

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL BAHASA INDONESIA	i
HALAMAN JUDUL BAHASA INGGRIS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
HALAMAN PENGUJIAN	iv
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
NASKAH SOAL TUGAS AKHIR	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xix
INTISARI	xxiii
ABSTRACT	xxiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Robot Lokomotif pada Lingkungan Agrikultur	6
2.2. Transmisi <i>Planetary Gearbox</i> dalam Robotika	7
2.3. Transmisi <i>Cycloidal Drive</i> dalam Robotika	8
2.3.1. Transmisi <i>Cycloidal</i> Cakram Tunggal (<i>Single-Disc Cycloidal Drive</i>)	10
2.3.2. Transmisi <i>Cycloidal</i> Cakram Ganda (<i>Dual-Disc Cycloidal Drive</i>)	11
2.4. <i>Soft Robotic Gripper</i> dan Pendekatan Manufaktur FDM	12
	xi

2.5. Sistem Teleoperasi <i>Open-Loop</i>	14
2.6. Desain Roda Non-Pneumatik (<i>Airless Tire</i>) Berbasis Manufaktur Aditif Polimer TPU	15
2.7. Sistem Teleoperasi <i>Open-Loop</i>	18
BAB III LANDASAN TEORI	20
3.1. Konsep Dasar Robotika dan Derajat Kebebasan (DOF)	20
3.2. Jenis-Jenis Konfigurasi Lengan Robot (Manipulator)	21
3.2.1. Robot Kartesian (<i>Cartesian/Gantry Robot</i>)	22
3.2.2. Robot Silindris (<i>Cylindrical Robot</i>)	23
3.2.3. Robot Sferis atau Polar (<i>Spherical/Polar Robot</i>)	23
3.2.4. Robot SCARA (<i>Selective Compliance Assembly Robot Arm</i>)	24
3.2.5. Robot Artikulasi (<i>Articulated Robot</i>)	25
3.3. Kinematika Robot	25
3.3.1. Kinematika <i>Mobile Robot (Differential Drive)</i>	26
3.3.2. Kinematika Maju (<i>Forward Kinematics</i>)	27
3.4. Kestimbangan Statis dan Stabilitas Kendaraan (<i>Vehicle Stability</i>)	28
3.4.1. Poligon Tumpuan dan Momen Kestimbangan	28
3.4.2. Momen Penahan (<i>Resisting Moment</i>)	29
3.4.3. Momen Guling (<i>Tipping Moment</i>)	29
3.4.4. Faktor Keamanan Stabilitas (<i>Stability Safety Factor</i>)	30
3.5. Analisis Pembebanan Statis dan Faktor Keamanan (Safety Factor)	30
3.5.1. Torsi Beban Statis Lengan Robot	31
3.5.2. Torsi Luaran Sistem Transmisi (<i>Toutput</i>)	31
3.5.3. Faktor Keamanan (Safety Factor)	32
3.6. Sistem Transmisi Sabuk (<i>Belt Drive</i>) dan Multiplikasi Torsi	33
3.7. Teori Kontak Mekanis dan Gesekan Ban dengan Tanah (<i>Terramechanics</i>)	34
3.8. Karakteristik Struktur Mekanis <i>Airless Tire</i> Berbasis <i>Flexible Spokes</i>	35
3.9. Transmisi <i>Planetary Gearbox</i>	36

3.10. Transmisi <i>Cycloidal Drive</i>	37
3.10.1. Prinsip Inversi Kinematika dan Desain <i>Non-Pinwheel</i>	38
3.10.2. Analisis Kinematika Rasio Reduksi	39
3.10.3. Persamaan Geometri Penahan Stasioner dan Eksentrisitas	39
3.10.4. Rasio Kurva Sikloidal (<i>K</i>)	40
3.10.5. Kepatuhan Toleransi untuk Manufaktur Aditif (FDM)	41
3.11. Mekanisme Penjepit Angular dan Kepatuhan Mekanis	41
3.12. Prinsip Kerja Aktuator Motor <i>Stepper</i> dan <i>Microstepping</i>	43
3.13. Prinsip Kerja Motor DC Gearbox dan <i>Pulse Width Modulation</i> (PWM)	44
3.14. Metode Manufaktur FDM dan Karakteristik Material Polimer (PLA & TPU)	45
3.14.1. <i>Polylactic Acid</i> (PLA)	45
3.14.2. <i>Thermoplastic Polyurethane</i> (TPU)	46
3.15. Arsitektur Komunikasi Serial <i>Master-Slave</i>	46
BAB IV METODE PENELITIAN	48
4.1. Waktu dan Tempat Penelitian	48
4.2. Diagram Alir Penelitian	48
4.3. Alat dan Bahan Penelitian	50
4.3.1. Alat Penelitian	50
4.3.2. Bahan Penelitian	53
4.4. Perancangan Perangkat Keras (Perancangan Mekanik)	62
4.4.1. Perancangan Sasis Utama (<i>Mobile Base</i>)	62
4.4.2. Perancangan Sistem Penggerak Sasis dan Roda <i>Airless</i>	64
4.4.3. Analisis Stabilitas Titik Berat (<i>Center of Gravity</i>) dan Poligon Tumpuan	66
4.4.3.1. Analisis Poligon Tumpuan dan Stabilitas Lateral	66
4.4.3.2. Perhitungan Kesetimbangan Momen Guling dan <i>Wheelbase</i>	67
4.4.4. Perancangan Lengan Manipulator 4 DOF dan Transmisi <i>Cycloidal Drive</i>	70
4.4.4.1. Perhitungan Torsi Beban Statis Maksimum (<i>T_{Joint}</i>)	72

4.4.4.2. Perhitungan Torsi Luaran Sistem Transmisi (<i>T_{output}</i>) dan Analisis <i>Safety Factor</i> (SF)	75
4.4.4.3. Analisis Ruang Kerja (<i>Workspace Envelope</i>) Lengan Manipulator	78
4.4.5. Perancangan Planetary Gearbox (<i>Base Joint</i>)	81
4.4.5.1. Penentuan Geometri Roda Gigi Cincin (<i>Ring Gear</i>) Bersama	81
4.4.5.2. Analisis Susunan <i>Stage 1</i> (Rasio 1:9)	82
4.4.5.3. Analisis Susunan <i>Stage 2</i> (Rasio 1:5)	84
4.4.6. Perancangan Transmisi <i>Cycloidal Drive</i>	87
4.4.6.1. Penentuan Dimensi Dasar dan Rasio Reduksi	87
4.4.6.2. Penentuan Eksentrisitas Berdasarkan Rasio Kurva (<i>K</i>)	88
4.4.6.3. Mekanisme Penahan dan Geometri Pin Stasioner	89
4.4.6.4. Prosedur Perakitan (<i>Assembly</i>) Transmisi <i>Cycloidal Drive</i>	91
4.4.7. Perancangan Mekanisme <i>End-Effector</i> (<i>Soft Gripper</i>)	94
4.4.8. Optimasi Kekuatan Struktural Berbasis <i>Design for Additive Manufacturing</i> (DfAM)	95
4.4.9. Tahap Fabrikasi dan Manufaktur Aditif	97
4.4.9.1. Parameter Pencetakan <i>Polylactic Acid</i> (PLA)	97
4.4.9.2. Parameter Pencetakan <i>Thermoplastic Polyurethane</i> (TPU)	98
4.5. Perancangan Sistem Kelistrikan (<i>Wiring Architecture</i>)	100
4.5.1. Arsitektur Manajemen Daya (<i>Power Management System</i>)	101
4.5.2. Pemetaan Koneksi dan Integrasi Kendali (<i>Pin Mapping</i>)	101
4.5.3. Integritas Komunikasi Master-Slave	102
4.6. Perancangan Perangkat Lunak (<i>Software Implementation</i>)	104
4.6.1. Arsitektur dan Logika Algoritma <i>Master Controller</i> (Raspberry Pi 4)	104
4.6.2. Algoritma dan Mekanisme <i>Parsing Data Slave Controller</i> (Arduino Mega 2560)	106
4.6.3. Logika Generator Pulsa Motor <i>Non-Blocking</i>	108
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	111

5.1. Realisasi Perangkat Keras dan Manufaktur Aditif	111
5.1.1. Hasil Cetak 3D FDM (PLA dan TPU)	112
5.1.2. Integrasi Sasis dan Elektronika	113
5.2. Pengujian Sistem Lokomosi dan Mobilitas (Differential Drive)	114
5.2.1. Kinerja Transmisi Sabuk (Belt Drive)	114
5.2.2. Analisis Pengaruh Tegangan, Arus, dan <i>Microstepping</i> terhadap Torsi Motor <i>Stepper</i> NEMA 23	115
5.2.2.1. Parameter Pencetakan <i>Thermoplastic Polyurethane</i> (TPU)	116
5.2.2.2. Pengaruh Arus Listrik (Ampere)	117
5.2.2.3. Pengaruh Resolusi Langkah (<i>Microstepping</i>)	117
5.2.2.4. Pengaruh Tegangan (Voltase) dan Kesimpulan Parameter Optimal	118
5.2.3. Evaluasi Roda TPU Airless Tire	118
5.3. Pengujian Kinerja Lengan Manipulator 4 DOF dan Cycloidal Drive	119
5.3.1. Kinerja Transmisi Cycloidal Cetak 3D	119
5.3.2. Validasi Kinematika Maju dan Safety Factor (SF)	120
5.4. Pengujian Mekanisme End-Effector (Soft Gripper)	120
5.4.1. Kepatuhan Mekanis (Mechanical Compliance)	121
5.4.2. Evaluasi Keamanan Objek	121
5.5. Pengujian Sistem Kendali Teleoperasi (Master-Slave)	122
5.5.1. Komunikasi Serial dan Respons Sistem	122
5.5.2. Manuveribilitas Open-Loop dengan Generator Pulsa Non-Blocking	122
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	123
6.1. Kesimpulan	123
6.2. Saran	123
DAFTAR PUSTAKA	125
LAMPIRAN	131

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Cross section komponen cycloidal gearbox	9
Gambar 2.2 <i>Dual Disc Cycloidal Drive</i>	11
Gambar 2.3 Mekanisme penjepit adaptif untuk penyortir buah	13
Gambar 3.1 <i>Cartesian robot with gantry design illustrating work envelope</i>	22
Gambar 3.2 <i>Cylindrical work envelopes</i>	23
Gambar 3.3 <i>Spherical work envelopes</i>	23
Gambar 3.4 <i>Top view of SCARA workspace for assembly tasks</i>	24
Gambar 3.5 <i>Schematic of a 6-axis articulated robot showing work envelope</i>	25
Gambar 3.6 <i>Adaptive gripper</i> ketika kontak dengan objek buah	42
Gambar 4.1 Diagram Alir Penelitian	48
Gambar 4.2 Bambu Lab X1 Carbon	50
Gambar 4.3 Raspberry Pi 4 Model B	53
Gambar 4.4 Arduino Mega 2560	53
Gambar 4.5 RAMPS 1.4 Shield	54
Gambar 4.6 Joystick Controller	54
Gambar 4.7 Motor Stepper NEMA 23 J-5718HB2401	55
Gambar 4.8 Motor Stepper NEMA 17 HS8401	55
Gambar 4.9 Motor Stepper NEMA 17 HS4401	56
Gambar 4.10 Motor Stepper NEMA 17 HS3401	56
Gambar 4.11 Motor DC JGB37-520 12RPM	56
Gambar 4.12 Driver Motor TB6600	57
Gambar 4.13 Driver Motor DRV8825	57
Gambar 4.14 Driver Motor L298N	57
Gambar 4.15 Modul Step-Down DC-DC XL4016	58
Gambar 4.16 Modul Step-Down DC-DC XL4015	58
Gambar 4.17 Baterai Lithium Ion	58

Gambar 4.18 Modul Voltmeter	59
Gambar 4.19 Filamen <i>Polylactic Acid</i> (PLA)	59
Gambar 4.20 Filamen <i>Thermoplastic Polyurethane</i> (TPU)	60
Gambar 4.21 <i>Caster Wheel</i> Pasif	60
Gambar 4.22 Sasis Utama Robot	62
Gambar 4.23 Konfigurasi Roda Penggerak Robot	64
Gambar 4.24 Roda Traksi Belakang Robot	65
Gambar 4.25 Envelope Tumpuan Roda	69
Gambar 4.26 Konfigurasi Lengan Manipulator	71
Gambar 4.27 Tampak Atas Jangkauan Lengan Robot	79
Gambar 4.28 Tampak Samping Jangkauan Lengan Robot	80
Gambar 4.29 Ring Gear	82
Gambar 4.30 Konfigurasi Stage Pertama Rasio 1:9	84
Gambar 4.31 Konfigurasi Stage Kedua Rasio 1:5	86
Gambar 4.32 <i>Planetary Gearbox Assembly</i>	86
Gambar 4.33 Instrumen Penjepit Mekanis. (a) Jari <i>Gripper</i> . (b) <i>Gripper Assembly</i>	94
Gambar 4.34 Skema Jalur Daya dan Jalur Kendali Robot	100
Gambar 5.1 Rancangan Penuh Purwarupa Robot	111
Gambar 5.2 Hasil Cetak FDM	112
Gambar 5.3 Perakitan Penuh Robot	113
Gambar 5.4 Pengujian Penggerak Robot	114
Gambar 5.5 Pengujian Radius Belok Robot	115
Gambar 5.6 Grafik Perbandingan Torsi Roda (Nm)	116
Gambar 5.7 Pengujian Kinematika Lengan Manipulator	120
Gambar 5.8 Ujicoba Kepatuhan Mekanis Gripper Terhadap Beberapa Objek	121

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 List Komponen Lengkap	61
Tabel 4.2 Pinout / Sambungan Sinyal Motor dan Servo	103