

**STUDI EKSPERIMENTAL DAN SIMULASI *INVERSE KINEMATICS*
PADA TANGAN ROBOTIK UNTUK VALIDASI GERAK DAN DAYA
ANGKAT**

(Skripsi)

Oleh

**RAIHANDIKA YUDHISTIRA WARDHANA
NPM 2015021012**



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

**STUDI EKSPERIMENTAL DAN SIMULASI INVERSE KINEMATICS
PADA TANGAN ROBOTIK UNTUK VALIDASI GERAK DAN DAYA
ANGKAT**

Oleh

RAIHANDIKA YUDHISTIRA WARDHANA

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

STUDI EKSPERIMENTAL DAN SIMULASI *INVERSE KINEMATICS* PADA TANGAN ROBOTIK UNTUK VALIDASI GERAK DAN DAYA ANGKAT

Oleh

RAIHANDIKA YUDHISTIRA WARDHANA

Tangan robot prostetik menuntut presisi gerak dan kekuatan genggam yang memadai untuk meniru fungsi tangan manusia. Penelitian ini menyajikan studi eksperimental dan simulasi untuk mengevaluasi unjuk kerja sebuah tangan robot prostetik melalui analisis kinematika dan daya angkat. Metode *inverse kinematics* berbasis trigonometri digunakan untuk menghitung konfigurasi sudut sendi (θ_1 , θ_2 , θ_3) saat menggenggam tiga objek uji: botol, *cup*, dan sikat gigi. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan teoritis terhadap pengukuran eksperimental. Hasil menunjukkan model kinematika sangat akurat untuk gerakan menggenggam (*power grip*) pada botol dan *cup*, dengan seluruh sendi berada dalam batas toleransi yang ditetapkan (***error absolut* < 2°** dan ***ketidakpastian relatif* < 5%**). Namun, pada gerakan menjepit (*precision grip*) sikat gigi, ditemukan penyimpangan signifikan pada sendi proksimal, dengan ***error* mencapai 5,707%**, yang terutama disebabkan oleh akumulasi celah mekanis (*backlash*). Analisis daya angkat dengan pendekatan Diagram Benda Bebas (FBD) menghitung kemampuan angkat berdasarkan torsi motor *servo* MG90S (0,183 Nm pada 5V). Hasil perhitungan menunjukkan total **massa angkat maksimum sebesar 334,4 gram**, yang terkonfirmasi secara eksperimental di mana tangan robot berhasil mengangkat *cup* (220 g) namun gagal mengangkat botol berisi air (600 g). Penelitian ini membuktikan efektivitas metode *inverse kinematics* untuk pemodelan gerak, sekaligus menggarisbawahi pentingnya optimasi desain mekanik dan pemilihan motor bertorsi lebih tinggi untuk meningkatkan kapabilitas dan presisi tangan robot di masa depan.

Kata kunci: Tangan prostetik, *inverse kinematics*, gaya genggam, validasi eksperimental, torsi motor, *backlash*.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL STUDY AND INVERSE KINEMATICS SIMULATION ON ROBOTIC HAND FOR MOTION AND LIFTING POWER VALIDATION

By

RAIHANDIKA YUDHISTIRA WARDHANA

*Prosthetic robotic hands demand precise motion and adequate grasping strength to mimic human hand functionality. This research presents an experimental study and simulation to evaluate the performance of a prosthetic robotic hand through kinematic and lifting capacity analysis. A trigonometry-based inverse kinematics method was used to calculate the joint angle configurations (θ_1 , θ_2 , θ_3) for grasping three test objects: a bottle, a cup, and a toothbrush. Validation was performed by comparing theoretical calculations with experimental measurements. The results demonstrate that the kinematic model is highly accurate for **power grips** (bottle and cup), with all joints remaining within the established tolerance limits (**absolute error** $< 2^\circ$ and **relative uncertainty** $< 5\%$). However, for the **precision grip** (toothbrush), significant deviations were observed at the proximal joints, with **errors reaching 5.707%**, primarily attributed to mechanical backlash. The lifting capacity analysis, using a Free Body Diagram (FBD) approach based on the MG90S servo motor's torque (0.183 Nm at 5V), calculated a total **maximum lifting capacity of 334.4 grams**. This was experimentally confirmed as the hand successfully lifted a cup (220 g) but failed to lift a water-filled bottle (600 g). This study validates the effectiveness of the inverse kinematics method for motion modeling while highlighting the critical need for mechanical design optimization and higher-torque motors to enhance the capability and precision of future robotic hands.*

Key Words: *Prosthetic hand, inverse kinematics, grip force, experimental validation, motor torque, backlash.*

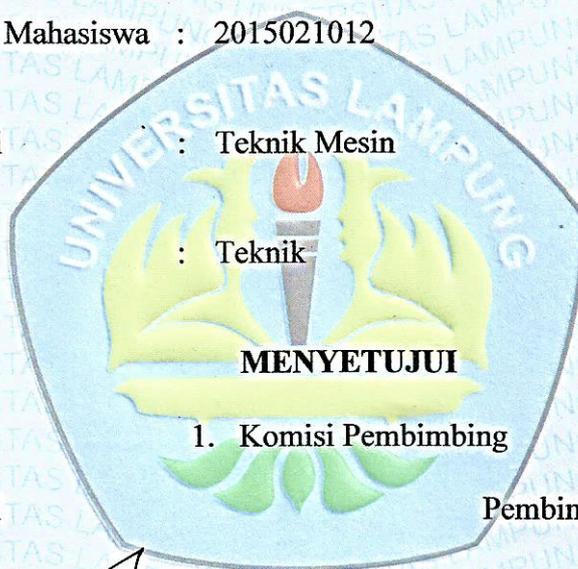
Judul Skripsi : **STUDI EKSPERIMENTAL DAN SIMULASI
INVERSE KINEMATICS PADA TANGAN
ROBOTIK UNTUK VALIDASI GERAK DAN
DAYA ANGKAT**

Nama Mahasiswa : **Raihandika Yudhistira Wardhana**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2015021012**

Program Studi : **Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**



1. Komisi Pembimbing

Pembimbing 1

Dr. Eng. Suryadiwansya Harun, S.T., M.T.
NIP. 197005012000031001

Pembimbing 2

Ahmad Su'udi, S.T., M.T.
NIP. 197408162000121001

**2. Ketua Jurusan Teknik Mesin
MENGETAHUI**

Ketua Jurusan
Teknik Mesin

Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197108171998021003

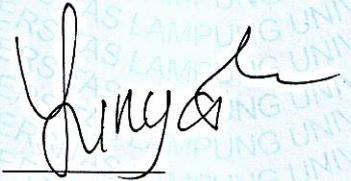
Ketua Program Studi
S1 Teknik Mesin

Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.
NIP. 197908212003121003

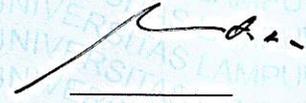
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

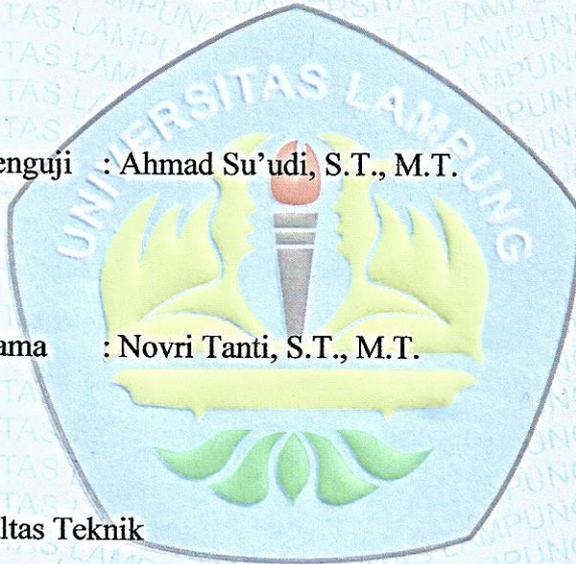
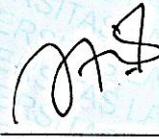
Ketua Penguji : Dr. Eng. Suryadiwansya Harun, S.T., M.T.



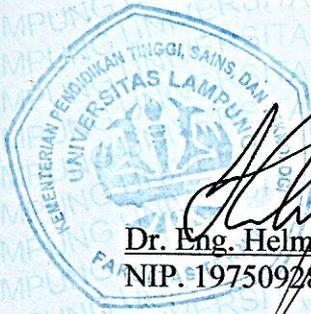
Anggota Penguji : Ahmad Su'udi, S.T., M.T.



Penguji Utama : Novri Tanti, S.T., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.)
NIP. 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 04 Juni 2025

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Raihandika Yudhistira Wardhana
Nomor Pokok Mahasiswa : 2015021012
Program Studi : S1 Teknik Mesin
Jurusan : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

Dengan ini menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang telah diajukan memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi dan sepengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini disebut dalam daftar pustaka.

Bandar Lampung, 04 Juni 2025

Yang menyatakan,



Raihandika Yudhistira Wardhana
NPM. 2015021012

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap **Raihandika Yudhistira Wardhana**, dilahirkan di Bandar Lampung pada tanggal **28 April 2001**. Penulis merupakan anak ketiga dari pasangan Bapak **Triyanto Budi Susilo, S.E.** dan Ibu **Eka Winarni**.

Riwayat pendidikan penulis dimulai dari **Taman Kanak-Kanak (TK) Transmigrasi “Kecamatan Kedaton”** (2006-2007), kemudian melanjutkan pendidikan dasar di **SD Negeri 3 Labuhan Ratu Kecamatan Kedaton** (2008-2014). Selama di SD, penulis aktif mengikuti kegiatan ekstrakurikuler Pramuka selama 2 tahun. Selepas SD, penulis melanjutkan pendidikan di **SMP Negeri 20 Bandar Lampung** (2014-2017), kemudian di **SMK Negeri 2 Bandar Lampung** dengan program keahlian **Teknik Kendaraan Ringan** (2017-2020). Selama SMK, penulis pernah magang di **Auto2000 Way Halim** selama 3 bulan.

Atas takdir Allah SWT dan segala ikhtiar, penulis berhasil melanjutkan pendidikan ke jenjang yang lebih tinggi. Pada tahun **2020**, penulis terdaftar sebagai mahasiswa **Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung** melalui jalur **Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN)**. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif mengikuti berbagai kegiatan, di antaranya:

1. **Studi Independen** di **PT Stechoq Robotika Indonesia** (Agustus-Desember 2022) dan di **PT Neosia Pratama Indonusa** (Februari-Juni 2024).
2. Menjadi **asisten laboratorium** di Laboratorium Mekatronika (2022-2023), Komputer (2022), dan Metrologi Industri (2023-2024).

3. Melaksanakan **Kerja Praktik** di **PT Great Giant Pineapple**, Lampung Tengah, selama 1 bulan.
4. Melaksanakan **Kuliah Kerja Nyata (KKN)** di **Desa Triharjo, Kecamatan Merbau Mataram, Kabupaten Lampung Selatan** pada Januari 2023.

Penulis juga aktif dalam organisasi kemahasiswaan, antara lain:

1. **Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM)** sebagai anggota Divisi KOMINFO (2021-2022) dan Kepala Divisi EDKSEMA (2023).
2. **UKM Forum Silaturahmi dan Studi Islam (FOSSI) Universitas Lampung** sebagai Staf Bidang Akademik dan Riset (2020-2021) dan Kepala Departemen Masjid dan Kesekretariatan (2021-2022).
3. **UKM Sains dan Teknologi (SAINTEK) Universitas Lampung** sebagai Staf KOMINFO (2020-2021), Sekretaris Departemen KOMINFO (2021-2022), dan Sekretaris Umum (2023).

Selama kuliah, penulis juga mengikuti dan lolos pendanaan **Program Kreativitas Mahasiswa (PKM)** dan **Program Mahasiswa Wirausaha (PMW) Universitas Lampung**. Penulis menerima beasiswa dari **KSE Ambers (2022)**, **Baznas BCB Dalam Negeri (2022)**, dan **PT Adaro (2022-2024)**.

Untuk memperoleh gelar **Sarjana Teknik (S.T.)** pada **Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung**, penulis menyusun tugas akhir dengan judul “**Studi Eksperimental dan Simulasi *Inverse Kinematics* pada Tangan Robotik untuk Validasi Gerak dan Daya Angkat**” di bawah bimbingan **Dr. Eng. Suryadiwansya Harun, S.T., M.T.** dan **Ahmad Su’udi, S.T., M.T.**, dengan dosen pembahas **Novri Tanti, S.T., M.T.**

MOTTO

"Once you choose hope, anything's possible"

"Success is 1% inspiration and 99% perspiration"

Mencoba dan lanjutkan sampai selesai, insyaallah bisa

***"Maka sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan" (QS. Al-
Insyirah : 5)***

Persembahan

Dengan mengucapkan syukur kehadiran Allah SWT, penulis mempersembahkan skripsi ini kepada:

Ayahanda dan Ibunda tercinta, Bapak Triyanto Budi Susilo, S.E. dan Ibu Eka Winarni, kaka dan adikku tersayang, yang selalu memberikan doa, dukungan, motivasi, dan semangat tanpa henti.

Amarhumah Nyang Hj. Siti Aminah Murtidati, Mbah Shodikun, dan Mbah Tumini, serta Om, Tante, dan Buse yang selalu memberikan kasih sayang dan doa.

Keluarga besar dan sahabat-sahabat tercinta yang selalu mendukung perjalanan penulis.

Dosen Pembimbing dan Dosen Penguji yang telah memberikan bimbingan dan ilmu yang sangat berharga.

Almanater tercinta, Universitas Lampung, yang telah membentuk penulis menjadi pribadi yang lebih baik.

Setiap orang yang selalu bertanya, "Kapan sidang?"

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “**Studi Eksperimental dan Simulasi *Inverse Kinematics* pada Tangan Robotik untuk Validasi Gerak dan Daya Angkat**”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih terdapat keterbatasan pengetahuan, pengalaman, dan kemampuan. Namun, penulis berharap karya ini dapat memberikan manfaat bagi berbagai pihak dan menjadi sumbangsih pemikiran bagi dunia akademis serta bidang lainnya.

Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan **terima kasih** yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak **Dr. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T.**, selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung, atas kepemimpinan dan lingkungan akademis yang kondusif selama masa studi penulis.
2. Bapak **Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.**, selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung, atas arahan dan bimbingan yang diberikan selama perkuliahan.
3. Bapak **Dr. Eng. Suryadiwansya Harun, S.T., M.T.**, selaku dosen pembimbing utama, atas bimbingan, waktu, masukan, dan arahan yang tak ternilai dalam penyelesaian tugas akhir ini.

4. Bapak **Ahmad Su'udi, S.T., M.T.**, selaku dosen pembimbing pendamping, atas ilmu, diskusi, dan kritik yang sangat membangun.
5. Ibu **Novri Tanti, S.T., M.T.**, selaku dosen pembahas, atas masukan dan saran yang bermanfaat untuk penyempurnaan skripsi ini.
6. Bapak **Dr. Harmen, S.T., M.T.**, selaku dosen pembimbing akademik, yang telah membimbing penulis sejak awal masa perkuliahan.
7. Kedua orang tua tercinta, **Bapak Triyanto Budi Susilo, S.E.** dan **Ibu Eka Winarni**, serta **Mas Bima Purwadika Arthana, S.A.B.**, **Mbak Ratih Hanindika Puspita Dewi, S.Tr.P.**, dan **adikku Bhisma Wiratha Mahardika tersayang**, yang selalu menjadi sumber doa, dukungan moril, dan materiil tanpa henti.
8. Rasa terima kasih yang tulus penulis sampaikan kepada **Mbah Shodikun** dan **Mbah Tumini**, serta **Pakde Budi, Om Opan, Om Lana, Om Aan, Tante Rita, Bule Novi**, dan **Bule Endah**, yang dengan penuh keikhlasan telah memberikan dukungan tak ternilai, baik dalam bentuk masukan yang membangun maupun bantuan materiil selama masa perkuliahan
9. Doa terkhusus untuk Almarhumah **Eyang Hj. Siti Aminah Murtidati** serta seluruh keluarga besar yang senantiasa memberikan doa dan kasih sayang.
10. Seluruh staf administrasi Jurusan Teknik Mesin, khususnya **Bapak David, Bapak Marta, Bapak Salam**, dan **Bapak Sujarni** yang telah dengan sabar membantu segala urusan administrasi.
11. Bapak **Joko**, selaku laboran Laboratorium Metrologi, atas fasilitas dan kesempatan berharga yang telah diberikan.
12. Rekan-rekan seperjuangan dari kelompok '**Ini Stiker Geng**' (Kemal dan Christoper) serta '**Lahley Geng**' (Flavio, Maher, dan rekan-rekan lainnya yang tidak dapat disebutkan satu per satu), yang telah menjadi teman setia dalam suka dan duka.
13. Keluarga besar **UKM SAINTEK Unila angkatan 2022** dan **UKM FOSSI FT Unila angkatan 2023**, tempat penulis bertumbuh dan belajar berorganisasi.
14. Seluruh teman-teman seperjuangan **Teknik Mesin Universitas Lampung Angkatan 2020**, atas kebersamaan, dukungan, dan pengalaman yang tak terlupakan.

15. Seseorang yang selalu mendampingi dalam proses pengerjaan tugas akhir ini, meski tak bersama hingga akhir, terima kasih atas setiap dukungannya. Dan untuk seseorang yang kelak menjadi pendamping hidup, semoga karya kecil ini menjadi salah satu bukti dari sebuah perjuangan.
16. Almamater tercinta, **Universitas Lampung**, yang telah menjadi tempat menimba ilmu dan mengukir kenangan.
17. Semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini, yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu. Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan.

Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.
Aamiin.

Bandar Lampung, 04 Juni 2025

Penulis,



Raihandika Yudhistira Wardhana
NPM 2015021012

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
<i>ABSTRACT</i>	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
MENGESAHKAN	iv
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	v
RIWAYAT HIDUP	vi
KATA PENGANTAR.....	ii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR NOTASI.....	x
I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	4
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Batasan Masalah	5
1.5. Sistematika Penulisan	5
II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. Fungsi Tangan.....	7
2.2. Tangan Bionik.....	9
2.3. Kinematika Robot	12

2.3.1. Kinematika Robot Tangan Satu Sendi	15
2.3.2. Kinematika Robot Tangan Dua Sendi.....	15
2.3.3. Kinematika Robot Tangan Tiga Sendi.....	17
2.4. Motor <i>Servo</i>	18
2.4.1. Faktor keamanan	19
2.4.2. Perhitungan Gaya Genggam	20
2.4.3. Torsi dan Lengan Momen	22
III METODE PENELITIAN	23
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	23
3.2. Alat dan Bahan Penelitian.....	23
3.3. Metode	24
3.3.1. Penentuan <i>Baseline</i>	24
3.3.2. Desain dan Pemodelan Mekanik.....	24
3.3.3. Penetapan Titik <i>End-effector</i>	28
3.3.4. Pengukuran Sudut	30
3.3.5. Validasi Perhitungan Kinematika	31
3.3.6. Perhitungan Massa dan Gaya.....	32
3.4. Alur Penelitian	33
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1. Pemodelan Kinematika	34
4.1.1. Hasil Perhitungan Kinematika untuk Menggenggam Botol	34
4.1.2. Hasil Perhitungan Kinematika untuk Menggenggam <i>Cup</i>	41
4.1.3. Hasil Perhitungan Kinematika untuk Jepit Sikat Gigi	42
4.2. Hasil Validasi dengan Perangkat Lunak	43
4.3. Pengukuran Sudut	45
4.3.1. Hasil Pengukuran Sudut Genggam Botol	46
4.3.2. Hasil Pengukuran Sudut Genggam <i>Cup</i>	47
4.3.3. Hasil Pengukuran Sudut Menjepit Sikat Gigi	48
4.4. Analisis Penyimpangan Hasil Perhitungan dan Penyimpangan	49
4.4.1. Penyimpangan Gerakan Menggenggam Botol.....	49
4.4.2. Penyimpangan Gerakan Menggenggam <i>Cup</i>	51
4.4.3. Penyimpangan Gerakan Menjepit Sikat Gigi.....	52

4.5. Ketidakpastian Relatif.....	53
4.5.1. Analisis Ketidakpastian Relatif Gerakan Menggenggam Botol .	53
4.5.2. Analisis Ketidakpastian Relatif Gerakan Menggenggam Cup ...	54
4.5.3. Analisis Ketidakpastian Relatif Gerakan Menjepit Sikat Gigi ...	56
4.6. Pendekatan Validasi Ketat	57
4.6.1. Validasi Ketat Genggaman Botol	57
4.6.2. Validasi Ketat Genggaman <i>Cup</i>	58
4.6.3. Validasi Ketat Jepitan Sikat Gigi	60
4.7. Perhitungan Gaya Genggam Tangan Robot	61
4.7.1. Hasil Distribusi Torsi Motor <i>Servo</i> pada Sendi Jari Untuk Mengangkat Massa	64
V SIMPULAN DAN SARAN.....	73
5.1. Simpulan	73
5.2. Saran	74
DAFTAR PUSTAKA.....	75
LAMPIRAN.....	78
Lampiran A. Prototipe Tangan Robot.....	79
Lampiran B. Pengujian Gerakan Menggenggam.....	80

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1.....	27
Tabel 2.....	28
Tabel 3.....	28
Tabel 4.....	29
Tabel 5.....	40
Tabel 6.....	41
Tabel 7.....	42
Tabel 8.....	44
Tabel 9.....	46
Tabel 10.....	47
Tabel 11.....	48
Tabel 12.....	50
Tabel 13.....	51
Tabel 14.....	52
Tabel 15.....	58
Tabel 16.....	59
Tabel 17.....	60
Tabel 18.....	64
Tabel 19.....	71

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.....	7
Gambar 2.....	8
Gambar 3.....	8
Gambar 4.....	8
Gambar 5.....	9
Gambar 6.....	10
Gambar 7.....	11
Gambar 8.....	11
Gambar 9.....	12
Gambar 10.....	12
Gambar 11.....	14
Gambar 12.....	15
Gambar 13.....	16
Gambar 14.....	18
Gambar 15.....	19
Gambar 16.....	20
Gambar 17.....	25
Gambar 18.....	25
Gambar 19.....	26
Gambar 20.....	26

Gambar 21.....	27
Gambar 22.....	29
Gambar 23.....	30
Gambar 24.....	33
Gambar 25.....	34
Gambar 26.....	35
Gambar 27.....	36
Gambar 28.....	37
Gambar 29.....	43
Gambar 30.....	46
Gambar 31.....	53
Gambar 32.....	54
Gambar 33.....	55
Gambar 34.....	55
Gambar 35.....	56
Gambar 36.....	57
Gambar 37.....	62
Gambar 38.....	62
Gambar 39.....	63
Gambar 40.....	63
Gambar 41.....	65

DAFTAR NOTASI

Simbol Latin

Simbol	Keterangan	Satuan
d	Diameter	mm
e_r	<i>Error</i> Relatif	%
e_a	<i>Error</i> Absolut	deg
F	Gaya	N
F_{gesek}	Gaya gesek	N
g	Percepatan gravitasi	m/s ²
l	Panjang <i>link</i>	mm
l_{horn}	Panjang <i>horn</i>	m
l_1	Panjang <i>link</i> 1 (<i>metacarpal</i>)	mm
l_2	Panjang <i>link</i> 2 (<i>proximal phalanges</i>)	mm
l_3	Panjang <i>link</i> 3 (<i>distal phalanges</i>)	mm
m	Massa	g
N	Gaya Normal	N
r	jarak dari poros putar ke titik gaya (radius efektif jari)	mm
T	Torsi	Nm
W	Berat benda	N
X	Koordinat <i>end-effector</i> (sumbu X)	mm
X_n	Sudut hasil eksperimen (rata rata)	deg
X_T	Koordinat X titik referensi	mm
Y	Koordinat <i>end-effector</i> (sumbu Y)	mm
Y_T	Koordinat Y titik referensi	mm
Y_n	Sudut Hasil Perhitungan Kinematika	deg
Z_T	Koordinat Z titik referensi	mm

Simbol Yunani

Simbol	Keterangan	Satuan
α (<i>alpha</i>)	Sudut kemiringan	deg
β (<i>beta</i>)	Sudut rotasi	deg
γ (<i>gamma</i>)	Sudut kedua	deg
$\mu = mu$	Koefisien gesek	-
θ (<i>theta</i>)	Sudut	deg
θ_{horn}	Sudut <i>Horn</i>	deg
θ_1	Sudut <i>joint</i> 1 (<i>metacarpal</i>)	deg
θ_2	Sudut <i>joint</i> 2 (<i>proximal phalanges</i>)	deg
θ_3	Sudut <i>joint</i> 3 (<i>distal phalanges</i>)	deg
ψ (<i>psi</i>)	Sudut total ($\theta_1 + \theta_2 + \theta_3$)	deg

I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kemajuan pesat dalam teknologi robotika telah mendorong pengembangan prostetik tangan untuk membantu individu yang mengalami amputasi, khususnya akibat trauma. Prostetik ini bertujuan untuk mengembalikan fungsi tangan, yang sangat vital dalam kehidupan sehari-hari. Kehilangan fungsi tangan, bahkan sebagian, seperti ibu jari, dapat menyebabkan penurunan signifikan dalam kemampuan motorik dan kemandirian pengguna. Oleh karena itu, diperlukan solusi prostetik yang mampu meniru gerakan tangan alami secara presisi dan efisien.

Amputasi traumatik merupakan kehilangan anggota tubuh akibat cedera berat, seperti kecelakaan kerja atau lalu lintas. Menurut data dari Pusat Statistik Kesehatan Nasional Amerika Serikat, terdapat lebih dari 30.000 hingga 40.000 pasien dengan kondisi amputasi di negara tersebut, dan jumlah penderita terus meningkat setiap tahunnya. Penyebab utama amputasi adalah trauma, yang umumnya dialami oleh pasien muda, terutama laki-laki (Hanyu-Deutmeyer dkk., 2023). Penelitian yang dilakukan oleh Lintong dkk., (2025) mencatat sebanyak 15 pasien dengan diagnosa amputasi traumatik yang dirawat selama periode 1 Januari 2020 hingga 30 April 2023. Data ini menunjukkan betapa pentingnya pengembangan solusi yang tepat untuk membantu individu yang mengalami amputasi.

Tangan manusia memiliki peran krusial dalam berbagai aktivitas, termasuk menggenggam, memegang, dan mengangkat objek. Fungsi menggenggam

dapat dibagi menjadi dua kategori utama: pegangan jepit (*pinch grip*), yang digunakan untuk memegang benda kecil dengan ujung jari, seperti pensil, dan pegangan tangan penuh (*full grip*), yang digunakan untuk menggenggam benda yang lebih besar dengan seluruh jari, seperti gelas atau botol. Kehilangan fungsi tangan akibat amputasi dapat berdampak signifikan pada kemandirian dan kualitas hidup seseorang. Sebagai contoh, kehilangan satu ibu jari saja dapat mengakibatkan hilangnya sekitar 40% fungsi tangan dan 22% fungsi tubuh secara keseluruhan, yang tentunya berdampak mendalam pada kehidupan sehari-hari pasien yang sehat dan produktif. Oleh karena itu, pengembangan prostetik yang mampu memulihkan fungsi jari menjadi sangat penting (Capek dkk., 2017).

Saat ini, prostetik ekstremitas atas masih memiliki berbagai keterbatasan, baik dari segi biaya yang tinggi maupun adaptabilitas yang kurang sesuai dengan karakteristik pengguna yang beragam. Di negara berkembang, hanya sekitar 5% dari 40 juta orang dengan amputasi yang memiliki akses ke prostetik (Eric, 2022). Kemajuan teknologi robotik menawarkan potensi besar dalam pengembangan prostetik yang lebih personal, efisien, dan adaptif (Fiorillo, 2024). Dengan demikian, adanya perkembangan teknologi dapat meningkatkan kesetaraan dalam akses terhadap prostetik berkualitas bagi individu yang membutuhkan.

Metode *inverse kinematics* dipilih dalam penelitian ini karena kemampuannya untuk menghitung sudut sendi secara akurat berdasarkan posisi target, sehingga memungkinkan gerakan jari tangan robotik yang mendekati gerakan alami manusia. Selain itu, perhitungan massa dan gaya untuk memastikan motor yang digunakan mampu mengangkat benda dengan gaya atau torsi yang memadai tanpa membebani sistem secara berlebihan. Dengan menggabungkan kedua pendekatan ini, penelitian ini bertujuan untuk menciptakan prostetik tangan robotik yang tidak hanya presisi tetapi juga efisien dalam penggunaan energi.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji penerapan metode perhitungan *inverse kinematic* pada gerakan robot. Penelitian yang dilakukan oleh Agustinus Welly dan Adi Nugroho (2015) menggunakan metode kinematika balik untuk menentukan arah gerakan berdasarkan gambar bidang dua dimensi, sementara penelitian Andi Falih Maulandi Andika Putera (2020) meneliti perhitungan gaya genggam pada objek gelas plastik dengan berbagai diameter. Berdasarkan penelitian tersebut, penelitian ini bermaksud menerapkan metode *inverse kinematic* untuk menghitung sudut jari tangan robotik sesuai dengan *baseline* yang ditentukan, serta memanfaatkan perhitungan massa dan gaya. Melalui perhitungan ini, torsi maksimum dari motor servo dapat didistribusikan ke setiap sendi jari untuk menentukan massa angkat maksimal dan jenis motor yang sesuai. Penghitungan kinematika digunakan untuk memperoleh sudut setiap sendi, sementara analisis massa membantu memilih motor dengan torsi yang sesuai untuk mengangkat objek secara efisien. Hal ini diharapkan agar prostetik yang dikembangkan memiliki gerakan yang presisi serta kekuatan yang memadai pada pengguna.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam pengembangan prostetik tangan, terutama dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas fungsi prostetik, serta memberikan akses terhadap model prostetik tangan yang lebih terjangkau, presisi, dan efisien untuk pengguna di negara berkembang. Dengan fokus pada perhitungan kinematika *inverse* dan distribusi torsi, penelitian ini bertujuan untuk menciptakan prostetik yang tidak hanya fungsional tetapi juga memberikan dampak positif pada kualitas hidup penggunanya. Penulis berharap penelitian ini dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya dan memberikan inspirasi bagi pengembangan teknologi yang lebih baik di masa mendatang.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang ingin dijawab dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana menggunakan metode *inverse kinematics* berbasis trigonometri untuk menghasilkan gerakan jari tangan robotik yang akurat terhadap posisi target (*baseline*)?
2. Bagaimana validasi antara hasil perhitungan sudut *inverse kinematics* dengan sudut aktual hasil pengukuran pada jari tangan robotik?
3. Berapa besar massa maksimum objek yang dapat diangkat oleh tangan robotik, berdasarkan torsi maksimum motor *servo* dan pendekatan gaya bebas (*Free Body Diagram/FBD*), serta bagaimana distribusi massa tersebut pada masing-masing sendi jari?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan untuk dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memvalidasi metode *inverse kinematics* berbasis trigonometri untuk menghasilkan gerakan jari tangan robotik secara presisi terhadap posisi target (*baseline*) dengan menggunakan *software*.
2. Memvalidasi hasil perhitungan sudut *inverse kinematics* dengan sudut aktual yang dihasilkan pada jari tangan robotik menggunakan alat ukur.
3. Menghitung massa maksimum objek yang dapat diangkat oleh tangan robotik berdasarkan torsi maksimum motor *servo* dengan menggunakan pendekatan gaya bebas (*Free Body Diagram/FBD*) serta mempertimbangkan gaya normal dan gaya gesek maksimum pada jari robot.

1.4. Batasan Masalah

Agar penelitian lebih terfokus dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan, maka batasan-batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Penelitian hanya difokuskan pada analisis gerakan jari tangan robotik dalam bidang dua dimensi (2D) menggunakan metode *inverse kinematics* berbasis trigonometri.
2. Analisis kinematika dibatasi pada posisi dan sudut jari tangan robotik tanpa mempertimbangkan dinamika gerakan.
3. Gerakan yang dianalisis dibatasi pada aktivitas menggenggam tiga objek, yaitu botol, *cup*, dan sikat gigi.
4. Jari tangan robotik dirancang dengan derajat kebebasan (*degree of freedom*) terbatas, serta dimensi dan panjang jari yang telah ditentukan.
5. Titik *end-effector* ditentukan berdasarkan desain awal tangan robot.
6. Validasi sudut dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan kinematika dengan pengukuran sudut aktual menggunakan busur derajat.
7. Pengukuran sudut menggunakan busur derajat dianggap cukup representatif, dengan toleransi kesalahan spesifikasi alat ukur.
8. Motor *servo* dalam penelitian sudah ditetapkan sehingga massa benda perlu disesuaikan
9. Perhitungan massa mempertimbangkan torsi maksimum motor *servo* berdasarkan pendekatan gaya bebas (*free body diagram/FBD*).

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam laporan penelitian ini sebagai berikut.

1. PENDAHULUAN

Bab ini berisi penjelasan topik penelitian, latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menyajikan teori-teori dasar atau literatur yang menjadi pedoman atau acuan yang relevan dengan penelitian ini.

3. METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan mengenai waktu dan tempat penelitian, alur atau tahapan penelitian, serta metode yang digunakan oleh penulis dalam pelaksanaan penelitian.

4. DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan data pengamatan dan membahas data hasil proses pengujian, serta analisis yang dilakukan berdasarkan data yang diperoleh.

5. PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian dan pembahasan, serta saran yang dapat diberikan oleh penulis berdasarkan temuan yang diperoleh.

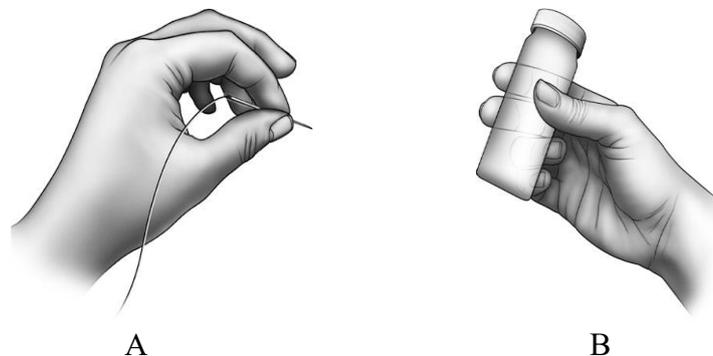
II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Fungsi Tangan

Tangan manusia memiliki fungsi motorik yang sangat kompleks, termasuk kemampuan untuk menggenggam, mencubit, dan melakukan gerakan halus. Genggaman tangan menjadi fungsi utama yang esensial dalam berbagai aktivitas kehidupan sehari-hari seperti makan, menulis, dan memegang objek. Selain itu, jari tangan berperan penting dalam koordinasi gerakan presisi dan respons sensorik yang memastikan manusia dapat beradaptasi dengan berbagai situasi (Duruöz, 2019).

Terdapat empat aspek utama yang digunakan untuk mengklasifikasikan dan mengevaluasi cengkeraman yaitu:

1. Pegangan jepit (*pinch grip*), digunakan untuk memegang benda kecil dengan ujung jari, seperti jarum atau pensil ditunjukkan pada Gambar 1A dan 1B (Duruöz, 2019).



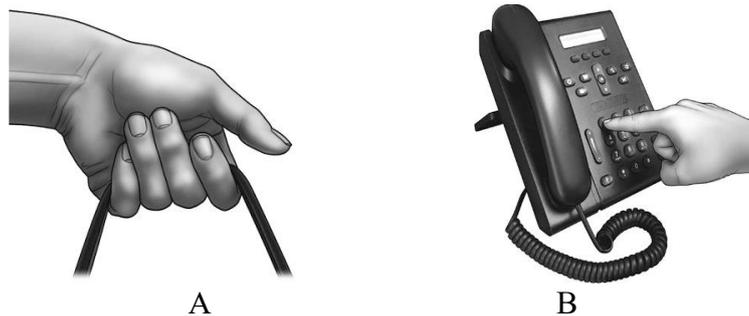
Gambar 1. Menjepit atau Mencubit. (A) Memegang benda (jarum) di antara ibu jari dan ujung jari kedua. (B) Memegang benda di antara ibu jari dan ujung jari kedua dan ketiga (Duruöz, 2019).

2. Pegangan tangan penuh (*power grip*), digunakan untuk menggenggam benda yang lebih besar dengan seluruh jari, seperti gelas atau botol ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Memegang gelas dengan 4 jari dan 1 ibu jari (Duruöz, 2019).

3. Gerakan selain menggenggam, misalnya, menopang beban dengan jari-jari melengkung atau memutar objek dengan ujung jari ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Gerakan selain menggenggam. (A) Jari-jari melengkung yang menopang beban dan ibu jari sebagai penstabil. (B) memutar nomor telepon dengan ujung jari satu tangan (Duruöz, 2019).

4. Menggenggam dengan Kedua Tangan, digunakan untuk memegang benda besar atau berat dengan kedua tangan ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Menggenggam dengan kedua tangan (Duruöz, 2019).

2.2. Tangan Bionik

Tangan bionik adalah perangkat yang menggabungkan konsep biologi dan mekatronika. Awalnya berupa alat sederhana seperti prostetik kait, kini tangan bionik modern dilengkapi sensor taktil dan motor presisi yang membantu pengguna merasakan serta mengontrol objek dengan lebih alami. Desain ergonomisnya memudahkan pengguna melakukan aktivitas sehari-hari dengan lebih nyaman (Mansyur dkk., 2023).

Perkembangan tangan bionik telah mencapai tahap dapat meniru gerakan tangan manusia dengan presisi tinggi. Misalnya, tangan bionik modern dilengkapi dengan sensor tekan dan suhu, memungkinkan pengguna merasakan tekstur dan suhu objek yang dipegang. Berikut adalah tangan bionik yang ditunjukkan pada Gambar 5.

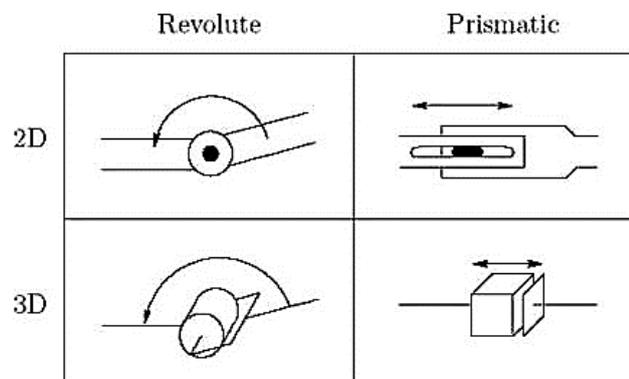


Gambar 5. Tangan Prostetik.
Sumber gambar : Dokumen Penulis.

Struktur dasar sebuah robot manipulator, termasuk tangan bionik, umumnya terdiri dari dua bagian utama: lengan (*link*) dan sambungan (*joint*).

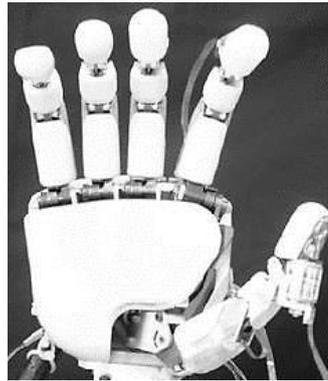
- *Link* adalah komponen kaku yang berfungsi sebagai batang penghubung antar *joint*. Setiap *link* memiliki panjang yang pasti dan tidak berubah selama pergerakan.
- *Joint* adalah sambungan yang menghubungkan dua *link* dan memungkinkan adanya gerakan relatif di antara keduanya.

Ada dua jenis *joint* secara umum, yaitu sendi putar (*revolute joint*) yang memungkinkan gerakan rotasi, dan sendi linear (*prismatic joint*) yang memungkinkan gerakan translasi atau pergeseran lurus seperti dilihat pada Gambar 6. Pada tangan manusia maupun robot *humanoid*, *revolute joint* adalah jenis yang paling umum. Terkait dengan *joint*, terdapat konsep Derajat Kebebasan atau *Degree of Freedom* (DoF), yang merujuk pada jumlah gerakan independen yang dapat dilakukan oleh sebuah sistem. Pada robotika, DoF menentukan fleksibilitas manipulator. Setiap *joint* memberikan setidaknya satu DoF. Misalnya, *revolute joint* menyediakan satu DoF berupa rotasi pada porosnya.



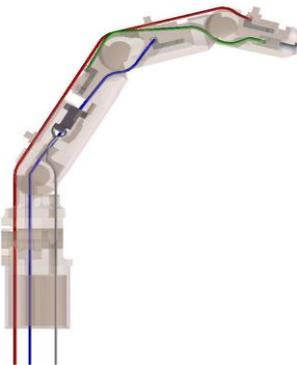
Gambar 6. *Revolute* dan *prismatic* (Nassour, 2016).

Robot *humanoid* merupakan manipulator yang berbentuk seperti tangan manusia, sehingga memiliki fleksibilitas dan kemampuan manipulasi yang mendekati tangan manusia. Pada Gambar 7, tangan *humanoid* ASIMO, memiliki desain yang secara fisiologis mirip dengan tangan manusia. Setiap jarinya dibangun dari beberapa *link* dan *joint*, sehingga secara total memiliki minimal 3 derajat kebebasan per jari.



Gambar 7. Tangan *humanoid* ASIMO (Sakagami dkk., 2002).

Pendekatan yang lebih berfokus pada desain mekanis ditemukan dalam penelitian oleh Borghesan dkk., (2010). Model tangan robot ini digerakkan sepenuhnya oleh tendon, dengan lima tendon per jari, seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Menggunakan lima kabel tegangan untuk menghasilkan gerakan yang mirip dengan tangan manusia.



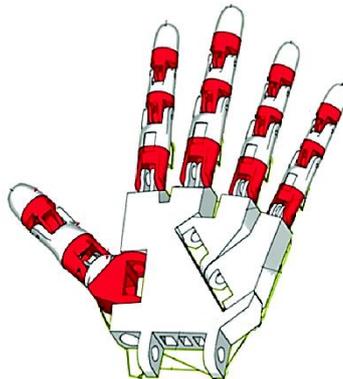
Gambar 8. Konfigurasi tendon (Borghesan dkk., 2010).

Upaya lain untuk mencetak tangan robot kurang aktif (jumlah aktuator lebih sedikit dari derajat kebebasan) telah dilakukan. Penelitian (Raymon dkk., 2013) melibatkan pencetakan 3D tangan empat jari dengan hanya satu aktuator. *Gripper* yang kurang aktif ini mampu mencengkeram berbagai objek bentuk geometris yang beragam ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Prototipe Gripper Robotik (Ma dkk., 2013).

Penelitian (Alrabiah dkk., 2020) menunjukkan bahwa model tangan robot dirancang berdasarkan ukuran tangan manusia dewasa, dengan susunan sendi yang lengkap. Tulang jari tangan dirancang agar menyerupai anatomi manusia secara akurat, sehingga fungsi dan gerakan tangan robot dapat meniru tangan manusia. Pada Gambar 10 bagian berwarna merah menunjukkan *joint* jari yang digerakkan oleh motor *servo* pada setiap sendinya. Namun, ukuran jari yang kecil menyebabkan *servo* berukuran kecil dengan torsi yang tinggi menjadi sangat mahal. Oleh karena itu, diperlukan metode alternatif untuk menghasilkan gerakan menggenggam.



Gambar 10. Meknaika Tangan Robot (Alrabiah dkk., 2020).

2.3. Kinematika Robot

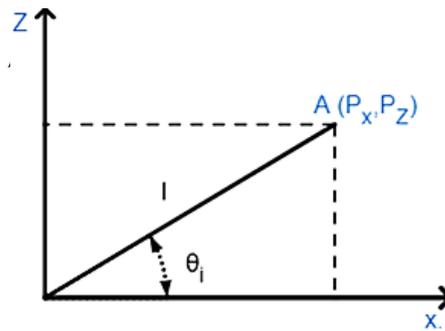
Setelah memahami komponen fisik dasar robot seperti *link*, *joint*, dan Derajat Kebebasan (DoF), langkah selanjutnya adalah menganalisis gerakannya

secara matematis. Di sinilah peran kinematika menjadi sentral. Kinematika memungkinkan kita untuk memodelkan dan memprediksi posisi, kecepatan, dan percepatan dari setiap bagian robot, terutama *end-effector* (ujung jari) berdasarkan sudut pada setiap joint, tanpa perlu mempertimbangkan gaya atau torsi yang menyebabkannya.

Kinematika adalah cabang mekanika klasik yang mempelajari gerak benda tanpa mempertimbangkan gaya penyebab gerakan. Dalam robotika, kinematika berfokus pada studi gerakan dan posisi objek, termasuk tangan robot. Pada tangan robot, kinematika digunakan untuk menghitung derajat kebebasan (*degree of freedom*) gerakan jari, memungkinkan pemodelan dan penggambaran gerakan tangan secara matematis.

Kinematika robot terbagi menjadi dua jenis, yaitu *forward kinematics* dan *inverse kinematics*. *Forward kinematics* digunakan untuk menentukan posisi akhir dari rangkaian sendi berdasarkan sudut yang diberikan, sedangkan *inverse kinematics* digunakan untuk menentukan sudut yang dibutuhkan untuk mencapai posisi akhir tertentu. Penerapan kedua konsep ini penting dalam merancang dan mengoperasikan sistem tangan robot.

Kinematika tangan robot dalam penelitian ini menggunakan metode *inverse kinematics* trigonometri untuk menghitung posisi dan orientasi sambungan berdasarkan posisi akhir. Fokus utama *inverse kinematics* adalah memastikan *end-effector* dapat mencapai posisi akhir objek dengan tepat berdasarkan referensi koordinat yang telah ditentukan (Purwoto dkk., 2020). Salah satu pendekatan untuk menyelesaikan permasalahan *inverse kinematics* adalah pendekatan geometri. Pendekatan di bawah ini menerapkan pandangan dua dimensi untuk memudahkan penentuan sudut pada *joint*, seperti ditunjukkan Gambar 11.



Gambar 11. Sudut *Joint* 1 (Pitowarno, 2006).

Dari Gambar 11 di atas untuk mencari θ_i dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\sin \theta_i = \frac{P_z}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}} \quad (1)$$

$$\cos \theta_i = \frac{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}} \quad (2)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta_i}{\cos \theta_i} \right) \quad (3)$$

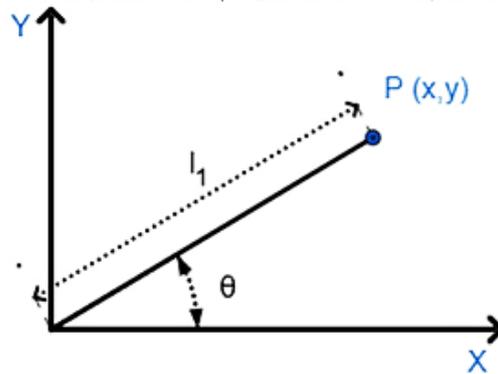
Penyelesaian masalah *inverse kinematics* dengan pendekatan geometri adalah metode paling dasar untuk menyelesaikan persoalan *inverse kinematics*. Perbedaan panjang setiap penghubung (*link*) dan sudut pada setiap sambungan (*joint*) digunakan dalam model perhitungan untuk menentukan koordinat menggunakan pendekatan geometri. Metode ini dipilih karena perhitungannya sederhana dan sangat berguna jika informasi tentang jangkauan area (*workspace*), struktur *joint*, dan *link* robot tersedia (Philips dkk., 2005). Namun, jika struktur *joint* berbeda atau kompleks, metode ini kurang efektif (Nugroho, 2015).

Menurut Endra Pitowarno, 2006 dalam bukunya Robotika: Desain, Kontrol, dan Kecerdasan Buatan, analisis persamaan kinematika dapat diselesaikan menggunakan persamaan trigonometri. Setiap komponen koordinat (X, Z) dinyatakan sebagai transformasi dari tiap komponen ruang sendi (r, θ). Jari-

jari r sering disebut sebagai panjang lengan atau *link* (l). Pendekatan yang digunakan Endra Pitowarno dalam menganalisis permasalahan *inverse kinematics* juga menggunakan metode geometri berbasis hukum trigonometri. Penyelesaian masalah *inverse kinematics* ini dapat diterapkan pada jari tangan robot dengan satu hingga tiga *joint*.

2.3.1. Kinematika Robot Tangan Satu Sendi.

Persamaan kinematika balik robot satu sendi pada Gambar 12 diselesaikan dengan menentukan kedudukan ujung lengan $P(x, y)$ sehingga besar sudut θ dapat dihitung dengan cara (Pitowarno, 2006):



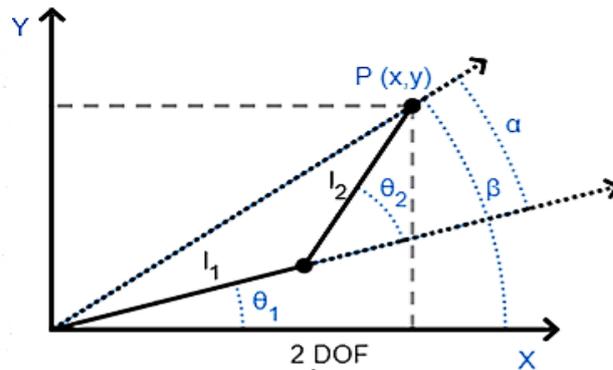
Gambar 12. Konfigurasi Lengan Robot Satu Sendi (Pitowarno, 2006).

Dari Gambar 12 di atas untuk mendapatkan nilai θ maka didapatkan persamaan berikut:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \quad (4)$$

2.3.2. Kinematika Robot Tangan Dua Sendi.

Inverse kinematics lengan robot dua sendi pada Gambar 13 dapat dijabarkan menggunakan hukum identitas trigonometri secara *forward kinematics* (Pitowarno, 2006).



Gambar 13. Konfigurasi Lengan Robot Dua Sendi (Pitowarno, 2006).

Dari Gambar 13 di atas untuk mencari θ_1 dan θ_2 didapatkan persamaan dibawah ini:

$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (5)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (6)$$

Identitas trigonometri:

$$\cos(a + b) = \cos(a) \cos(b) - \sin(a) \sin(b) \quad (7)$$

$$\sin(a + b) = \sin(a) \cos(b) + \sin(b) \cos(a) \quad (8)$$

Persamaan (5) dan (6) dapat ditulis kembali,

$$x = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) - l_2 \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) \quad (9)$$

$$y = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1) \cos(\theta_2) + l_2 \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) \quad (10)$$

Dari dua persamaan terakhir dapat dicari θ_2 dahulu dengan cara mengeluarkan $\cos \theta_2$ dari kedua persamaan. Dengan operasi pangkat dua pada keduanya dan dikombinasikan sehingga didapat (Pitowarno, 2006):

$$\cos \theta_2 = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \quad (11)$$

Sehingga didapatkan θ_2 ,

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right) \quad (12)$$

Sedangkan sudut θ_1 dapat dicari melalui,

$$\tan \alpha = \frac{l_2 \sin \theta_2}{l_2 \cos \theta_2 + l_1} \text{ dan } \tan \beta = \frac{y}{x} \quad (13)$$

sedangkan

$$\theta_1 = \beta - \alpha \quad (14)$$

Dengan menggunakan identitas trigonometri,

$$\tan(a - b) = \frac{\tan(a) - \tan(b)}{1 + \tan(a) \tan(b)} \quad (15)$$

didapatkan,

$$\tan \theta_1 = \frac{y(l_1 + l_2 \cos \theta_2) - x.l_2 \sin \theta_2}{x(l_1 + l_2 \cos \theta_2) + y.l_2 \sin \theta_2} \quad (16)$$

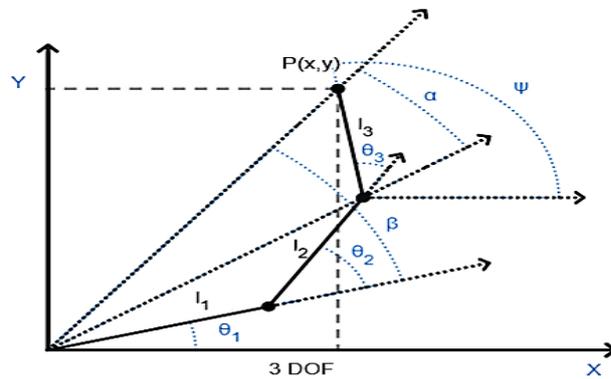
sehingga θ_1 dapat dihitung

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y(l_1 + l_2 \cos \theta_2) - x.l_2 \sin \theta_2}{x(l_1 + l_2 \cos \theta_2) + y.l_2 \sin \theta_2} \right) \quad (17)$$

Dengan penjabaran trigonometri maka persamaan (12) dan (17) merupakan persamaan dari *inverse kinematics* lengan robot dua sendi.

2.3.3. Kinematika Robot Tangan Tiga Sendi.

Koordinat akhir ujung lengan ketiga pada Gambar 14 ditulis $P(X_T, Y_T)$ dengan sudut ψ yang merupakan sudut arah hadap lengan ketiga terhadap sumbu X. Besarnya sudut ψ adalah:



Gambar 14. Konfigurasi Lengan Robot Tiga Sendi (Pitowarno, 2006).

Dari Gambar 14 di atas untuk mendapatkan θ_3 didapatkan persamaan berikut:

$$\psi = (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (18)$$

Inverse kinematics lengan robot tiga sendi posisi $P(X_T, Y_T)$ dan $P(x, y)$ sudah diketahui atau ditentukan sebelumnya maka θ_1 dan θ_2 dapat dicari dengan menggunakan persamaan (19) dan (20). Dengan diketahui besarnya (X_T, Y_T) dan (x, y) maka ψ dapat dicari untuk menentukan besarnya sudut θ_3 .

$$x_T = x_{-l_3} \cos \Psi \quad (19)$$

$$Y_T = y_{-l_3} \sin \Psi \quad (20)$$

2.4. Motor Servo

Motor *servo* digunakan untuk aplikasi gerakan-gerakan sudut dari robot, contohnya gerakan jari, menjepit benda, atau gerakan menggenggam benda. Pada penelitian ini, motor *servo* MG90S dipilih karena ukuran yang kompak dan berat yang ringan, sehingga cocok untuk digunakan dalam desain jari tangan robot. Jari robot prostetik ini menggunakan 6 buah motor *servo* jenis MG90S dapat dilihat pada Gambar 15 yang difokuskan untuk menghitung torsi saat penggengaman.



Gambar 15. Motor *Servo* (Rahimuddin dkk., 2019).

2.4.1. Faktor keamanan

Faktor keamanan (*safety factor*) adalah parameter yang digunakan dalam desain dan analisis mekanik untuk memastikan bahwa suatu sistem atau komponen mampu menahan beban yang diberikan dengan tingkat keamanan yang memadai. Dalam konteks genggaman jari tangan robot, faktor keamanan digunakan untuk menilai kemampuan jari robot dalam menahan beban selama proses menggenggam objek tanpa mengalami kehilangan kestabilan genggaman.

Faktor keamanan dihitung sebagai perbandingan antara kapasitas maksimum yang dapat ditahan oleh suatu komponen dengan beban kerja aktual yang diterima. Nilai faktor keamanan harus lebih besar dari 1 agar sistem dianggap aman dalam operasionalnya (Kresna & Wibawa, 2021). Faktor keamanan dalam desain genggaman jari tangan robot dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, antara lain:

1. **Dimensi dan Struktur Jari Robot:** Ukuran dan bentuk jari robot mempengaruhi distribusi beban serta kekuatan strukturalnya.
2. **Jenis Beban dan Gaya Gesekan:** Beban yang bekerja pada jari robot mencakup gaya normal, gaya gesek, dan gaya berat objek yang digenggam.
3. **Koefisien Gesek:** Interaksi antara jari robot dan objek menentukan kestabilan genggaman.

4. **Motor dan Torsi yang Dihasilkan:** Kinerja *servo* motor dalam menghasilkan gaya yang cukup untuk menggenggam objek berperan dalam menentukan nilai faktor keamanan.

2.4.2. Perhitungan Gaya Genggam

Gaya genggam (*grip force*) adalah gaya yang dihasilkan oleh jari-jari tangan pada permukaan objek untuk mencegah objek jatuh akibat gaya gravitasi. Gaya ini berperan penting dalam memastikan objek tetap berada dalam genggaman, terutama ketika tangan mengangkat atau memindahkan objek. Untuk menghitung gaya genggam, diperlukan pemahaman mengenai gaya minimal yang dibutuhkan agar objek tetap diam dan tidak tergelincir.

Menurut artikel (Lai, 2016) model perhitungan gaya genggam dapat dianalisis menggunakan diagram benda bebas (*free body diagram*), dengan asumsi bahwa akselerasi lengan adalah nol. Jika lengan bergerak cepat, maka percepatan akan memberikan beban tambahan pada objek (Barrette, 2022). Untuk dapat mengetahui gaya apa saja yang bekerja pada gelas, dapat dilihat Gambar 16 berikut:



Gambar 16. Diagram benda bebas objek (Lai, 2016).

Dari Gambar 16 di atas, kondisi statis, saat tangan menggenggam sebuah gelas, maka gelas akan mengalami gaya horizontal (F_x) akibat

tekanan dari jari, dan gaya vertikal (F_y) akibat gaya berat gelas. Untuk menjaga objek tetap diam, gaya gesek statis yang terjadi antara permukaan jari dan objek harus mampu menahan gaya gravitasi. Berdasarkan prinsip keseimbangan gaya secara vertikal dan horizontal, diperoleh:

$$\sum F_y = \text{Frictional Force} - \text{Weight} = 0 \quad (21)$$

$$\sum F_y = \text{Grip Force} - \text{Normal} = 0 \quad (22)$$

Frictional Force atau gaya gesekan dirumuskan sebagai berikut:

$$F_{gesek} = \mu \times N \quad (23)$$

Dengan μ adalah koefisien gesekan statis dan N adalah gaya normal, yang besarnya sama dan berlawanan arah dengan gaya cengkeraman yang disediakan oleh sistem tangan robot.

Berat objek dihitung menggunakan persamaan (24):

$$W = m \times g \quad (24)$$

Karena objek dalam keadaan diam sesuai Hukum Newton I ($\sum F = 0$), maka didapatkan persamaan berikut:

$$\mu \times N = m \times g \quad (25)$$

Dari persamaan (26), besar gaya normal yang harus diberikan oleh tangan robot untuk menjaga objek tetap terenggam adalah:

$$N = \frac{m \times g}{\mu} \quad (26)$$

Massa objek yang digenggam juga dapat ditentukan dari hubungan antara volume dan massa jenis:

$$m = V \times \rho \quad (27)$$

2.4.3. Torsi dan Lengan Momen

Torsi (*torque*) adalah ukuran kecenderungan gaya untuk menyebabkan rotasi terhadap suatu sumbu atau titik tumpu. Torsi sangat penting dalam sistem mekanik seperti tangan robotik, karena menentukan seberapa besar kekuatan yang dibutuhkan motor *servo* untuk menggerakkan jari saat menggenggam dan mengangkat objek. Secara mekanis torsi (T) dirumuskan sebagai:

$$T = F \cdot r \quad (28)$$

Dalam konteks tangan robotik, gaya yang bekerja biasanya berasal dari gaya genggam atau gaya normal jari terhadap objek, sedangkan jarak r merupakan panjang dan ruas jari ke titik gaya bekerja. Torsi maksimum yang dapat dihasilkan oleh motor *servo* akan menentukan apakah sistem dapat mengangkat objek atau tidak. Oleh karena itu, konsep torsi menjadi penting dalam perancangan dan evaluasi kinerja aktuator pada sistem tangan robotik.

III METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan rincian waktu dan tempat sebagai berikut:

1. Tempat

Penelitian ini dilakukan di **Laboratorium CNC Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.**

2. Waktu

Penelitian ini berlangsung selama 10 bulan yaitu dari **Juni 2024 hingga Maret 2025**, mencakup tahap desain, perhitungan kinematika dan validasi eksperimental serta perhitungan torsi.

3.2. Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan sebagai alat utama dalam penelitian ini, meliputi:

1. Subjek utama penelitian ini adalah **jari tangan robot prostetik**, yang digunakan untuk memvalidasi hasil perhitungan kinematika balik, terdiri dari lima jari dengan enam motor *servo* (dua motor untuk ibu jari).
2. **Motor Servo MG90S** digunakan untuk menggerakkan sendi jari dengan torsi yang disesuaikan dengan kebutuhan beban.
3. **Busur derajat** digunakan untuk mengukur sudut sendi jari tangan robot secara manual dengan akurasi $\pm 1^\circ$.
4. **Jangka sorong** digunakan untuk mengukur diameter dan tebal objek uji dengan akurasi ± 0.02 mm.

5. **Objek uji (*baseline*)** meliputi botol, *cup*, dan sikat gigi, sebagai representasi objek dengan variasi massa, ukuran, dan bentuk yang umum digenggam dalam aktivitas sehari-hari.
6. **Perangkat lunak *Microsoft Excel*** digunakan untuk perhitungan kinematika, torsi dan analisis data.
7. **Perangkat lunak *SolidWorks* dan *Roboanalyzer*** digunakan untuk memvalidasi rumus perhitungan kinematika.

3.3. Metode

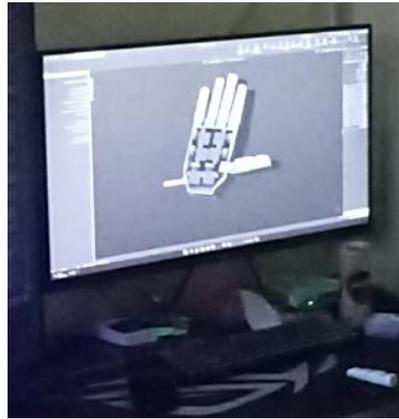
Penelitian ini dilakukan dengan serangkaian metode yang dirancang untuk mencapai tujuan penelitian. Metode penelitian yang digunakan meliputi:

3.3.1. Penentuan *Baseline*

Baseline (benda uji) ditentukan berdasarkan objek sehari-hari yang sering digenggam, yaitu botol, *cup*, dan sikat gigi. Panjang jari, posisi *end-effector*, dan spesifikasi motor *servo* telah ditentukan sebelumnya berdasarkan analisis kebutuhan. Dimensi objek uji diukur menggunakan jangka sorong.

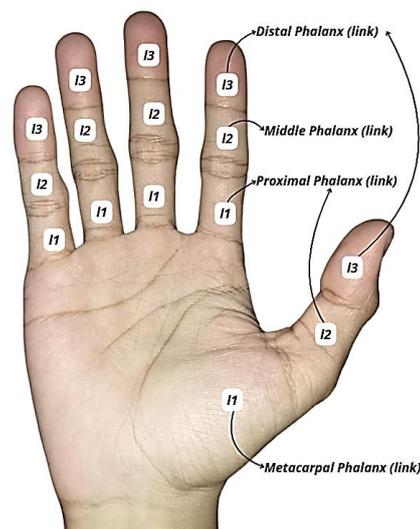
3.3.2. Desain dan Pemodelan Mekanik

Desain jari tangan robot dibuat menggunakan perangkat lunak *SolidWorks*. Desain jari tangan robot prostetik ini mencakup penentuan panjang jari (*link*) dan dimensi setiap objek uji. Pembuatan desain tangan robot dapat dilihat sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 17.



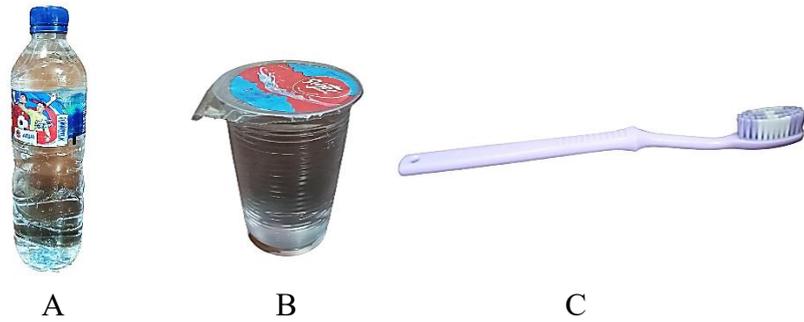
Gambar 17. Pembuatan Desain Tangan Robot.

Pemodelan mekanik dilakukan dengan menggambarkan gerakan jari prostetik dalam dua dimensi berdasarkan posisi *end-effector*. Pemodelan mekanik dirancang agar tangan robot dapat menyesuaikan gerakan dengan objek uji (*baseline*) yang memiliki variasi bentuk. Bagian jari tangan dapat dilihat pada Gambar 18.



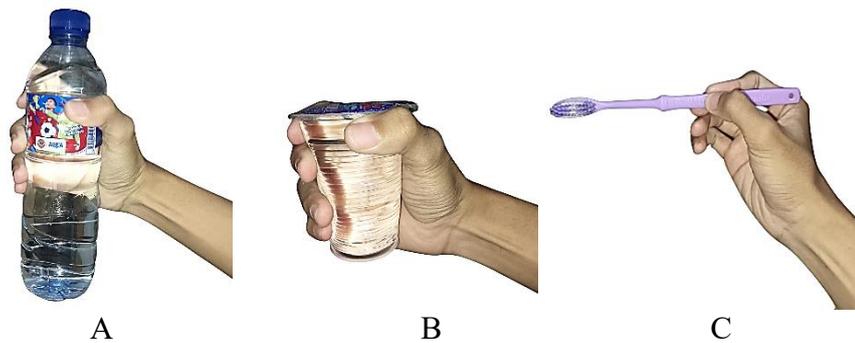
Gambar 18. Bagian Jari Tangan.

Pengujian genggam dan jepitan dilakukan dengan menggunakan objek uji berupa botol, *cup*, dan sikat gigi. Objek uji yang digunakan sebagai objek untuk mewakili aktivitas sehari-hari. Detail objek uji dapat dilihat pada Gambar 19.



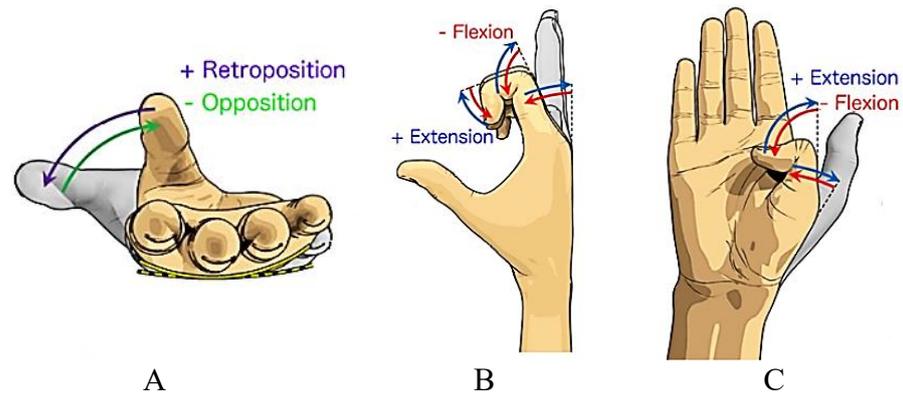
Gambar 19. Objek Uji Genggaman. (A) Botol. (B) *Cup*. (C) Sikat Gigi.

Selanjutnya dilakukan simulasi untuk mengamati gerakan tangan dalam aktivitas sehari-hari, seperti menggenggam botol, *cup*, dan menjepit sikat gigi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 20.



Gambar 20. Simulasi Gerakan Penggenggaman pada Aktivitas Sehari-hari. (A) Menggenggam Botol. (B) Menggenggam *Cup*. (C) Menjepit Sikat Gigi.

Pada Gambar 20A dan 20B, jari-jari yang digunakan untuk menggenggam botol dan *cup* adalah ibu jari hingga kelingking. Sementara itu, pada Gambar 20C, gerakan menjepit sikat gigi hanya menggunakan ibu jari dan telunjuk. Sistem gerak jari robot dirancang untuk mereplikasi gerakan *fleksi-ekstensi* dan *Opposition-retroposisi* berdasarkan kinematika tangan manusia (Cabibihan dkk., 2021), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 21.



Gambar 21. Macam-macam Gerakan Jari. (A) *Opposition/retroposisi* ibu jari. (B) *Fleksi/ekstensi* jari-jari lainnya. (C) *Fleksi/ekstensi* pada sendi ibu jari.

Jari robot prostetik memiliki spesifikasi panjang sebagaimana tercantum dalam Tabel 1. Panjang jari telah ditetapkan untuk memfasilitasi perhitungan sudut menggunakan metode kinematika balik. Panjang jari *link* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Panjang Jari *Link* Penghubung.

Nama Jari	Penamaan Jari	Sebutan Jari	Panjang <i>Link</i> (mm)
Ibu Jari	l_3	<i>Distal</i>	33,402
	l_2	<i>Proximal</i>	36
	l_1	<i>Metakarpal</i>	68,716
Telunjuk	l_3	<i>Distal</i>	22,330
	l_2	<i>Medial</i>	28,028
	l_1	<i>Proximal</i>	38,252
Tengah	l_3	<i>Distal</i>	22,198
	l_2	<i>Medial</i>	30,883
	l_1	<i>Proximal</i>	49,202
Manis	l_3	<i>Distal</i>	18,746
	l_2	<i>Medial</i>	30,973
	l_1	<i>Proximal</i>	40,398
Kelingking	l_3	<i>Distal</i>	18,034
	l_2	<i>Medial</i>	20,206
	l_1	<i>Proximal</i>	24,590

Setiap objek memiliki diameter dan berat yang berbeda, sehingga pengukuran objek uji dilakukan terlebih dahulu untuk mempermudah perhitungan torsi, sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Dimensi dan Berat Objek Uji.

No	Nama Benda	Diameter/Tebal	Berat
1.	Botol	6,5 cm (Diameter)	600 g
2.	Cup	7 cm (Diameter)	200 g
3.	Sikat Gigi	0,58 cm (Tebal)	16 g

Jari prostetik digerakkan oleh enam motor *servo*, di mana ibu jari menggunakan dua motor *servo* untuk memungkinkan gerakan lebih kompleks, sedangkan jari lainnya masing-masing menggunakan satu motor *servo*. Untuk spesifikasi motor yang digunakan dalam penelitian ini, dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Spesifikasi Motor MG90s (Alldatasheetcom, t.t.).

Parameter	Nilai
Torsi	1.8 kgf cm (4.8 V), 2.2 kgf cm (6V)
Dimensi	22.5 x 12 x 35.5 mm
Berat	13.4 g
Speed	0.1 s/60 degree (4.8 V), 0.08 s/60 degree (6 V)

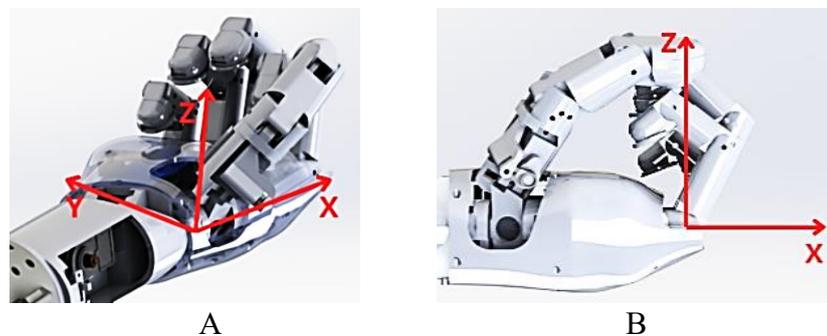
3.3.3. Penetapan Titik *End-effector*

Titik *end-effector* pada tangan robot ditetapkan berdasarkan desain yang telah dibuat. Titik ini didefinisikan sebagai titik ujung jari yang bersentuhan langsung dengan objek saat menggenggam. Panjang *link* jari ditentukan berdasarkan proporsi tangan manusia dan kebutuhan fungsional robot. *End-effector* yang digunakan dalam penelitian ini telah ditetapkan sesuai dengan *baseline*, sebagaimana dirangkum dalam Tabel 4 titik *end-effector* yang telah ditentukan di bawah ini.

Tabel 4 Titik *end-effector* yang telah ditetapkan.

Posisi	Nama Jari	Sudut	Titik <i>end-effector</i>						
			X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X _T (mm)	Y _T (mm)	Z _T (mm)	ψ (°)
Genggam Botol	Ibu Jari	θ_2, θ_3	65,164	22,521	-	-	-	-	-
		θ_1	-	1,486	97,669	-	-	-	-
	Telunjuk	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	-	-	-	20,363	-	66,977	130,89
	Tengah	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	-	-	-	12,365	-	75,536	150,133
	Manis	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	-	-	-	18,614	-	69,221	136,783
	Kelingking	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	-	-	-	28,619	-	47,568	96,704
Genggam Cup	Ibu Jari	θ_2, θ_3	65,091	22,705	-	-	-	-	-
		θ_1	-	1,375	97,534	-	-	-	-
	Telunjuk	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	-	-	-	28,791	-	66,874	119,594
	Tengah	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	-	-	-	9,984	-	75,017	153,174
	Manis	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	-	-	-	5,469	-	67,212	154,654
	Kelingking	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	-	-	-	13,786	-	49,514	122,391
Jepit Sikat Gigi	Ibu Jari	θ_2, θ_3	58,270	35,429	-	-	-	-	-
		θ_1	-	-6,807	86,665	-	-	-	-
	Telunjuk	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	-	-	-	4,986	-	63,866	153,032

Tabel 4 menunjukkan titik *end-effector* yang telah ditetapkan untuk setiap posisi genggam dan jepitan objek menggunakan persamaan geometri *inverse kinematics*, selanjutnya posisi *end-effector* selanjutnya ditampilkan pada Gambar 22.



Gambar 22. Sumbu koordinat jari robot prostetik. (A) Tampilan 3 Sumbu (X,Y dan Z) pada ibu jari. (B) Tampilan 2 Sumbu (X dan Z) pada jari telunjuk hingga kelingking.

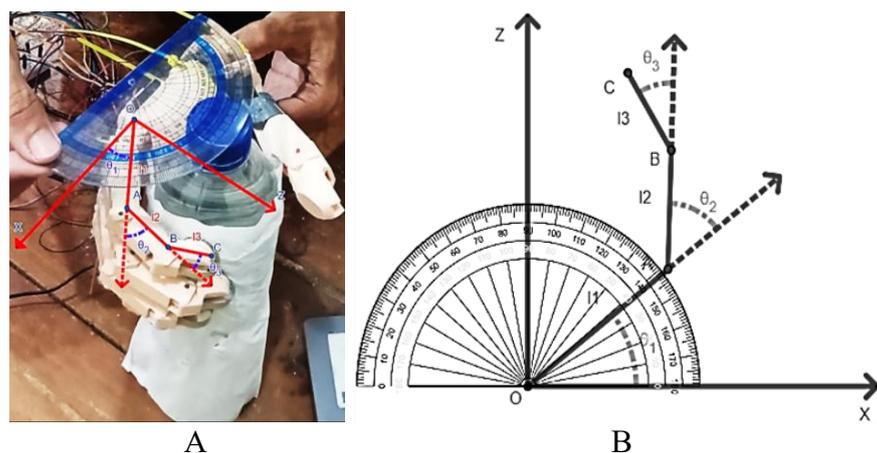
Gambar 22 memperlihatkan sistem sumbu koordinat jari robot prostetik yang digunakan untuk perhitungan kinematika. Konfigurasi ini memungkinkan jari robot bergerak menyerupai pola *fleksi-ekstensi* alami jari manusia. Pada Gambar 22A, sistem sumbu koordinat ibu jari memiliki dua derajat kebebasan (2 DOF) dengan tiga sumbu rotasi. Rotasi sumbu Y dan Z pada *metacarpal* (θ_1) dihitung menggunakan

persamaan (4) untuk menggerakkan jari ke atas dan ke bawah. Rotasi sumbu X dan Y pada *proximal* (θ_2 dan θ_3) dihitung menggunakan persamaan (12) dan (17), dengan posisi *end-effector* di l_2 yang memungkinkan jari menekuk dan meluruskan.

Sementara itu, Gambar 22B menunjukkan sistem sumbu koordinat untuk jari telunjuk hingga kelingking. Jari-jari ini memiliki satu derajat kebebasan (1 DOF). Posisi *end-effector* awal berada di l_3 . Untuk mendapatkan *end-effector* di l_2 (sumbu X dan Z) dihitung dengan persamaan (19) dan (20), sedangkan rotasi sumbu Y dan Z dihitung menggunakan persamaan (12) untuk nilai θ_1 dan persamaan (17) nilai θ_2 . Sudut θ_3 diperoleh dari persamaan (18), yaitu $\psi - (\theta_2 + \theta_1)$.

3.3.4. Pengukuran Sudut

Pengukuran sudut dilakukan dengan busur derajat yang ditempatkan pada setiap sendi jari. Setiap pengujian dilakukan sebanyak lima kali untuk memvalidasi hasil perhitungan kinematika. Sudut diukur dari posisi awal (jari lurus) hingga posisi akhir (menggenggam objek), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 23.



Gambar 23. Pengukuran Sudut Jari Telunjuk Menggunakan Busur Derajat. (A) Pengukuran θ_1 . (B) Penyederhanaan Pengukuran θ_1 .

3.3.5. Validasi Perhitungan Kinematika

Validasi terhadap hasil perhitungan kinematika dilakukan menggunakan perangkat lunak *SolidWorks* dan *RoboAnalyzer* dengan memasukkan parameter titik referensi dan panjang masing-masing jari tangan robot. Proses validasi ini bertujuan untuk membandingkan hasil perhitungan sudut berdasarkan *inverse kinematics* (Y_n) dengan hasil pengukuran sudut aktual secara langsung (nilai sebenarnya) X_n . Langkah-langkah validasi meliputi:

1. Pengukuran Sudut Eksperimen (X_n).

Pengukuran sudut dilakukan pada setiap sendi jari tangan robot menggunakan busur derajat, saat robot melakukan gerakan menggenggam dan menjepit. Setiap sudut yang terukur kemudian dihitung nilai rata-ratanya, sesuai dengan metode pada penelitian (Febriani, 2022):

$$X_n = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (29)$$

2. Perhitungan Kinematika (Y_n)

Nilai sudut teoretis dihitung menggunakan metode *inverse kinematics* dengan panjang jari dan posisi titik *end-effector*. Hasil ini kemudian dibandingkan secara langsung dengan hasil eksperimen.

3. Analisis Error

Untuk mengetahui akurasi perhitungan, dilakukan dua jenis evaluasi *error*:

A. Error Absolut (e_a)

Merupakan selisih langsung antara hasil eksperimen dan hasil perhitungan, dihitung menggunakan rumus (Asrori dkk., 2022):

$$e_a = X_n - Y_n \quad (30)$$

B. Error Relatif (e_r)

Mengukur tingkat deviasi hasil terhadap nilai referensi, dalam hal ini X_n sebagai nilai eksperimen:

$$e_r = \frac{X_n - Y_n}{X_n} \times 100\% \quad (31)$$

4. Validasi Hasil (Pendekatan Ketat)

A. Validasi dianggap berhasil jika:

- *Error absolut* $\leq 2^\circ$, berdasarkan resolusi busur derajat ($\pm 1^\circ$ hingga $\pm 0.5^\circ$).
- *Error relatif* $\leq 5\%$, sebagai batas akurasi yang dapat diterima secara teknis.

B. Pertimbangan Toleransi:

Karena pengukuran dilakukan secara manual, potensi *human error* tetap ada, sehingga batas toleransi hingga 2° masih dianggap realistis.

C. Ketidaksesuaian Validasi:

Hasil perhitungan dianggap tidak valid apabila:

- *Error absolut* melebihi 2° , mengindikasikan perbedaan sudut yang terlalu besar dari ketelitian alat.
- *Error relatif* melebihi 5% , bila robot tidak mampu menjepit atau menggenggam objek secara efektif akibat konfigurasi sudut dan panjang jari yang tidak sesuai dengan dimensi objek.

3.3.6. Perhitungan Massa dan Gaya

Perhitungan massa dilakukan untuk memastikan bahwa torsi maksimum dari motor *servo* yang digunakan mampu mengangkat beban objek yang digenggam oleh tangan robot. Dalam penelitian ini, motor *servo* MG90S digunakan pada 5v dari interpolasi spesifikasi motor *servo* didapatkan torsi maksimum sebesar 0,183 Nm. Untuk mengetahui apakah torsi ini cukup untuk mengangkat beban, dilakukan perhitungan gaya normal dan gaya gesek maksimum. Perhitungan gaya normal maksimum (gaya genggam) dapat dihitung menggunakan persamaan (32) berikut:

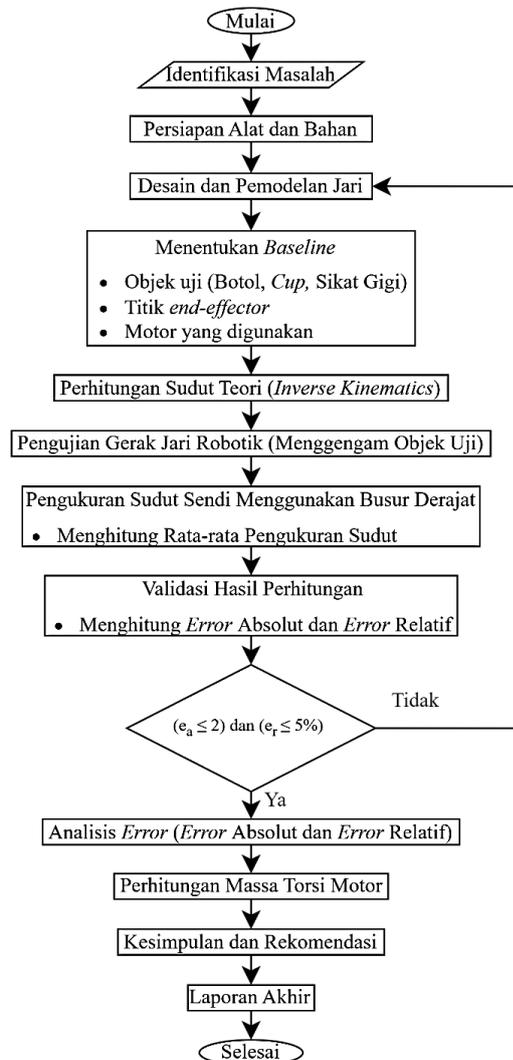
$$T = N \cdot r \cdot \sin(\theta) \Rightarrow N = \frac{T_{max}}{r \cdot \sin(\theta)} \quad (32)$$

Gaya gesek maksimum yang dapat menahan beban menggunakan persamaan 23. Selanjutnya gaya gesek maksimum harus mampu menahan gaya gravitasi pada massa maksimum menggunakan persamaan (33):

$$m = \frac{F_{gesek}}{g} \quad (33)$$

3.4. Alur Penelitian

Alur penelitian ini dirancang untuk memastikan setiap tahapan penelitian dapat dilaksanakan dengan baik. Berikut adalah diagram alir penelitian:



Gambar 24. *Flowchart* Penelitian

V SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pengujian yang telah dilakukan, diperoleh simpulan sebagai berikut:

1. Model *inverse kinematics* berbasis trigonometri yang dirancang telah berhasil divalidasi melalui perangkat lunak *SolidWorks* dan *RoboAnalyzer*. Hasil perbandingan menunjukkan kesesuaian yang sangat tinggi dengan selisih sudut maksimum hanya $-0,012^\circ$, yang membuktikan bahwa model matematis untuk menghitung sudut sendi ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) sudah akurat dan dapat diandalkan.
2. Validasi eksperimental antara perhitungan sudut dengan pengukuran aktual menunjukkan hasil yang berbeda tergantung pada jenis genggaman. Pada gerakan menggenggam botol dan *cup (power grip)*, model terbukti valid. Seluruh 30 sendi yang diuji memenuhi kriteria toleransi dengan nilai *error absolut* (e_a) terbesar hanya $1,007^\circ$ dan ketidakpastian relatif (e_r) terbesar 1,964%, masih di bawah ambang batas yang ditetapkan ($e_a \leq 2^\circ$; $e_r \leq 5\%$). Pada gerakan menjepit sikat gigi (*precision grip*), model terbukti tidak valid pada beberapa sendi krusial. Kegagalan terjadi pada sendi proksimal jari telunjuk (θ_1) dengan $e_a = 2,579^\circ$ dan $e_r = 5,707\%$, serta pada ibu jari sendi metakarpal (θ_1) dengan $e_a = 2,109^\circ$ dan distal (θ_3) $e_r = 5,270\%$. Penyimpangan ini disebabkan oleh akumulasi celah mekanis (*backlash*) dan keterbatasan model dalam mensimulasikan gerakan presisi dengan sudut ekstrim.
3. Analisis daya angkat berdasarkan torsi motor *servo* MG90S (0,183 Nm) menunjukkan tangan robot memiliki total massa angkat maksimum teoritis

sebesar 334,4 gram. Kemampuan ini terkonfirmasi secara eksperimental, di mana tangan robot berhasil mengangkat *cup* (220 gram) dan sikat gigi (16 gram), namun gagal mengangkat botol berisi air (600 gram) karena massanya melebihi kapasitas angkat maksimum.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan keterbatasan yang ditemukan, berikut beberapa saran untuk penelitian selanjutnya:

1. **Mengoptimalkan Desain Mekanik untuk Gerakan Presisi:** Mengingat *backlash* teridentifikasi sebagai penyebab utama kegagalan validasi pada gerakan menjepit, perbaikan desain mekanik menjadi prioritas. Disarankan untuk menggunakan sambungan sendi yang lebih presisi, mengurangi celah toleransi, serta mempertimbangkan penggunaan material yang lebih kaku untuk meminimalkan deformasi struktur.
2. **Peningkatan Spesifikasi Aktuator (Motor Servo):** Untuk mengatasi kegagalan mengangkat beban berat dan meningkatkan akurasi, direkomendasikan penggunaan motor *servo* dengan **torsi yang lebih besar** (di atas 0,2 Nm per motor) dan **resolusi sudut yang lebih tinggi**. Ini akan meningkatkan daya angkat total dan mengurangi penyimpangan sudut akibat beban.
3. **Pengembangan Model Kinematika dan Sistem Kontrol Lanjutan:** Untuk meningkatkan fleksibilitas, derajat kebebasan (*DOF*) dapat ditambahkan pada telapak tangan. Selain itu, untuk mengatasi ketidakakuratan pada gerakan presisi, dapat dikembangkan model kinematika yang lebih kompleks atau diimplementasikan sistem kontrol *closed-loop* dengan sensor gaya (*force sensor*) pada ujung jari untuk memberikan umpan balik dan koreksi gerakan secara *real-time*.

DAFTAR PUSTAKA

- Alrabiah, M., AlMuneef, H., AlMarri, S., AlShammari, E., & Alsunaid, F. (2020). A Robotic Hand for Arabic Sign Language Teaching and Translation. *Intelligent Systems and Applications, Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1038.
- Asrori, M., Rezika, W. Y., Salim, A. T. A., Indarto, B., & Nudiansyah, R. T. (2022). Kalibrasi Alat Ukur Temperatur Dan Kelembapan Kereta Rel Diesel Elektrik. *J-TETA (Jurnal Teknik Terapan)*, 1 (2).
- Barrette, M. B. (2022, Mei 12). *Robotic End Effectors - Payload vs Grip Force*. Robotiq. <https://blog.robotiq.com/bid/69524/robotic-end-effectors-payload-vs-grip-force>
- Borghesan, G., Palli, G., & Melchiorri, C. (2010). Design of tendon-driven robotic fingers: Modeling and control issues. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 793–798. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2010.5509899>
- By ALLDATASHEETCOM, P. (t.t.). *MG90S servo, Metal gear with one bearing*. Diambil 13 Mei 2024, dari https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Mg90s&gad_source=1&gclid=CjwKCAjw0YGyBhByEiwAQmBEWvkRm3BaOuVl8IWdRUVSUIMtDZl2hG_TLtvQ0UNqCPoQ75yCE85g5BoCHXUQAvD_BwE
- Cabibihan, J. J., Alkhatib, F., Mudassir, M., Lambert, L. A., Al-Kwafi, O. S., Diab, K., & Mahdi, E. (2021). Suitability of the Openly Accessible 3D Printed Prosthetic Hands for War-Wounded Children. *Frontiers in Robotics and AI*, 7. <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.594196>
- Capek, K. D., Hughes, B. D., & Warden, G. D. (2017). Functional Sequelae and Disability Assessment. Dalam *Total Burn Care, Fifth Edition* (hlm. 673-678.e1). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-47661-4.00063-0>
- Duruöz, M. T. (2019). Hand Function: A Practical Guide to Assessment. Dalam *Hand Function* (Secound Edition). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-17000-4>

- Eric C. (2022). *3D printed prosthetics: Meet the real revolution*. USA: Sculpteo. 2022. <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/applications-of-3d-printing/3d-printed-prosthetics/>
- Febriani, S. (2022). Analisis Deskriptif Standar Deviasi. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 6 (1), 910–913.
- Fiorillo, L. (2024). *Artificial Intelligence in Prosthesis and Rehabilitation: Advancements and Challenges*. Switzerland: MDPI. https://www.mdpi.com/journal/prosthesis/special_issues/QI0BR1XT24
- Hanyu-Deutmeyer, Aaron. A., Cascella, M., & Varacallo, M. (2023). *Phantom Limb Pain*. StatPearls Publishing. <https://www.researchgate.net/publication/336719534>
- Kresna, R. K. N., & Wibawa, L. A. N. (2021). Desain dan Analisis Tegangan Rangka Alat Simulasi Pergerakan Kendali Terbang Menggunakan Metode Elemen Hingga. *JURNAL TEKNIK MESIN – ITI*, 5(1), 19–28.
- Lai, M. (2016). *Fall 2016 Prosthetic Hand: Force And Torque Calculation*. <https://www.arxterra.com/fall-2016-prosthetic-hand-force-and-torque-calculations/>
- Lintong, P., Kalitouw, F., & Kalitouw, P. (2025). Profil Kasus Amputasi Jari Traumatik di Rumah Sakit Umum Daerah Bitung Selang 1 Januari 2020 – 30 April 2023. *e-CliniC*, 13 (1), 67–72. <https://doi.org/10.35790/ecl.v13i1.60578>
- Ma, R., Odhner, L. U., & Dollar, A. M. (2013). A Modular, Open-Source 3D Printed Underactuated Hand. *Robotics and Automation (ICRA)*.
- Mansyur, M., Malik, M., Burhanuddin, A., & Malik, J. A. (2023). Speech Recognition pada Kontrol Gerak Tangan Bionik Berbasis Raspberry Pi dan Arduino. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, 7(1), 55–62. <https://doi.org/10.01.2023>
- Nassour, Dr.-I. J. (2016). *Forward Kinematics*. https://www.tu-chemnitz.de/informatik/KI/edu/robotik/ws2016/lecture-03_p1.pdf
- Nugroho, A. W. A. (2015). *Lengan Robot Penggambar Bidang Dua Dimensi Berbasis Mikrokontroler Dengan PC*. Universitas Sanata Dharma.
- Philips, Arthur, & Prabawa, E. (2005). *Simulasi Kinematika dari Integrasi Robot Mitsubishi RV-MI dengan Festo Modular Production System (MPS)*. Universitas Bina Nusantara.
- Pitowarno, E. (2006). *Robotika; Desain, Kontrol, dan Kecerdasan Buatan* (1 ed.). Andi.

- Purwoto, B. H., Rhokhim, D. R., & Indraswari, D. (2020). Pemodelan Robot Kinematik Manipulator Menggunakan Matlab. *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, 20(02).
- Putra, A. F. M. A. (2020). *Rancang Bangun Sistem Teleoperasi Lengan Robot Menggunakan Sensor Taktil*. Universitas Indonesia.
- Rahimuddin, Syarif, S., Syam, R., Arzaq, Setiawan, A., & AlQadri, S. (2019). Robot Penggerak Dua Roda Sebagai Media Pembelajaran Robotik bagi Siswa SMA 05 Barru. *Jurnal Tepat (Teknologi Terapan Untuk Pengabdian Masyarakat)*, 2(2). www.arduino.cc/en/Main
- Sakagami, Y., Watanabe, R., Aoyama, C., Matsunaga, S., Higaki, N., & Fujimura, K. (2002). The intelligent ASIMO: System overview and integration. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3, 2478–2483. <https://doi.org/10.1109/irds.2002.1041641>