*end-effector* akan dapat diketahui.



Gambar 2.3 Sambungan antar *Link* dan Parameternya
(Sumber: Cahyono, 2015)

Gambar di atas mengilustrasikan dua buah *link* yang terhubung secara seri. Konfigurasi hubungan dapat berupa sendi rotasi ataupun sendi translasi. Dalam hal ini, metode Denavit-Hartenberg (DH) menggunakan 4 buah parameter, yaitu θ , α , d dan a . Untuk robot n -DOF maka keempat parameter tersebut ditentukan hingga yang ke- n . Penjelasannya yaitu:

- θ_n adalah sudut putaran pada sumbu z_{n-1} ,
- α_n adalah sudut putaran pada sumbu x_n ,

- d_n adalah translasi pada sumbu z_{n-1} , dan
- a_n adalah translasi pada sumbu x_n .

2.6 Matriks Transformasi *Homogeneous*

Berikut bagian-bagian yang penting tentang transformasi *homogeneous*. Matriks rotasi 3x3 yang sebelumnya tidak dapat digunakan untuk menunjukkan pergeseran dari suatu posisi (translasi) dan penskalaan, untuk itu dibutuhkan sebuah matriks baru yang bisa merepresentasikan pergeseran sekaligus penskalaan. Matriks transformasi *homogeneous* merupakan sebuah matriks 4x4. Matriks ini dapat memetakan sebuah vektor posisi yang diekspresikan dalam koordinat *homogeneous* dari suatu sistem koordinat ke sistem koordinat lainnya. Sebuah matriks transformasi *homogeneous* terdiri dari 4 sub-matriks (Fu dkk., 1987).

- Matrik Homogen (4 x 4)

$$T_H = \left[\begin{array}{ccc|c} C1 & -S1 & 0 & x_1 \\ S1 & C1 & 0 & y_1 \\ 0 & 0 & 1 & z_1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

Gambar 2.4 Matriks Homogen (4 x 4)

Sub matriks 3x3 yang terletak di kiri atas merepresentasikan matriks rotasi, sub matriks 3x1 di bagian kanan atas merepresentasikan vektor posisi dari sistem koordinat asal yang dirotasi mengacu pada sistem koordinat referensi. Sub matriks 1x3 di bagian bawah kiri merepresentasikan transformasi perspektif, dan terakhir sub matriks 1x1 yang terletak di bagian kanan bawah adalah matriks yang merepresentasikan faktor penskalaan. Selanjutnya sebuah matriks rotasi 3x3 bisa

diperluas menjadi matriks transformasi *homogeneous* 4x4 yang dilambangkan dengan T_{rot} .

- Matrik Rotasi (3 x 3)

$$T_1 = \begin{bmatrix} C1 & -S1 & 0 \\ S1 & C1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Gambar 2.5 Matriks Rotasi (3 x 3)

2.7 Motor Servo Dynamixel AX-12A

Motor Servo Dynamixel AX-12A merupakan aktuator cerdas (*smart actuator*) karena pada masing-masing motor terdapat mikroprosesor yang menyediakan kemampuan komunikasi dengan kontroler, menyediakan informasi tentang posisi dan beban yang bekerja serta temperatur pada motor. Motor servo yang saat ini beredar di pasaran, paling tidak, ada dua varian yakni analog dan digital. Pada Skripsi ini, motor servo yang digunakan adalah motor servo Dynamixel AX-12A. Dynamixel AX-12A merupakan motor servo cerdas yang memiliki torsi hingga 12 kgf.cm dan dilengkapi kemampuan *networking* melalui antarmuka UART TTL half-duplex multidrop. Dynamixel AX-12A terdiri dari *reduction gear*, *precision* DC Motor, dan rangkaian kontrol yang telah dilengkapi dengan kemampuan komunikasi (*networking*) dalam satu kemasan. AX-12A merupakan versi terbaru dari AX-12+ dengan kemampuan yang sama tetapi dengan penambahan desain eksternal. Pada gambar 2.2 berikut ini adalah bentuk fisik Dynamixel AX-12A.



Gambar 2.6 Dynamixel AX-12A
(Sumber: Robotis, 2022)

Motor servo ini adalah jenis motor servo digital dengan fitur *daisy-chained*, yang mana satu servo dan yang lainnya, bisa dirangkai secara seri, *daisy-chained*. Masing-masing servo, yang memiliki ID yang unik, diperintah melalui satu jalur serial, dan tidak memerlukan sinyal kontrol yang kontinu (Caysar, 2014: 3).

Berikut ini adalah sajian spesifikasi utama dari servo Dynamixel AX-12A.

Tabel 2.1 Spesifikasi Utama Dynamixel AX-12A

Parameter	Spesifikasi
Baud Rate	7.843 [bps] ~ 1 [Mbps]
Berat	54,6 [g]
Resolusi	0.29 [°]
<i>Running Degree</i>	0 ~ 300 [°] Putaran Tak Terbatas
Rasio Roda Gigi	254 : 1
Voltase Masukan	9,0 ~ 12,0 [V] (Rekomendasi: 11,1 [V])
Torsi Maksimum	16,5 [Kgf.cm] atau 1,6 [Nm] (pada tegangan 10 [V])
Torsi <i>Stall</i>	1,5 [N.m] (pada tegangan 12 [V]. 1,5 [A])
Koneksi Fisik	TTL Level Multi Drop Bus Half Duplex Asynchronous Serial Communication (8 bit, 1 stop, Tanpa Paritas)
ID	254 ID (0 ~ 253)
Material Roda Gigi	<i>Engineering Plastic (Full)</i>
Material <i>Case</i>	<i>Engineering Plastic</i> (Depan, Tengah, Belakang)
Kecepatan Putar	114 [Rpm]

(Sumber: Robotis, 2022)

Dari tabel di atas dapat dihitung daya motor servo sebagai berikut:

$$P = \left(\frac{T \times N_s}{5252} \right)$$

$$P = \left(\frac{1.6 [Nm] \times 114 [Rpm]}{5252} \right)$$

$$P = 0,03 \text{ HP}$$

Dimana:

P = Daya motor [HP]

T = Torsi [Nm]

N_s = Kecepatan motor listrik (Rpm)

5252 = Nilai konstanta (ketetapan) untuk daya motor

2.8 Motor Servo MG996R



Gambar 2.7 Motor Servo MG996R
(Sumber: Components 101, 2019)

Motor servo MG996R adalah jenis motor servo standar yang digunakan dalam robotika dan kontrol sistem. Motor ini merupakan *metal gear* servo yang memiliki rotor DC dan stator dengan lilitan dan magnet dan yang dikendalikan oleh sinyal PWM. MG996R memiliki torsi yang tinggi dan akurasi posisi yang baik, dan bisa

berputar hingga 180 derajat. Motor ini biasanya digunakan dalam aplikasi seperti pengendalian kamera, mekanik, dan kontrol mesin.

Tabel 2.2 Spesifikasi Motor Servo MG996R

Parameter	Spesifikasi
Tegangan Operasi	5 [V]
Arus Maksimum	2.5 [A] pada tegangan 6 [V]
Torsi <i>Stall</i>	9.4 [Kgf.cm] pada tegangan 4.8 [V]
Torsi <i>Stall</i> Maksimum	11 [Kgf. cm] atau 1 [Nm] pada tegangan 6 [V]
Kecepatan Operasi	0.17 [s] / 60° atau 58 [Rpm]
Tipe Roda Gigi	<i>Metal</i>
Rotasi	0° – 180°
Berat Motor	55 [g]

(Sumber: Components 101, 2019)

Diasumsikan torsi *stall* maksimum sebagai torsi maksimum motor. Maka dapat dihitung daya motor sebagai berikut:

$$P = \left(\frac{T \times N_s}{5252} \right)$$

$$P = \left(\frac{1 [Nm] \times 58 [Rpm]}{5252} \right)$$

$$P = 0,011 HP$$

Dimana:

P = Daya motor [HP]

T = Torsi [Nm]

N_s = Kecepatan motor listrik (Rpm)

5252 = Nilai konstanta (ketetapan) untuk daya motor

2.9 Motor Servo SG90



Gambar 2.8 Motor Servo SG90
(Sumber: DatasheetPDF, 2014)

Motor servo SG90 adalah jenis motor servo mini yang sering digunakan dalam aplikasi robotika dan kontrol sistem. Motor ini memiliki rotor DC dan stator dengan lilitan magnet dan dikendalikan oleh sinyal PWM. SG90 memiliki torsi yang rendah dan akurasi posisi yang baik, serta dapat berputar hingga 180 derajat. Motor servo SG90 adalah pilihan yang baik untuk proyek yang membutuhkan motor servo kecil dan efisien.

Tabel 2.3 Spesifikasi Motor Servo SG90

Parameter	Spesifikasi
Tegangan Operasi	4,8 [V] (~5 [V])
Torsi <i>Stall</i>	1,8 [Kgf.cm] atau 0,17 [Nm] pada tegangan 4,8 [V]
Kecepatan Operasi	0,1 [s] / 60° atau 100 Rpm
Berat Motor	9 [g]
Dimensi	22,2 x 11,8 x 31 [mm] (<i>approx</i>)
Rentang Temperatur	0° [C] – 55° [C]
<i>Dead Band Width</i>	10 [μs]

(Sumber: DatasheetPDF, 2014)

Berdasarkan data pada tabel di atas dapat dihitung daya motor sebagai berikut:

$$P = \left(\frac{T \times N_s}{5252} \right)$$

$$P = \left(\frac{0,17 [Nm] \times 100 [Rpm]}{5252} \right)$$

$$P = 0,003 \text{ HP}$$

Dimana:

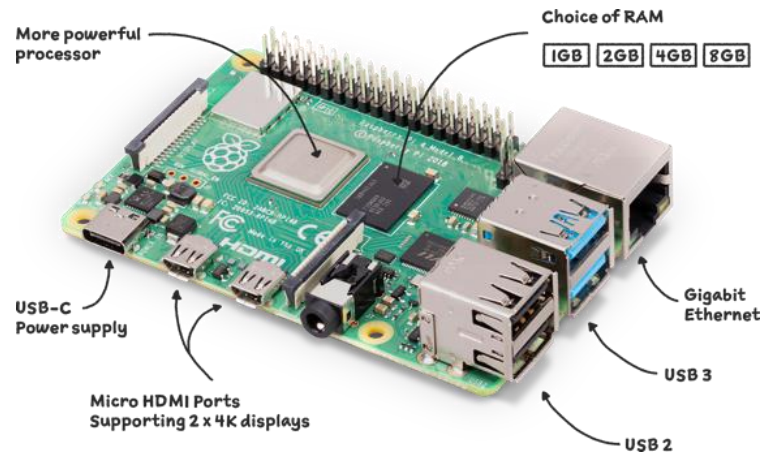
P = Daya motor [HP]

T = Torsi [Nm]

N_s = Kecepatan motor listrik (Rpm)

5252 = Nilai konstanta (ketetapan) untuk daya motor

2.10 Raspberry Pi



Gambar 2.9 Raspberry Pi 4 Model B
(Sumber: Raspberry, 2019)

Raspberry Pi 4 Model B adalah salah satu komputer single-board yang dikembangkan oleh Raspberry Pi Foundation. Raspberry Pi 4 Model B dilengkapi dengan fitur-fitur dan spesifikasi yang lebih baik dibandingkan dengan model sebelumnya, membuatnya menjadi pilihan populer bagi pengembang, pencinta

teknologi, dan pengguna umum yang ingin membangun proyek DIY atau menggunakan komputer kecil yang dapat diprogram.

Berikut ini adalah beberapa spesifikasi dan fitur Raspberry Pi 4 Model B secara detail:

Tabel 2.4 Spesifikasi Raspberry Pi 4 Model B

Parameter	Spesifikasi
SoC	Broadcom BCM2711, Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit @ 1.5 GHz
RAM	1 GB, 2 GB, 4 GB, atau 8 GB LPDDR4-3200 SDRAM
Memori	microSD
GPIO	Raspberry Pi standard 40 pin GPIO header
Konektivitas	<ul style="list-style-type: none"> • 2.4 GHz dan 5.0 GHz IEEE 802.11 ac wireless • Bluetooth 5.0 BLE • Gigabit Ethernet
Multimedia	<ul style="list-style-type: none"> • H.265 (4kp60 decode) • H264 (1080p60 decode, 1080p30 encode) • OpenGL ES 3.1, Vulkan 1.0
Port	<ul style="list-style-type: none"> • 2 × USB 3.0; 2 × USB 2.0 • 2 × micro-HDMI (up to 4kp60 fps) • 2-lane MIPI DSI display • 2-lane MIPI CSI camera • 4-pole stereo audio dan composite video
Power	<ul style="list-style-type: none"> • 5V DC via USB-C connector (up to 3A) • 5V DC via GPIO header (up to 3A) • Power over Ethernet (PoE) enabled (requires separate PoE HAT)
Dimensi	85 mm × 56 mm

Sumber: (Raspberry, 2019)

1. Prosesor dan RAM:

Raspberry Pi 4 Model B dilengkapi dengan prosesor quad-core ARM Cortex-A72 64-bit yang berjalan pada kecepatan 1,5 GHz. Prosesor ini memiliki performa yang jauh lebih baik dibandingkan dengan model sebelumnya. Selain itu, Raspberry Pi 4 Model B juga memiliki opsi RAM yang lebih besar, yaitu 2GB, 4GB, atau 8GB LPDDR4-3200 SDRAM. Opsi RAM yang lebih besar memungkinkan komputer ini untuk menjalankan aplikasi yang lebih besar atau kompleks.

2. Konektivitas:

Raspberry Pi 4 Model B memiliki konektivitas yang lebih baik dibandingkan dengan model sebelumnya. Komputer ini dilengkapi dengan dua port micro-HDMI yang mendukung output video 4K hingga 60 fps. Selain itu, Raspberry Pi 4 Model B juga memiliki port Gigabit Ethernet, dua port USB 3.0, dua port USB 2.0, dan port USB-C untuk daya. Ada juga slot kartu microSD untuk menyimpan sistem operasi dan data.

3. Jaringan nirkabel:

Raspberry Pi 4 Model B memiliki dukungan untuk jaringan nirkabel. Komputer ini dilengkapi dengan Wi-Fi dual-band 802.11ac dan Bluetooth 5.0 BLE. Dengan dukungan ini, pengguna dapat menghubungkan Raspberry Pi 4 Model B ke jaringan Wi-Fi dan perangkat Bluetooth.

4. Kompatibilitas:

Raspberry Pi 4 Model B kompatibel dengan banyak sistem operasi yang berbeda, termasuk Raspbian, Ubuntu, dan banyak distribusi Linux lainnya. Selain itu, Raspberry Pi 4 Model B juga mendukung bahasa pemrograman seperti Python,

C++, dan Java, sehingga memungkinkan pengguna untuk membuat berbagai aplikasi dan proyek DIY.

5. Harga:

Harga Raspberry Pi 4 Model B tergantung pada opsi RAM yang dipilih. Harga mulai dari sekitar \$35 untuk model dengan RAM 2GB hingga sekitar \$75 untuk model dengan RAM 8GB. Harga ini membuat Raspberry Pi 4 Model B menjadi komputer single-board yang relatif terjangkau.

Secara keseluruhan, Raspberry Pi 4 Model B menawarkan performa yang lebih baik dan konektivitas yang lebih baik dibandingkan dengan model sebelumnya, membuatnya menjadi pilihan yang baik untuk pengguna yang ingin membangun proyek DIY atau menggunakan komputer kecil yang dapat diprogram.

2.11 *Shield* Kontroler Dynamixel



Gambar 2.10 Dynamixel *Shield*
(Sumber: Robotis, 2023)

Dynamixel Shield dibuat untuk mempermudah pengontrolan servo Dynamixel melalui Raspberry Pi. *Shield* ini dipasangkan dengan Raspberry Pi menggunakan kabel jumper.

Berikut adalah tabel spesifikasi *shield* ini:

Tabel 2.5 Spesifikasi Dynamixel *Shield*

Parameter	Spesifikasi
Tegangan Operasi	5 V (XL-300) ~ 24 V (PRO / X Series)
Arus maksimum	1 A (Arduino), 10 A (Terminal Connector)

(Sumber: Robotis, 2023)

2.12 *End Effector*

Kemampuan robot juga tergantung pada piranti yang dipasang pada lengan robot. Piranti ini biasanya dikenal dengan *end effector*. *End effector* ada dua jenis yaitu pencengkram (*gripper*) yang digunakan untuk memegang dan menahan obyek, dan peralatan-peralatan (*tools*) yang digunakan untuk melakukan operasi tertentu pada suatu obyek. Contohnya: melakukan proses *packing*, bor, penyemprot cat, gerinda, pengelasan (*welding*) dan lain sebagainya.



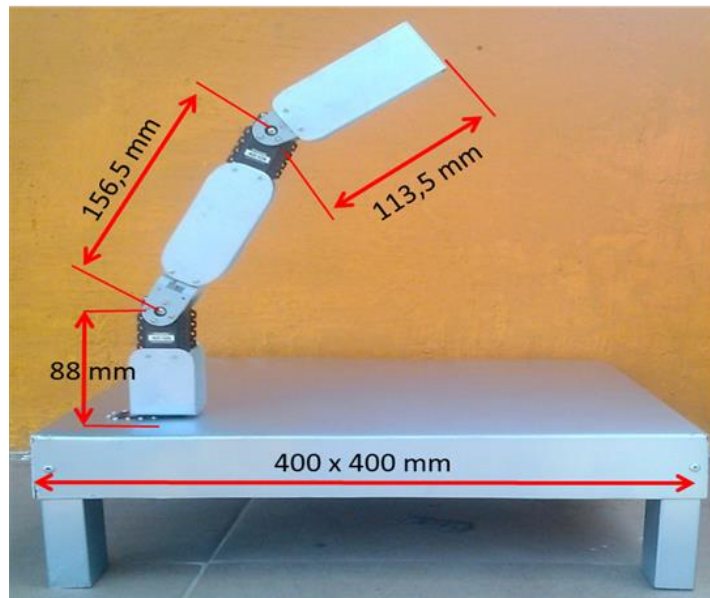
Gambar 2.11 *End Effector* sebagai *Gripper*
(Sumber: Bernier, 2021)



Gambar 2.12 *End Effector* sebagai *Tools (Welding)*
(Sumber: Genesis System, 2023)

2.13 Tinjauan Penelitian Sebelumnya

Penelitian terkait robot manipulator ini telah dilakukan dua kali sebelumnya. Penelitian pertama pada tahun 2016 berjudul “Rancang Bangun Prototipe Robot Manipulator” oleh Jamil Mustarin dan Miansari Mogot. Pada penelitian tersebut, Jamil dan Miansari membuat robot manipulator 3 *Degree of Freedom* (DOF) tanpa *end effector* dengan menggunakan mikrokontroler Arduino Uno, serta memformulasikan matriks rotasi, matriks transformasi homogen dan vektor posisi robot manipulator untuk kemudian dilakukan pengujian terhadap akurasi dari pergerakan (*movement*) robot manipulator.



Gambar 2.13 Robot Manipulator pada Penelitian Pertama
(Sumber: Mustarin, 2016)

Penelitian tersebut kemudian dikembangkan pada tahun 2017 atau satu tahun setelah penelitian pertama. Penelitian kedua dilakukan oleh Andi Baso dan John Michael Adiputra dengan judul “Pengembangan Prototipe Robot Manipulator”. Pada penelitian ini Baso dan Michael menambahkan *end effector* 2 DOF pada konstruksi robot, mengganti mikrokontrolernya menjadi Arduino Mega, memperbaiki panel kontrol dan sistem monitoring, serta menambahkan *emergency button* pada panel robot.



Gambar 2.14 Robot Manipulator pada Penelitian kedua
(Sumber: Baso, 2017)

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan di Gedung Pasca Sarjana, kampus Politeknik Negeri Ujung Pandang. Adapun waktu pelaksanaan penelitian dimulai dari bulan Februari 2023 sampai dengan bulan Agustus 2023. Jadwal pelaksanaan dapat dilihat pada tabel 3.1 di bawah ini.

Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian

No	Kegiatan	Bulan																															
		Januari				Februari				Maret				April				Mei				Juni				Juli				Agustus			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
1	Studi Literatur																																
2	Pembuatan dan Seminar Proposal																																
3	Revisi Proposal																																
4	Pengecekan Mekanik dan Elektronik																																
5	Pengadaan Alat dan Bahan																																
6	Pembuatan Mekanik dan Elektronik																																
7	Pembuatan Program																																
8	Uji Coba Alat																																
9	Seminar Hasil																																
10	Revisi Seminar Hasil																																
11	Pembuatan Paper																																

3.2 Alat dan Bahan

Untuk mendukung pelaksanaan dalam penelitian ini, terdapat beberapa alat dan bahan yang diperlukan agar tugas akhir dapat dikerjakan sesuai rencana, serta memenuhi kriteria dan tujuan yang telah ditetapkan sebelumnya pada Bab I. Adapun alat dan bahan yang akan digunakan dalam pelaksanaan penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.2 dan Tabel 3.3 di bawah ini.

Tabel 3.2 Alat yang Digunakan pada Penelitian

No.	Alat
1	Komputer/Laptop
2	Obeng elektronik
3	Lem Tembak
4	Obeng (+) & (-)
5	Bor Tangan Listrik
6	Gergaji Besi
7	<i>Power Supply</i>
8	Solder
9	Multimeter Digital
10	<i>Cutter</i>
11	Adaptor
12	Penggaris

Tabel 3.3 Bahan yang Dibutuhkan dalam Penelitian

No	Bahan	Jumlah
1	Raspberry Pi	1 unit
2	Dynamixel Shield	1 unit
3	Raspberry Pi Camera	1 unit
4	Motor Servo	1 unit
5	Kabel Jumper	Secukupnya
6	Capit Udang	1 unit
7	Modul <i>Step Down</i>	1 unit
8	Pembungkus Kabel	1 gulung
9	Tali Sigma	Secukupnya
10	<i>Wire Cable Carrier</i>	1 gulung
11	Isolasi listrik	1 gulung
12	Baut	Secukupnya
13	Resistor	Secukupnya
14	IC Regulator	2 buah
15	DC Plug	Sesuai kebutuhan
16	DC Header	Sesuai kebutuhan
17	Kawat Timah	Secukupnya
18	<i>Spacer</i>	Sesuai kebutuhan

Selain alat dan bahan yang tertera pada tabel di atas, dalam penelitian ini juga terdapat beberapa *software/platform* yang diperlukan untuk mengerjakan maupun mendukung penelitian. Berikut adalah daftar *software/platform* yang akan digunakan:

- Matlab
- Microsoft Visual Studio Code
- Github (*version control*)
- Autodesk Inventor Professional 2023

3.3 Langkah Kerja

3.3.1 Langkah Kerja

Metode penelitian yang telah digunakan dalam proses pelaksanaan, pembuatan, dan analisis penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Untuk memperoleh landasan teori dalam penelitian dan pembuatan alat, maka tahap pertama yang dilakukan adalah mengumpulkan berbagai informasi yang berkaitan robot manipulator 3 DOF secara umum, atau yang menggunakan teknologi servo Dynamixel AX-12A dari robotis secara khusus. Adapun referensi yang digunakan adalah buku-buku acuan, jurnal-jurnal, artikel-artikel, serta informasi yang diperoleh dari internet.

2. Formulasi dan Simulasi

Formulasi dilakukan untuk memodelkan sebuah sistem dalam analisis kinematika, sehingga akan diperoleh model matematisnya. Simulasi dilakukan untuk melihat hasil dari formulasi yang telah dibuat.

3. Eksperimen

- Mekanik

Pembuatan perangkat keras dari robot manipulator yang telah dirancang.

- Elektronik

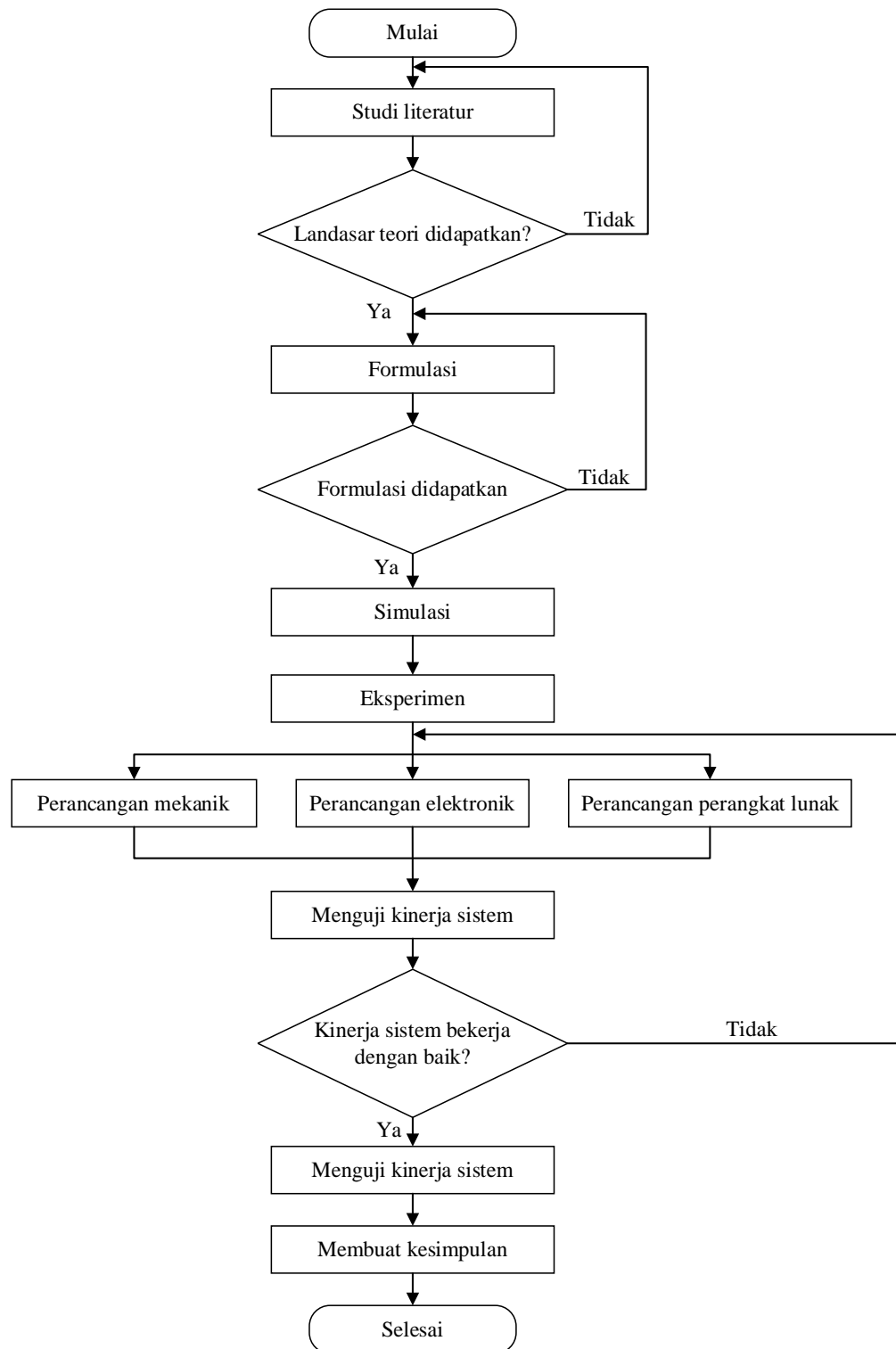
Pembuatan rangkaian elektronika untuk driver kontroler yang menggerakkan robot manipulator

- Kontrol

Pembuatan perangkat lunak (program) pada robot manipulator.

4. Menguji kinerja sistem secara keseluruhan serta mengambil data dari hasil pengujian yang dibuktikan dengan menggunakan *software* Matlab.
5. Menganalisis hasil serta menarik kesimpulan.

3.3.2 Diagram Alir Penelitian

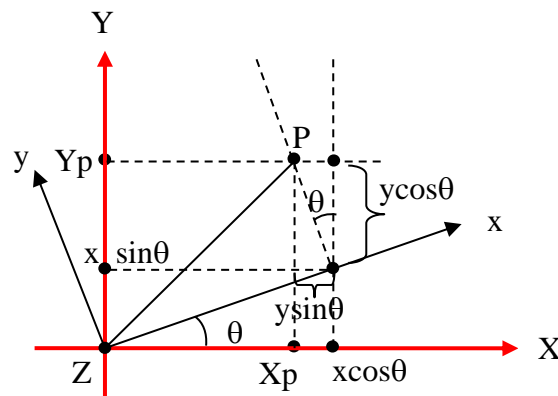


Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.3.3 Formulasi Robot Manipulator

Untuk mendapatkan formulasi manipulator 3 DOF ada beberapa langkah yang perlu diperhatikan seperti rotasi matriks terhadap sumbu koordinat bumi X, Y, dan Z. Pada formulasi ini juga diuraikan vektor posisi robot manipulator 3 DOF sehingga dapat diketahui posisi ujung link manipulator (titik P).

- a. Matriks rotasi mengelilingi sumbu Z



Gambar 3.2 Matriks Rotasi Mengelilingi Sumbu Z

Dari gambar di atas maka akan didapat persamaan berikut ini:

$$Xp = x \cos \theta - y \sin \theta$$

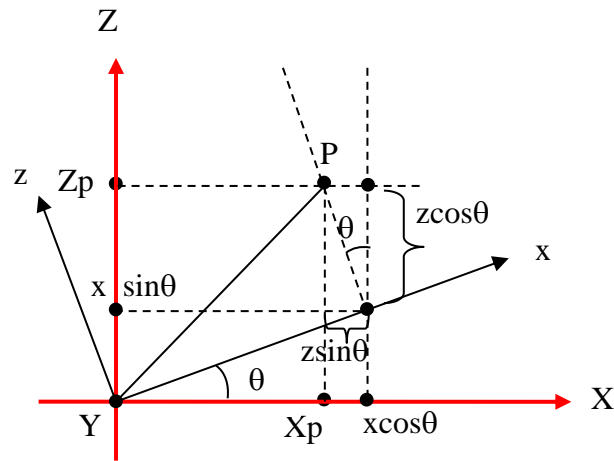
$$Yp = x \sin \theta + y \cos \theta$$

$$Zp = z$$

$$\begin{Bmatrix} Xp \\ Yp \\ Zp \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}$$

$$Rz = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

b. Matriks rotasi mengelilingi sumbu Y



Gambar 3.3 Matriks Rotasi Mengelilingi Sumbu Y

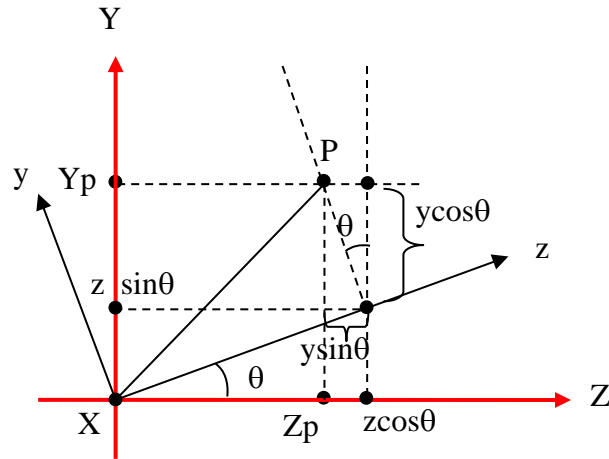
Dari gambar di atas maka akan didapat persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} X_p &= x \cos \theta - z \sin \theta \\ Y_p &= y \\ Z_p &= x \sin \theta + z \cos \theta \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

c. Matriks rotasi mengelilingi sumbu X



Gambar 3.4 Matriks rotasi mengelilingi sumbu X

Dari gambar di atas maka akan didapat persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Xp &= x \\ Yp &= y \cos \theta + z \sin \theta \\ Zp &= z \cos \theta - y \sin \theta \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} Xp \\ Yp \\ Zp \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

$$Rx = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

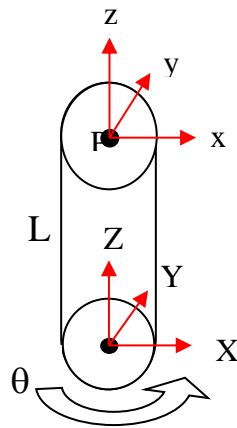
d. Vektor Posisi 1 DOF

Pada formulasi robot manipulator, digunakan matriks transformasi homogen yang merupakan kombinasi dari matriks rotasi dan matriks peralihan (translasi).

Secara umum matriks transformasi homogen dinyatakan sebagai:

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{matriks rotasi} & \text{vektor posisi} \\ \text{transformasi perspektif} & \text{penskala} \end{bmatrix}$$

Vektor posisi pada robot manipulator 1 DOF bisa didapat dengan menggunakan matrik transformasi homogen. Berikut ini adalah gambar 1 DOF robot manipulator.



Gambar 3.5 1 DOF Manipulator

Dari gambar di atas maka akan didapat koordinat titik P terhadap koordinat titik bumi (X,Y,Z) pada manipulator 1 DOF dengan menggunakan matriks transformasi homogen sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} Xp \\ Yp \\ Zp \\ 1 \end{Bmatrix} = [T_z] \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

Dimana nilai:

$$[T_z] = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

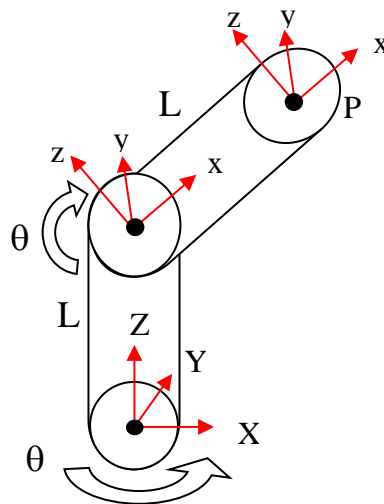
Sehingga:

$$\begin{Bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ L_1 \\ 1 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

Dari persamaan (2) di atas, maka didapat posisi P terhadap koordinat titik bumi yaitu: $X= 0$, $Y= 0$, dan $Z= L_1$.

e. Vektor Posisi 2 DOF

Vektor posisi pada robot manipulator 2 DOF bisa didapat dengan menggunakan matrik transformasi homogen. Berikut ini adalah gambar 2 DOF prototipe robot manipulator.



Gambar 3.6 2 DOF Manipulator

Dari gambar di atas maka akan didapat koordinat titik P terhadap koordinat titik bumi (X,Y,Z) pada manipulator 2 DOF dengan menggunakan matriks transformasi homogen sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{Bmatrix} = [T_y][T_z] \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana nilai:

$$[T_y] = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[T_z] = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Sehingga:

$$\begin{Bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} L_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - L_1 \sin \theta_1 \\ L_2 \sin \theta_2 \\ L_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + L_1 \cos \theta_1 \\ 1 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

Dari persamaan (4) di atas, maka didapat posisi P terhadap koordinat titik bumi yaitu:

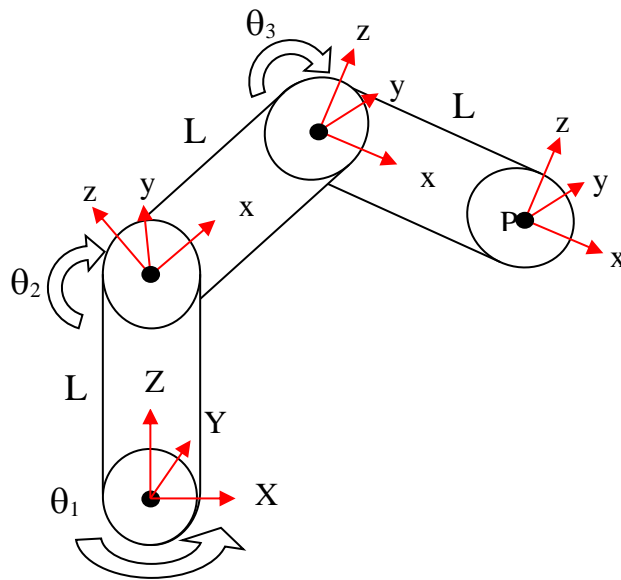
$$X = L_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - L_1 \sin \theta_1$$

$$Y = L_2 \sin \theta_2$$

$$Z = L_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + L_1 \cos \theta_1$$

f. Vektor Posisi 3 DOF

Robot manipulator 3 DOF ini sesuai dengan desain robot manipulator yang dirancang. Vektor posisi pada robot manipulator 3 DOF bisa didapat dengan menggunakan matrik transformasi homogen. Berikut ini adalah gambar prototipe robot manipulator 3 DOF.



Gambar 3.7 3 DOF Manipulator

Pada gambar manipulator di atas, dapat diketahui koordinat titik P dengan cara mengamati sumbu koordinat masing masing link (L_1 , L_2 , L_3) terhadap koordinat titik bumi (X, Y, Z) dengan menggunakan matriks transformasi homogen.

$$\begin{Bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{Bmatrix} = [T_z] \cdot [T_{y_1}] \cdot [T_{y_2}] \cdot \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

Dimana nilai:

$$[Ty_2] = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & -\sin \theta_3 & L_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_3 & 0 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[Ty_1] = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & -\sin \theta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[Tz] = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Sehingga

$$\begin{Bmatrix} Xp \\ Yp \\ Zp \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} L_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + L_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - L_3 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \\ L_3 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + L_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 - L_3 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \\ L_3 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \cos \theta_2 \sin \theta_3 + L_1 \\ 1 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(6)$$

Dari persamaan (6) di atas, maka didapat posisi P terhadap koordinat titik bumi yaitu:

$$X = L_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + L_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - L_3 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3$$

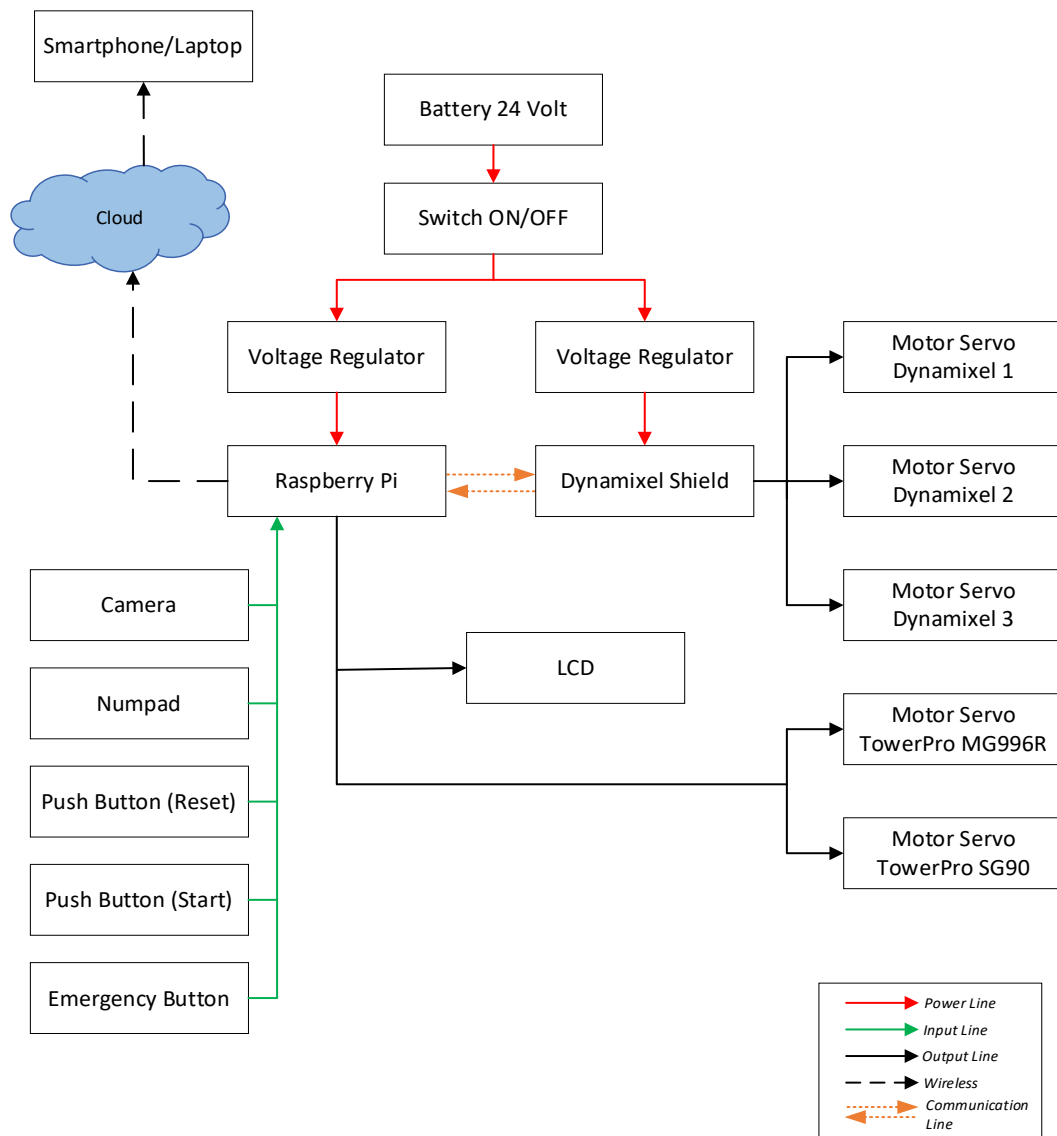
$$Y = L_3 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + L_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 - L_3 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3$$

$$Z = L_3 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \cos \theta_2 \sin \theta_3 + L_1$$

Formulasi di atas yang akan digunakan untuk mendapatkan koordinat P pada ujung robot manipulator 3 DOF.

3.3.4 Diagram Skematik Alat

Selain diagram alir penelitian, terdapat juga hubungan antar komponen yang digambarkan pada diagram skematik alat berikut:



Gambar 3.8 Diagram Skematik Alat

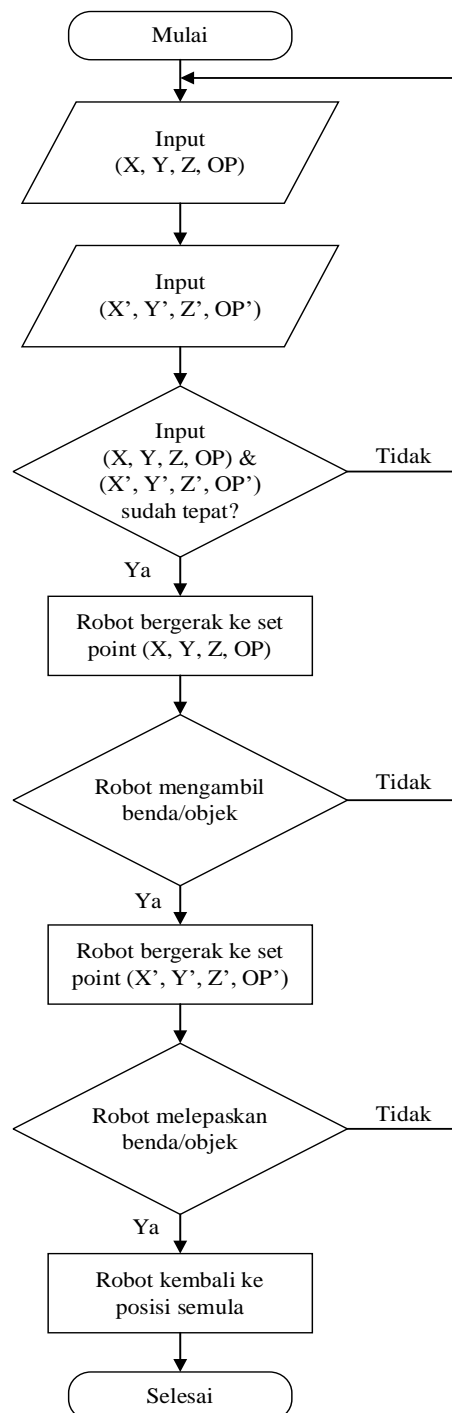
3.3.5 Parameter (Data) Monitoring

Terdapat 2 data yang akan diambil untuk dimonitoring, yaitu:

1. Posisi
2. Temperatur motor servo

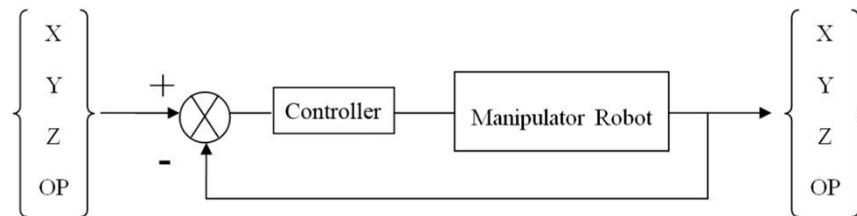
3.4 Langkah-langkah Pengujian Alat

Di bawah ini merupakan diagram alir percobaan dan diagram blok pengontrolan yang akan digunakan pada robot manipulator:



Gambar 3.9 Diagram Alir Percobaan Robot

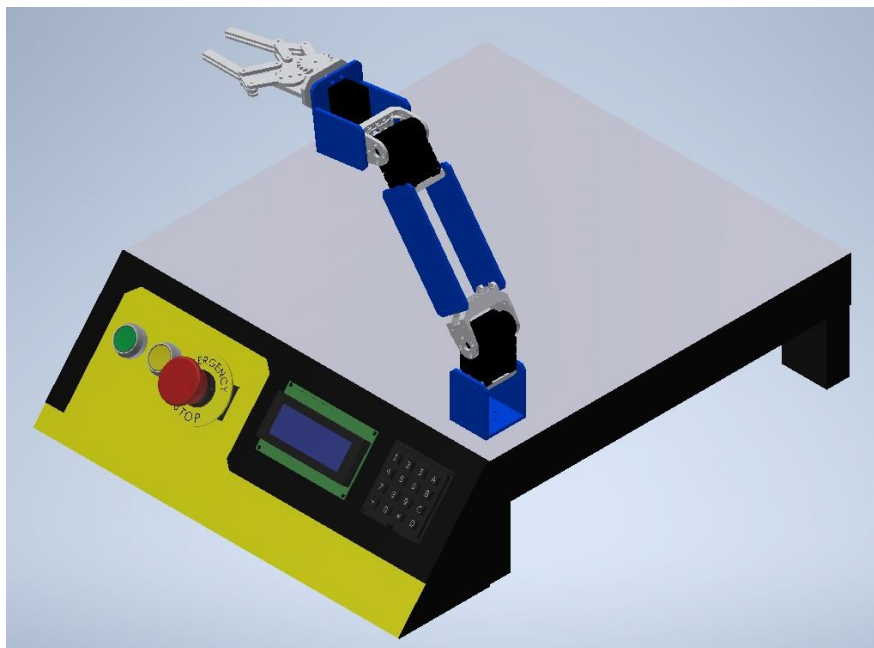
Berikut merupakan gambar diagram blok pengontrolan pada robot manipulator:



Gambar 3.10 Diagram Blok Pengontrolan

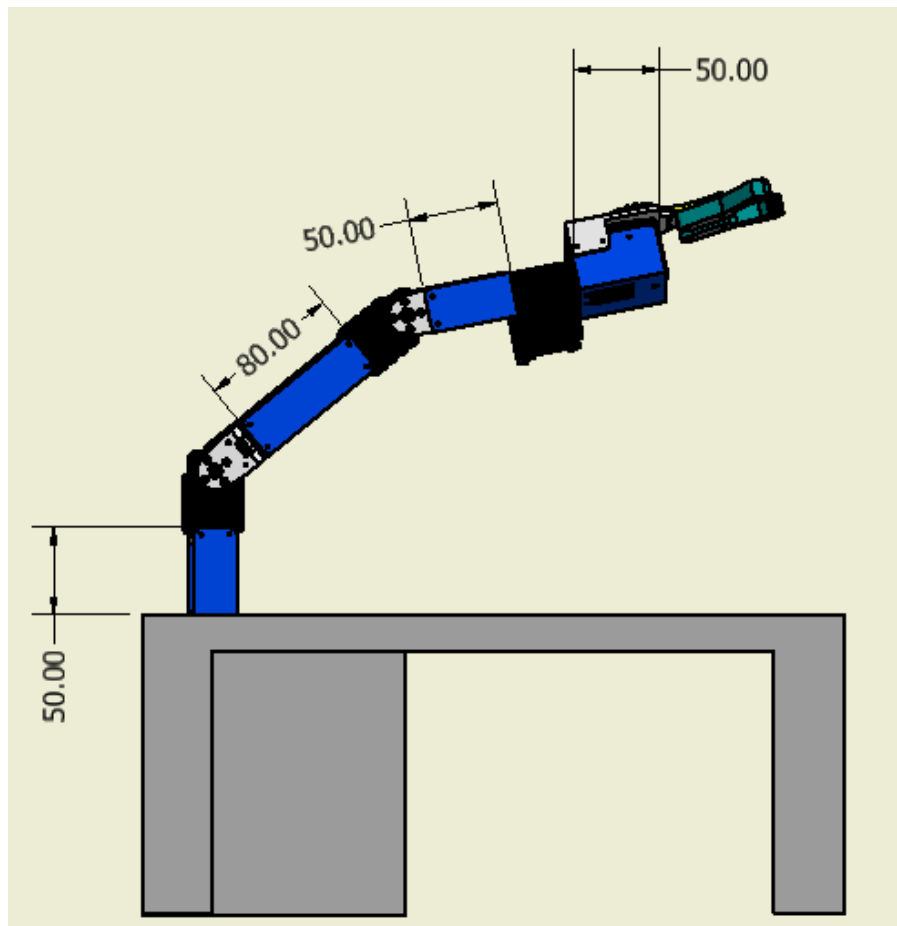
3.5 Teknik Analisis Data

Teknis analisis data yang digunakan yaitu observasi fungsional robot dan sistem monitoring, serta tingkat akurasi titik koordinat keluaran (*output*) terhadap masukan (*input*) yang diberikan. Pengujian fungsional robot manipulator dan sistem monitoringnya bertujuan untuk mengetahui apakah hasil pengembangan yang telah dilakukan dapat berfungsi dengan baik. Jika tidak sesuai harus dilakukan modifikasi sampai menghasilkan unjuk kerja yang baik.



Gambar 3.11 Desain Robot Manipulator

Gambar di atas adalah prototipe Robot Manipulator yang telah dikembangkan dengan *end effector* dan *emergency button*. Desain tersebut diperbaharui dengan menggunakan *software* Autodesk Inventor 2020 dengan satuan ukuran gambar *metrics* (milimeter). *End effector* pada Robot Manipulator di atas digerakkan oleh motor servo Dynamixel AX-12A.



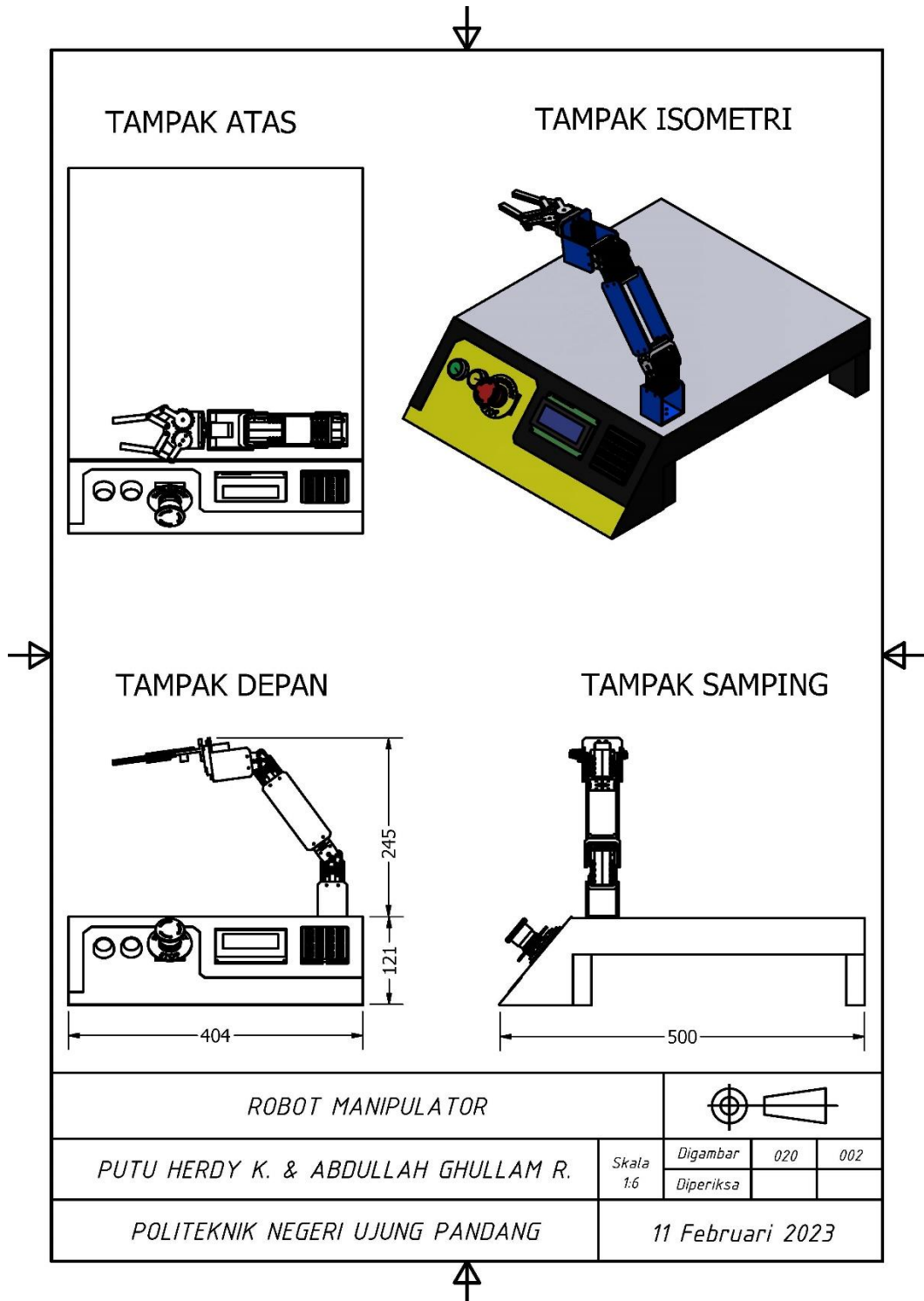
Gambar 3.12 Dimensi Robot Manipulator dalam Satuan Milimeter

DAFTAR PUSTAKA

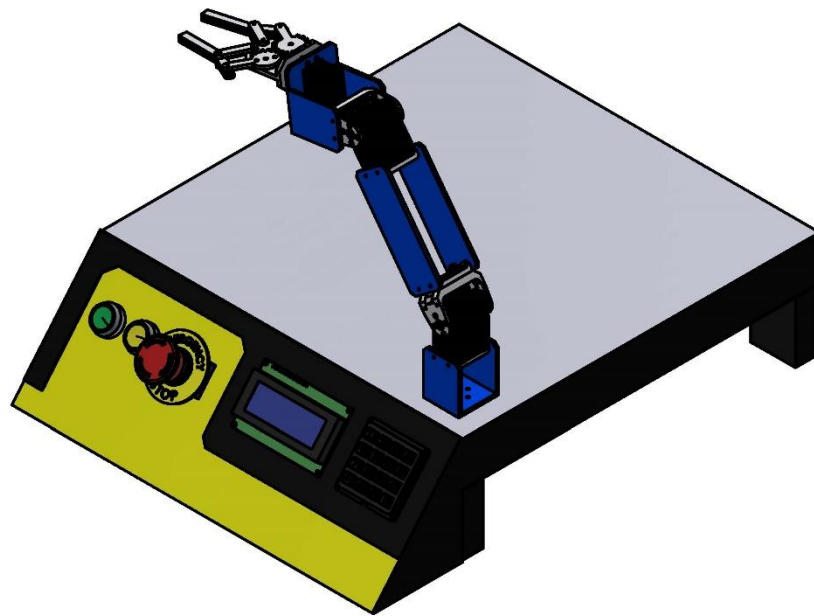
- Baso, Andi dan John Michael Adiputra. 2017. Pengembangan Prototipe Robot Manipulator. Skripsi. Makassar: Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- Bernier, Catherine. 2021. Robot Grippers and End Effectors: Uses, Benefits, and Cost Analysis. (Online). (<https://howtorobot.com/expert-insight/robot-end-effectors>), Diakses 8 Februari 2023.
- Cahyono dkk. 2015. Kontrol Lengan Robot Badminton dan Analisis Kinematika. Dalam *Elkolind*, (2): 73.
- Caysar, Dina. 2014. Pengaturan Pergerakan Robot Lengan Smart Arm Robotic AX-12A melalui Pendekatan Geometry Based Kinematic Menggunakan Arduino. Dalam *Jurnal Dina Caysar*, (2): 3.
- Components 101. 2019. MG996R Servo Motor. (Online). (<https://components101.com/motors/mg996r-servo-motor-datasheet>), Diakses 11 Februari 2023.
- DatasheetPDF. 2014. TowerPro SG90 – Micro Servo. (Online). (<https://datasheetpdf.com/pdf/791970/TowerPro/SG90/1>), Diakses 12 February 2023.
- Genesis System. 2023. How the Right Robotic End-Effector Impacts Robotic Performance. (Online). (<https://www.genesis-systems.com/blog/benefits-finding-right-robotic-end-effector>), Diakses 8 Februari 2023.
- Goryanina, Ksenia I. et al. 2018. *Review of Robotic Manipulators and Identification of the Main Problems*. Rostov-on-Don: Don State Technical University.
- Herizon dan Ade Diana. 2014. Implementasi Persamaan Kinematik Maju pada Robot Manipulator. Dalam *Elektron*, (6): 67.
- International Federation of Robotics. 2022. Industrial Robots. Majalah *World Robotics 2022*, (10): 9. Frankfurt.
- King-sun Fu, 1987. *Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence*. United States of America: McGraw-Hill.
- Mason, Matthew T. 2001. *Mechanics of Robotic Manipulation*. London: The MIT Press.
- Muhammad, Abdul K. dkk. 2016. Rancang Bangun Prototipe Robot Manipulator. Makassar: Politeknik Negeri Ujung Pandang.

- Mustarin, Jamil dan Miansari Mogot. 2016. Rancang Bangun Prototipe Robot Manipulator. Skripsi. Makassar: Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- Muslimin, Selamat dkk. 2015. Penerapan Flex-Sensor pada Lengan Robot Berjari Pengikut Gerak Lengan Manusia Berbasis Mikrokontroler. Dalam *Technologic*, (5): 8.
- Rahmat, Ajang. 2019. Mengatasi Error pada NodeMCU Amica. (*Online*). (<https://kelasrobot.com/mengatasi-error-pada-nodemcu-amica/>), Diakses 7 Februari 2023.
- Raspberry Pi. 2019. Raspberry Pi 4 Model B. (*Online*). (<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>), Diakses 6 Februari 2023.
- Robotis. 2022. AX-12A. (*Online*). (<https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/ax/ax-12a/>), Diakses 7 Februari 2023.
- . 2023. Dynamixel_Shield. (*Online*). (https://emanual.robotis.com/docs/en/parts/interface/dynamixel_shield/), Diakses 7 Februari 2023.
- Taufik dkk. 2017. Rancang Bangun Prototipe Robot Manipulator untuk Media Praktikum. Prosiding *Seminar Hasil Penelitian (SNP2M)*. 205. Makassar: Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- Tedrake, Russ. 2022. Robotic Manipulation: Perception, Planning, and Control. *Course MIT 6.4210/6.4212 – Robotic Manipulation*. (*Online*). (<https://manipulation.mit.edu/intro.html>), Diakses 29 Januari 2023.

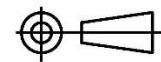
LAMPIRAN



TAMPAK ISOMETRI



ROBOT MANIPULATOR



PUTU HERDY K. & ABDULLAH GHULLAM R.

Skala
1:4

Digambar	020	002
Diperiksa		

POLITEKNIK NEGERI UJUNG PANDANG

11 Februari 2023

