

**SISTEM PENGENDALIAN SUDUT MOTOR SERVO PADA
MOTOR PENDORONG ROBOT *HOVERCRAFT LINE FOLLOWER*
MENGGUNAKAN KONTROLER PID BERBASIS ARDUINO**

SKRIPSI

Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

M. RIZALDI FATHONI
NIM. 0910630075 - 63

KEMENTERIAN RISET DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
MALANG
2016

LEMBAR PENGESAHAN

SISTEM PENGENDALIAN SUDUT MOTOR SERVO PADA MOTOR
PENDORONG ROBOT *HOVERCRAFT LINE FOLLOWER*
MENGGUNAKAN KONTROLER PID BERBASIS ARDUINO

SKRIPSI

Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

M. RIZALDI FATHONI
NIM. 0910630075 - 63

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

M. Aziz Muslim, S.T.,M.T.,Ph.D.

NIP. 19741203 200012 1 001

Dosen Pembimbing II

Ir. Purwanto, M.T.

NIP. 19540424 198601 1 001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19741203 200012 1 001

JUDUL SKRIPSI

SISTEM PENGENDALIAN SUDUT MOTOR SERVO PADA MOTOR
PENDORONG ROBOT *HOVERCRAFT LINE FOLLOWER*
MENGGUNAKAN KONTROLER PID BERBASIS ARDUINO.

Nama Mahasiswa : M. RIZALDI FATHONI

NIM : 0910630075

Program Studi : TEKNIK ELEKTRO

Minat : TEKNIK KONTROL

KOMISI PEMBIMBING:

Ketua : M. AZIZ MUSLIM, S.T.,M.T.,Ph.D

Anggota : Ir. PURWANTO, M.T.

TIM DOSEN PENGUJI:

Dosen Penguji 1 : Dr. Ir. BAMBANG SISWOJO, M.T.

Dosen Penguji 2 : Dr. Ir. ERNI YUDANINGTYAS, M.T.

Dosen Penguji 3 : Ir. RETNOWATI, M.T.

Tanggal Ujian : 29 JUNI 2016

SK Penguji : No. 794/UN10.6/SK/2016

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas dalam naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu perguruan tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi ini dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2, dan pasal 70)

Malang, 20 Juni 2016

Mahasiswa,

Materai Rp. 6000,-

M. Rizaldi Fathoni

0910630075



PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada kehadirat Allah SWT karena berkat Rahmat dan Karunia-Nya yang tak berkesudahan, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Sistem Pengendalian Sudut Motor Servo pada Motor Pendorong Robot *Hovercraft Line Follower* Menggunakan Kontroler PID Berbasis Arduino”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan serta dorongan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih sebesar-besarnya kepada:

- Keluarga tercinta, kedua orang tua yaitu Abah Junaidi tercinta., Mama Noor Rahmani tercinta, serta Adik Shela, Adik Rekha, Dinda, dan Keluarga Besar yang senantiasa mendoakan dan memberi semangat selama penyusunan skripsi ini.
- Bapak M. Aziz Muslim, ST., MT, Ph.D sebagai Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya dan sekaligus selaku Dosen Pembimbing I atas segala bimbingan, pengarahan, saran, kritik dan masukan yang telah diberikan.
- Bapak Hadi Suyono, ST., MT, Ph.D sebagai Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
- Bapak Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, selaku Dosen Pembimbing Akademik penulis atas segala nasehat dan bimbingan yang telah diberikan,
- Bapak Ali Mustofa ST., MT., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Elektro.
- Bapak Ir. Purwanto, MT. sebagai Ketua Kelompok Dosen Keahlian Sistem Kontrol Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya dan sekaligus selaku Dosen Pembimbing II atas segala bimbingan, pengarahan, gagasan, ide, saran serta motivasi yang telah diberikan.
- Staf Rekording, staf Pengajaran, dan staf Ruang Baca Jurusan Teknik Elektro yang telah membantu segala urusan penulis selama ini.
- Sahabat terbaik Ryan Ardhika, Yoshiko, Anin, Adeck Aprilyan, Fitra Ardhita, Gandu Eka, M. Rigadho, Raditya Wiradhana, Shaufi Firdaus, M. Zidnil, dan Akhbar P.R., yang selalu ada untuk memberikan cerita, canda tawa, bantuan, saran, motivasi dan semangat setiap saat dalam suka maupun duka.

- Rekan-rekan yang membantu dalam mengerjakan skripsi, Anas Setiawan, Wisnu, Akka, Seleb, Praja, Ade Bete, Ridho, Arga, Akhyar, Sogik, Dika, Dimas Irham, Amri, dan banyak lainnya atas segala bantuan dan waktu yang sudah diberikan dalam penggerjaan skripsi.
- Teman-teman asisten Laboratorium Sistem Kontrol, Darmo, Salmi, Adit, Sam Budi, Gladi, Ika, Hamu, Ayu, Sendok, Khairul, Dito, Azri, Tesu, Emon, dll dan teman asisten Lab lainnya dari segala angkatan serta Laboran Laboratorium Sistem Kontrol, Mbak Eka Desiana atas dukungan dan bantuannya selama ini.
- Teman-teman *Maraville* Alil, Bima, Samuel, Bagus, Asep, Yhony, Eng, Pambudi.
- Semua anggota Ampere 2009, teman-teman Elektro dari berbagai angkatan dan teman-teman Fakultas Teknik lainnya atas seluruh bantuan dan dukungannya.

Seluruh teman - teman serta semua pihak yang tidak mungkin untuk dicantumkan namanya satu-persatu, terima kasih banyak atas segala bentuk bantuan dan dukungannya.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa skripsi ini belumlah sempurna, karena keterbatasan ilmu dan kendala-kendala lain yang terjadi selama penggerjaan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharap kritik dan saran untuk penyempurnaan tulisan di masa yang akan datang. Penulis berharap, semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Juni 2016

Penulis

DAFTAR ISI

PENGANTARv
DAFTAR ISIvii
DAFTAR GAMBAR.....	.x
DAFTAR TABELxiii
RINGKASAN.....	.xiv
SUMMARYxv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan	3
1.5 Sistematika Pembahasan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Hovercraft</i>	5
2.2 <i>Robot Line Follower</i>	6
2.3 <i>Robot Wall Follower</i>	6
2.4 Sensor Cahaya.....	6
2.5 Sensor Ultrasonik Ping)))	9
2.6 Motor DC	10
2.6.1 Motor DC Brushless	10
2.6.2 Motor Servo	13
2.7 Kontroler	15
2.7.1 Kontroler Proporsional.....	16
2.7.2 Kontroler Integral.....	17
2.7.3 Kontroler Diferensial	17
2.7.4 Kontroler Proporsional Integral Diferensial (PID)	18
2.7.5 Hand Tuning Kontroler PID	18
2.8 PWM (<i>Pulse Width Modulation</i>).....	19
2.9 Arduino Mega	20
BAB III METODE PENELITIAN DAN PERANCANGAN	22

3.1 Metodologi Penelitian	22
3.1.1 Spesifikasi Alat	22
3.1.2 Perancangan dan Realisasi Pembuatan Alat	23
3.1.2.1 Perancangan Perangkat Keras dan Realisasi Pembuatan Alat	23
3.1.2.2 Perancangan dan Perhitungan Komponen yang akan Digunakan	23
3.1.2.3 Perancangan Perangkat Lunak	23
3.1.3 Pengujian Alat.....	23
3.1.4 Pengambilan Kesimpulan dan Saran	24
3.2 Perancangan dan Pembuatan Alat.....	25
3.2.1 Spesifikasi Sistem.....	25
3.2.2 Diagram Blok Sistem.....	26
3.2.3 Perancangan Perangkat Keras.....	27
3.2.3.1 Perancangan Rangka Robot Hovercraft Line Follower	27
3.2.3.2 Rangkaian Shield Arduino Mega 2560.....	28
3.2.3.3 Electronic Speed Controller (ESC)	29
3.2.3.4 Pemilihan Motor DC Brushless dan Propeller.....	30
3.2.3.5 Pemilihan Sistem Kendali Arah	33
3.2.4 Perancangan Nilai <i>Setpoint</i>	33
3.2.5 Penentuan Nilai Penguatan Kontroler.....	34
3.2.6 Perancangan Perangkat Lunak	35
BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS SISTEM	37
4.1 Pengujian Catu Tegangan Baterai	37
4.1.1 Peralatan Pengujian.....	37
4.1.2 Prosedur Pengujian	37
4.1.3 Hasil Pengujian	37
4.2 Pengujian Tegangan ESC.....	38
4.2.1 Peralatan Pengujian.....	38
4.2.2 Prosedur Pengujian	39
4.2.3 Hasil Pengujian	39
4.3 Pengujian Tegangan Keluaran Sensor Photo Reflective	42
4.3.1 Peralatan Pengujian.....	42
4.3.2 Prosedur Pengujian	43
4.3.3 Hasil Pengujian	43

4.4 Pengujian Sensor Jarak HY-SRF05.....	45
4.4.1 Peralatan Pengujian	45
4.4.2 Prosedur Pengujian.....	45
4.4.3 Hasil Pengujian	46
4.5 Pengujian Sinyal PWM Motor Servo	48
4.5.1 Peralatan Pengujian	48
4.5.2 Prosedur Pengujian.....	48
4.5.3 Hasil Pengujian	49
4.6 Pengujian Hand Tuning	50
4.6.1 Peralatan Pengujian	50
4.6.2 Prosedur Pengujian.....	51
4.6.3 Pembahasan Pengujian PID	51
4.6.4 Hasil Pengujian	52
4.6.4.1 Pengujian $K_p=0,5$, $K_i=0$, $K_d=0$	52
4.6.4.2 Pengujian $K_p=1$, $K_i=0$, $K_d=0$	53
4.6.4.3 Pengujian $K_p=1,5$, $K_i=0$, $K_d=0$	55
4.6.4.4 Pengujian $K_p=0,9$, $K_i=0,414$, $K_d=0,1035$	56
4.6.4.5 Pengujian $K_p=0,6$, $K_i=0,414$, $K_d=0,1235$	58
4.6.4.6 Pengujian $K_p=0,65$, $K_i=0,414$, $K_d=0,1335$	59
4.6.4.7 Pengujian $K_p=0,6$, $K_i=0,414$, $K_d=0,1235$	61
4.6.4.8 Pengujian $K_p=0,6$, $K_i=0,4$, $K_d=0,1235$	62
4.6.4 Pembahasan Pengujian PID	63
4.7 Pengujian Sistem Keseluruhan	64
4.7.1 Peralatan Pengujian	64
4.7.2 Prosedur Pengujian.....	64
4.7.3 Hasil Pengujian	64
BAB V PENUTUP	66
5.1 Kesimpulan.....	66
5.2 Saran	66
DAFTAR PUSTAKA	67
LAMPIRAN	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Prinsip Kerja <i>Hovercraft</i>	6
Gambar 2.2. Rangkaian Sensor Detektor Garis.....	7
Gambar 2.3. Rangkaian Sensor Cahaya dengan Fototransistor	7
Gambar 2.4. Sensor Ultrasonik PING)))	9
Gambar 2.5. Ilustrasi Cara Kerja Modul PING)))	9
Gambar 2.6. Komunikasi Mikrokontroler dengan PING)))	10
Gambar 2.7. Skematik Motor DC <i>Brushless</i>	11
Gambar 2.8. Komponen Motor DC <i>Brushless</i>	11
Gambar 2.9. Rangkaian Ekivalen DC Motor	12
Gambar 2.10. Motor Servo	13
Gambar 2.11. Jalur Kabel Motor Servo.....	13
Gambar 2.12. Konfigurasi Pin Pengabelan Motor Servo	14
Gambar 2.13. Pengaturan Sudut Motor Servo.....	15
Gambar 2.14. Diagram Blok Kontroler Proporsional	16
Gambar 2.15. Diagram Blok Kontroler Integral	17
Gambar 2.16. Diagram Blok Kontroler Diferensial	18
Gambar 2.17. Diagram Blok Kontroler PID	18
Gambar 2.18. Sinyal PWM Secara Umum.....	19
Gambar 2.19. Arduino Mega 2560	20
Gambar 3.1. Diagram Blok Sistem Secara Umum	26
Gambar 3.2. Diagram Blok Sistem Robot <i>Hovercraft Line Follower</i>	26
Gambar 3.3. Rangka Robot <i>Hovercraft Line Follower</i>	28
Gambar 3.4. Rangkaian <i>Shield</i> Arduino Mega 2560.....	28
Gambar 3.5. <i>Electronic Speed Controller</i> 30A	30
Gambar 3.6. <i>Propeller</i> EMP 6x5E	32

Gambar 3.7. Motor DC <i>Brushless</i> 1400kV	33
Gambar 3.8. Motor Servo Toward Pro MG996R	33
Gambar 3.9. Penentuan Nilai Setpoint Posisi.....	34
Gambar 3.10. <i>Flowchart</i> Perangkat Lunak	36
Gambar 4.1. Pengujian Catu Tegangan Baterai <i>Li-po</i> 11.1 V 2200 mA.....	38
Gambar 4.2.Pengujian Tegangan ESC FLYFUN 30A.....	39
Gambar 4.3. Grafik Tegangan ESC FLYFUN 30A	40
Gambar 4.4. Pengujian Tegangan ESC HELICOX PENTIUM 60A	41
Gambar 4.5. Grafik Tegangan ESC HELICOX PENTIUM 60A.....	42
Gambar 4.6.Pengujian Sensor <i>Photo Reflective</i> Pada Garis Warna Hitam	44
Gambar 4.7. Pengujian Sensor <i>Photo Reflective</i> Pada Garis Warna Putih.....	44
Gambar 4.8. Grafik Rata-Rata Nilai Tegangan Pada Logika Tiap Sensor	45
Gambar 4.9. Pengujian Sensor Jarak HY-SRF05 Pada Jarak 18cm.....	47
Gambar 4.10. Serial Monitor Pengukuran Sensor Jarak HY-SRF05 Pada Jarak 18cm	47
Gambar 4.11. Grafik Hasil Pengujian Sensor Jarak HY-SRF05	48
Gambar 4.12. Pengujian Sudut Motor Servo Pada Sudut 90^0	49
Gambar 4.13. Serial Monitor Arduino Mega pada Sudut 90^0	50
Gambar 4.14. Grafik Pengujian Motor DC Servo Terhadap Busur	50
Gambar 4.15. Respon Posisi Robot Hovercraft Pada Pengujian $K_p=1,5$, $K_i=0$, $K_d=0$	51
Gambar 4.16. Respon Posisi Robot <i>Hovercraft</i> Terhadap Waktu.....	53
Gambar 4.17. Respon Posisi Sudut Servo Robot <i>Hovercraft</i> Terhadap Waktu	53
Gambar 4.18. Respon Posisi Robot <i>Hovercraft</i> Terhadap Waktu.....	54
Gambar 4.19. Respon Posisi Sudut Servo Robot <i>Hovercraft</i> Terhadap Waktu	55
Gambar 4.20. Respon Posisi Robot <i>Hovercraft</i> Terhadap Waktu.....	56
Gambar 4.21. Respon Posisi Sudut Servo Robot <i>Hovercraft</i> Terhadap Waktu	56
Gambar 4.22. Respon Posisi Robot <i>Hovercraft</i> Terhadap Waktu.....	57

Gambar 4.23. Respon Posisi Sudut Servo Robot <i>Hovercraft</i> Terhadap Waktu	58
Gambar 4.24. Respon Posisi Robot <i>Hovercraft</i> Terhadap Waktu.....	59
Gambar 4.25. Respon Posisi Sudut Servo Robot <i>Hovercraft</i> Terhadap Waktu	59
Gambar 4.26. Respon Posisi Robot <i>Hovercraft</i> Terhadap Waktu.....	60
Gambar 4.27. Respon Posisi Sudut Servo Robot Hovercraft Terhadap Waktu	61
Gambar 4.28. Respon Posisi Robot <i>Hovercraft</i> Terhadap Waktu.....	62
Gambar 4.29. Respon Posisi Sudut Servo Robot Hovercraft Terhadap Waktu	62
Gambar 4.30. Respon Posisi Robot <i>Hovercraft</i> Terhadap Waktu.....	63
Gambar 4.31. Respon Posisi Sudut Servo Robot Hovercraft Terhadap Waktu	64
Gambar 4.32. Grafik Respon Posisi Robot <i>Hovercraft</i>	65
Gambar 4.33. Grafik Respon Sudut Servo Robot <i>Hovercraft</i>	65



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kondisi Masukan Terhadap Logika Keluaran.....	8
Tabel 3.1 Fungsi Pin Arduino Mega	29
Tabel 3.2 Perhitungan Thrust	31
Tabel 3.3 Aturan Dasar Ziegler-Nichols Berdasarkan <i>Critical Gain</i> Kcr dan <i>Critical Period</i> Pcr	34
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Tegangan Regulator dan ESC FLYFUN 30A	39
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Tegangan Regulator dan ESC HELICOX PENTIUM 60A.....	41
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Sensor <i>Photo Reflective</i>	43
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Sensor Jarak HY-SRF05	46
Tabel 4.5 Hasil Pengujian Sudut Motor DC Servo	49
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Parameter $K_p=0,5$, $K_i=0$, $K_d=0$	52
Tabel 4.7 Hasil Pengujian Parameter $K_p=1$, $K_i=0$, $K_d=0$	54
Tabel 4.8 Hasil Pengujian Parameter $K_p=1,5$, $K_i=0$, $K_d=0$	55
Tabel 4.9 Hasil Pengujian Parameter $K_p=0,9$, $K_i=0,414$, $K_d=0,1035$	57
Tabel 4.10 Hasil Pengujian Parameter $K_p=0,6$, $K_i=0,414$, $K_d=0,1235$	58
Tabel 4.11 Hasil Pengujian Parameter $K_p=0,65$, $K_i=0,414$, $K_d=0,1335$	60
Tabel 4.12 Hasil Pengujian Parameter $K_p=0,6$, $K_i=0,414$, $K_d=0,1235$	61
Tabel 4.13 Hasil Pengujian Parameter $K_p=0,6$, $K_i=0,4$, $K_d=0,1235$	63

RINGKASAN

M. Rizaldi Fathoni, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juni 2016, Sistem Pengendalian Sudut Motor Servo pada Motor Pendorong Robot *Hovercraft Line Follower* Menggunakan Kontroler PID Berbasis Arduino, Dosen Pembimbing: Aziz Muslim dan Purwanto.

Ringkasan – Konstruksi *hovercraft* sangat dibutuhkan dalam menangani bencana yang memiliki jalur berlumpur dan berawa. Namun di Indonesia pengembangan kendaraan yang memiliki kelebihan jelajah ini masih sangat minim. Dalam skripsi ini *hovercraft* diaplikasikan dalam bentuk robot otomatis *line follower* yang dapat menghindari rintangan. *Hovercraft line follower* adalah robot yang mampu bergerak mandiri dengan mengikuti garis sebagai *setpoint*.

Pengendalian dirancang agar robot dapat mengendalikan sudut motor servo pada motor pendorong ketika mengikuti garis dan menghindari rintangan. Metode yang digunakan untuk pengendalian sudut motor servo adalah kontrol PID. Proses perancangan parameter PID menggunakan metode *hand tuning*. Didapatkan nilai parameter PID yaitu $K_p = 0.6$, $K_i = 0.4$, dan $K_d = 0.1235$. Pengendalian kecepatan motor digunakan agar posisi robot tetap pada posisi yang diinginkan saat melaju.

Kata Kunci— *Hovercraft line follower*, Pengendalian Sudut Motor Servo, PID, Posisi robot.



SUMMARY

M. Rizaldi Fathoni, , Departement of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Brawijaya, June 2016, Servo Motor Control System on the Propeller Motor of the Hovercraft Line Follower Robot using PID Controller Based Arduino,
Academic Supervisor : Aziz Muslim and Purwanto

Summary – Construction of hovercraft is needed in dealing with disaster that had muddy and swampy area. However, in Indonesia the development of such a vehicle is still very low. In this research, hovercraft is applied in automatic line follower robot that can avoid obstacles. Hovercraft line follower is a robot who can moves automatically with line as setpoint.

Control system is designed so that robot can control the angle of servo motor at the propeller motor when following a line and avoid obstacles. The method used to control angle of servo motor is PID controller . To determine the PID paramaters use *manual tuning* or known as *hand tuning* method. The PID parameters value are $K_p = 0.6$, $K_i = 0.4$, dan $K_d = 0.1235$. Speed control motors are used to keep robot remains on the track.

Keywords — Hovercraft line follower, Servo Motor Control System, PID, Position of the robot



1.1 Latar Belakang

Dewasa ini hampir tidak ada yang tidak mengenal robot, namun pengertian robot tidak dipahami secara sama oleh setiap orang. Istilah robot berasal dari bahasa Cheko “robo” yang berarti pekerja atau kuli yang tidak mengenal lelah atau bosan. Robot merupakan sebuah alat mekanik yang dapat memperoleh informasi dari lingkungan (melalui sensor), dapat diprogram, dapat melaksanakan beberapa tugas yang berbeda, bekerja secara otomatis, dan cerdas (kecerdasan buatan). Robot biasa digunakan untuk tugas yang berat, berbahaya, pekerjaan berulang, pembersih limbah beracun, penjelajah bawah air dan luar angkasa, pertambangan, pekerjaan “cari dan tolong” (*search and rescue*), untuk pencarian tambang, di bidang hiburan, sampai alat bantu rumah tangga.

Robot memiliki berbagai macam konstruksi, antara lain: robot mobil (*mobile robot*) yang dapat berpindah posisi dari satu titik ke titik yang lain, robot manipulator (tangan) yang dapat bekerja menyerupai lengan manusia, robot *humanoid* yang menyerupai manusia secara utuh, *flying robot* yang dapat terbang, robot berkaki, robot jaringan yang dikendalikan melalui internet dengan protocol TCP/IP, robot animalia, dan robot *cyborg*.

Dari macam konstruksi yang ada, *mobile robot* sangat disukai bagi orang yang mulai mempelajari robot. Karena tidak memerlukan kerja fisik yang berat dan minimal hanya diperlukan pengetahuan tentang mikrokontroler dan sensor-sensor elektronik. *Mobile robot* dapat dibuat sebagai pengikut garis (*Line Follower*) atau pengikut dinding (*Wall Follower*) ataupun pengikut cahaya. Namun, *mobile robot* dengan ciri khas aktuator berupa roda untuk menggerakkan keseluruhan badan robot masih memiliki kekurangan dalam medan-medan sulit jika difungsikan dalam tugas ”cari dan tolong” (*search and rescue*) untuk medan berair atau berlumpur, yang dalam hal ini dapat dilakukan dengan baik oleh jenis kendaraan berbentuk *hovercraft*.

Hovercraft merupakan jenis kendaraan yang memiliki dua motor dengan fungsi sebagai gaya angkat dan gaya dorong sehingga dapat bergerak hampir di semua medan, dapat bergerak di atas semua permukaan (berair, berlumpur, maupun bidang datar) dan gesekan yang ditimbulkan lebih kecil daripada kendaraan darat maupun kapal sehingga tenaga yang dibutuhkan untuk menggerakkan *hovercraft* lebih kecil karena gaya

BAB I PENDAHULUAN

angkatnya tidak membutuhkan landasan luncur dan dapat tetap dalam keadaan melayang pada angkatan penuh dengan gaya dorong yang rendah.

Dalam kaitannya tugas *mobile robot* "cari dan tolong" (*search and rescue*) akan dikembangkan sebuah robot dengan mengganti bentuk konstruksi *mobile robot* beroda ke bentuk konstruksi *hovercraft*. Dengan dua motor yang berfungsi sebagai gaya angkat dan gaya dorong serta satu motor servo sebagai kendali arah motor pendorong *hovercraft* yang memiliki fungsi sebagai robot pengikuti garis (*Line Follower*) dan menghindari rintangan.

Laporan ini membahas tentang pengendalian sudut motor servo sebagai kendali arah motor pendorong pada miniatur *hovercraft* saat mengikuti garis lurus, garis melengkung, dan menghindari rintangan. Sistem kontrol yang digunakan pada laporan ini adalah Proporsional Integral Differential (PID) berbasis arduino. PID adalah kontroler yang merupakan gabungan dari kontroler proposional, kontroler integral dan kontroler differensial. Gabungan dari ketiga kontroler ini diharapkan agar mendapat keluaran sistem yang stabil karena bisa saling menutupi kekurangan. Keuntungan dari kontroler PID adalah merupakan sebuah sistem yang sederhana sehingga lebih cepat dalam mengambil sebuah keputusan. Diharapkan dengan menggunakan kontroler PID sudut yang diinginkan sesuai dengan sudut yang terjadi. Sehingga hasilnya dapat dijadikan referensi atau kontribusi ilmiah untuk membangun *hovercraft-hovercraft* yang lebih cerdas dan dapat diwujudkan sebagai kendaraan "cari dan tolong" (*search and rescue*) tanpa awak pengemudi yang canggih.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana merancang dan membuat sistem pengendalian sudut motor servo pada motor pendorong pada robot *hovercraft line follower* menggunakan kontroler PID berbasis arduino?
2. Bagaimana merancang *hardware* dan *software* sistem pengendalian sudut motor servo pada motor pendorong robot *hovercraft line follower* dengan menggunakan kontroler PID berbasis arduino?

1.3 Batasan Masalah

Untuk menekankan pada objek pembahasan yang ada, maka pada penelitian ini diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Robot *hovercraft line follower* yang digunakan adalah miniatur yang dibuat dengan desain sendiri.
2. Digunakan 3 motor DC, dengan 2 motor jenis motor dc *brushless* dan 1 jenis motor servo.
3. Pembahasan ditekankan pada penggunaan kontroler PID pada robot *hovercraft line follower*.
4. Pengaturan yang dilakukan adalah pengaturan sudut motor servo pada motor kipas pendorong saat mengikuti garis hitam dan menghindari rintangan.
5. Sensor yang digunakan adalah sensor cahaya dengan *photo reflective* dan *PING)) ultrasonic distance sensor*.

1.4 Tujuan

1. Untuk merancang sistem pengendalian sudut motor servo pada motor pendorong robot *hovercraft line follower* dengan menggunakan kontroler PID.
2. Robot *hovercraft line follower* dapat mengikuti garis dan menghindari rintangan dengan hasil yang maksimal.

1.5 Sistematika Penulisan

Agar penyusunan laporan skripsi ini dapat mencapai sasaran dan tidak menyimpang dari judul yang telah ditentukan, maka diperlukan sistematika pembahasan yang jelas. Pembahasan dalam skripsi ini secara garis besar adalah sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Menjelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat dan sistematika penulisan.

BAB II Tinjauan Pustaka

Menjelaskan teori dasar yang berisi penjelasan tentang teori *hovercraft*, robot *line follower*, sensor cahaya, motor DC *brushless*, motor DC servo, kontroler, kontroler PID, dan rangkaian mikrokontroler.

BAB III Metodologi Penelitian dan Perancangan

Menjelaskan tentang metodologi penelitian yang terdiri atas studi literatur, perancangan alat, pembuatan alat, pengujian alat, serta pengambilan kesimpulan dan saran. Serta menjelaskan tentang perancangan dan pembuatan alat yang meliputi prinsip kerja alat, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak.

BAB IV Pengujian dan Analisis

Menjelaskan tentang pengujian alat dan analisa yang meliputi pengujian bagian blok sistem secara keseluruhan.

BAB V Penutup

Menjelaskan tentang pengambilan kesimpulan sesuai dengan hasil perealisasian dan pengujian alat sesuai dengan tujuan dan rumusan masalah, serta pemberian saran untuk pengembangan.



BAB II

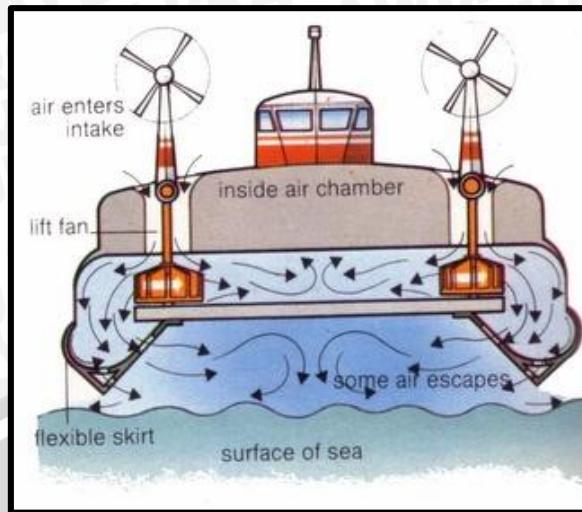
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hovercraft

Kapal bantalan udara atau *hovercraft* adalah suatu kendaraan yang berjalan di atas bantalan udara (*air cushion*). Bantalan udara tersebut ditimbulkan dengan cara meniupkan udara ke ruang bawah kapal (*plenum chamber*) melalui *skirt* (sekat lentur) sehingga tekanan udara di dalam *plenum chamber* lebih tinggi daripada tekanan udara luar sehingga timbul gaya angkat. Untuk menggerakkan *hovercraft*, digunakan gaya dorong yang diperoleh dari baling-baling seperti pada pesawat udara. Gambar 2.1 menunjukkan prinsip kerja *hovercraft*. Gaya angkat *hovercraft* bekerja pada penampang yang luas, sehingga tekanan terhadap tanah atau air (*ground pressure*) yang ditimbulkan kecil. Dengan demikian, *hovercraft* dapat berjalan di atas lumpur, air maupun daratan dengan membawa beban yang cukup berat. Karena tidak adanya kontak langsung antara *hovercraft* dan permukaan daratan atau air, maka hambatan yang terjadi kecil sehingga *hovercraft* dapat melaju dengan kecepatan tinggi.

Komponen utama penyusun *hovercraft* antara lain:

- Lambung (*hull*) yaitu badan kapal yang dapat dibuat dari aluminium ataupun serat kaca yang dibuat kedap air. Rongga di dalam lambung ini diisi dengan busa poliuretana yang membuat *hovercraft* tetap mengapung jika terjadi kebocoran pada lambung.
- *Skirt* yaitu bagian *hovercraft* yang berfungsi untuk menahan udara di bawah *hovercraft* agar tidak mudah keluar. *Skirt* terbuat dari tekstil yang dilapisi karet untuk menjaga agar udara tetap berada di dalam ruang di bawah lambung kapal.
- sumber tenaga *hovercraft* biasanya disediakan oleh mesin diesel atau bensin. Mesin digunakan untuk memutar baling-baling yang akan menghasilkan gaya dorong.



Gambar 2.1 Prinsip Kerja Hovercraft

Sumber: <http://www.ayobukasaja.com/2012/06-hovercraft-dan-cara-kerjanya.html>

2.2 Robot *Line Follower*

Robot *line follower* adalah robot yang bergerak secara otomatis mengikuti lika-liku garis di permukaan lantai. Untuk mengenali pola garis, digunakan sensor cahaya yang akan mendeteksi terang gelap permukaan yang ada di bawahnya. Untuk itu, harus diperoleh perbedaan warna yang mencolok antara warna garis dan warna permukaan lantai.

2.3 Robot *Wall Follower*

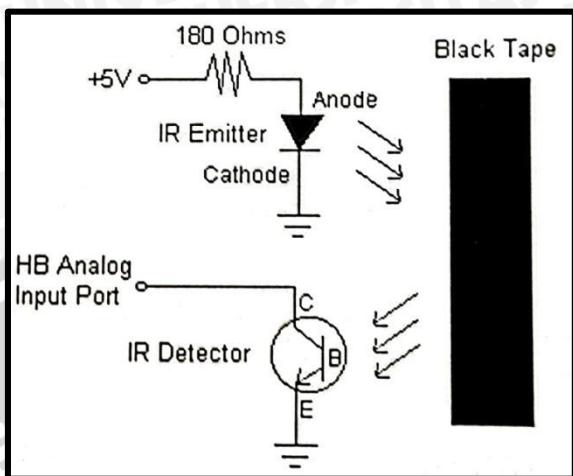
Wall Follower adalah suatu algoritma untuk menyediakan orientasi navigasi kepada robot dengan menyusuri dinding. Salah satu keuntungannya adalah tidak perlu adanya garis penuntun ataupun suatu tanda khusus sebagai arahan bagi robot. Cara kerjanya adalah dengan mengatur jarak dinding dengan robot tetap konstan. Bila terjadi perubahan, maka robot akan bergerak untuk kemudian menyesuaikan jarak lagi. Proses ini akan dilakukan secara berulang-ulang

2.4 Sensor Cahaya

Sensor yang digunakan termasuk dalam jenis sensor fototransistor infra merah. Sensor ini terdiri atas LED infra merah dan fototransistor sebagai penerima cahaya pantul dari infra merah dengan panjang gelombang cahaya yang dipancarkan 950 nm (VISHAY, 2011: 1). Sensor fototransistor infra merah dapat digunakan untuk menghasilkan sinyal listrik. Besar sinyal listrik yang dihasilkan tergantung dari jumlah cahaya yang mengenainya dalam rentang 750 nm – 1500 nm untuk jarak dekat. Semakin kuat cahaya,

semakin besar arus balik. Secara umum, besarnya arus balik fototransistor infra merah adalah satuan miliampere (Taufiq, 2010: 221).

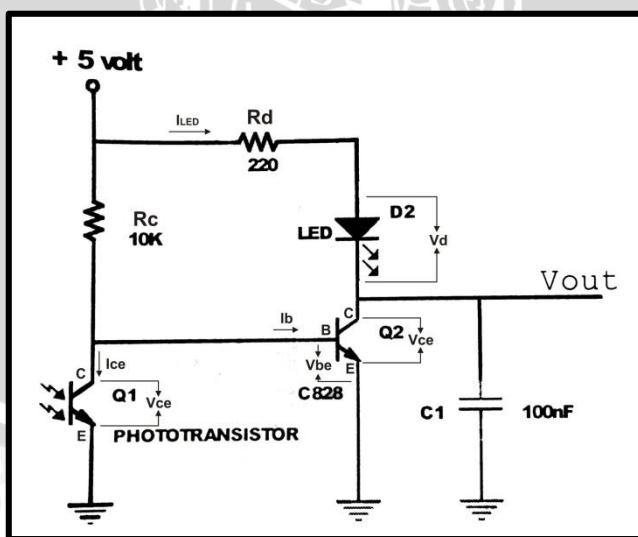
Rangkaian sensor detektor garis terlihat dalam Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Rangkaian Sensor Detektor Garis (Taufiq, 2010: 218)

Rangkaian *Infra Red (IR) Emitter* akan memancarkan cahaya infra merah pada permukaan. Banyak sedikitnya cahaya pantulan yang akan diterima *Infra Red (IR) Detector* bergantung pada gelap terang permukaan. Semakin gelap permukaan maka pantulan cahaya yang diterima semakin sedikit dan sebaliknya, semakin terang permukaan maka pantulan cahaya yang diterima semakin banyak.

Untuk rangkaian sensor cahaya dengan fototransistor diperlihatkan dalam Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Rangkaian Sensor Cahaya dengan Fototransistor (Taufiq, 2010: 219)

Dalam Gambar 2.3, arus yang mengalir dalam terminal *collector* menuju *emitter* (I_{ce}) saat fototransistor Q1 mengalami saturasi (ada berkas infra merah yang diterima) dibatasi oleh resistor $10\text{k }\Omega$ sehingga

dengan : I_{ce} = arus yang mengalir dari *collector* ke *emitter* (mA)
 V_{cc} = tegangan catuan 5 V (V)
 V_{ce} = tegangan dari *collector* ke *emitter* (V)
 R_c = resistansi *collector* Q1 (Ω)

Jadi,

$$I_{ce} = \frac{(V_{cc}-V_{ce})}{R_c} = \frac{(5-0)\text{volt}}{10\text{ k}} = 0,5\text{ mA}$$

Saat Q1 tersaturasi, Ib dalam Q2 akan mendekati 0 (dengan menganggap $V_{ceQ1} \approx V_{beQ2}$) yang mengakibatkan Q2 dalam kondisi putus sehingga keluaran dalam terminal kolektor (V_{ceQ2}) akan sebanding dengan $V_{cc} = 5$ volt, dalam ambang logika digital $V_{out} \approx 5$ volt \approx HIGH.

Fototransistor Q1 berada dalam kondisi putus ($I_{ce} \approx 0$) saat tidak ada berkas inframerah yang diterima sehingga $V_{ceQ1} \approx V_{beQ2} \approx 0,6$ volt dan terjadi lonjakan I_b dalam Q2 dari 0 hingga sebesar

$$Ib = \frac{(Vcc - Vbe)}{Rc} = \frac{(5 - 0,6)\text{volt}}{10\text{ k}} = 0,44\text{ mA}$$

dengan : $I_b = \text{arus yang mengalir pada kaki base Q2 (mA)}$

Kondisi tersebut akan mengakibatkan Q2 tersaturasi dan keluaran $V_{ceQ2} \approx 0$, dalam ambang logika digital $V_{out} \approx 0 \approx \text{LOW}$, dan akan diikuti oleh beda potensial pada *electrode* LED dengan tegangan maju jatuh V_D (*forward bias*) sebesar 1,6 volt hingga 2,2 volt (untuk warna merah) sehingga besarnya arus yang dialirkan oleh *diode* sampai mengeluarkan cahaya dengan spectrum merah (diasumsikan $V_D = 2$ volt) adalah

$$I_{LED} = \frac{(Vcc - Vd)}{Rd} = \frac{(5-2)\text{volt}}{220} = 13,6 \text{ mA}$$

Arus yang dibutuhkan LED untuk menyala maksimum sebesar 10 mA sampai dengan 20 mA sehingga nilai arus (I_{LED}) yang dibatasi oleh R_d telah optimal untuk memberikan penceran cahaya indikasi. Tabel 2.1 memberikan kesimpulan karakteristik sistem masukannya (*sensing*) (Taufiq, 2010: 219, 220).

Kondisi masukan terhadap logika keluaran ditunjukkan dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Kondisi Masukan Terhadap Logika Keluaran (Taufiq, 2010: 220)

Berkas Sensor	IR Diterima	Sistem Keluaran
ADA		HIGH (LED off)
KOSONG		LOW (LED on)

2.5 Sensor Ultrasonik PING)))

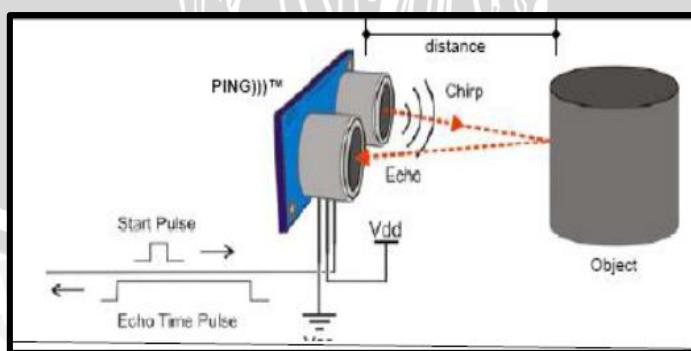
Sensor ultrasonik digunakan untuk mendeteksi jarak dengan frekuensi 40 kHz. Sinyal data sensor PING))) ini akan masuk ke kaki mikrokontroler. Bentuk fisik sensor ultrasonik PING))) ditunjukkan dalam Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Sensor Ultrasonik PING)))

Sumber: Parallax, 2008

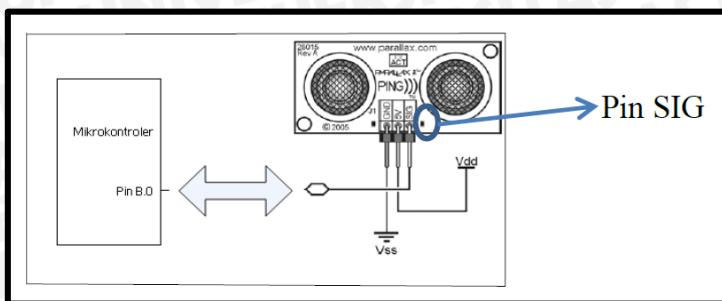
Modul PING))) mengukur jarak objek dengan cara memancarkan gelombang ultrasonik (40kHz) selama tBURST (200 us) kemudian menunggu pantulannya. Modul PING))) memancarkan gelombang ultrasonik sesuai dengan masukan kontrol pin SIG. Gelombang ultrasonik ini melalui udara dengan kecepatan kurang lebih 344 meter per detik, mengenai objek dan memantul kembali ke modul PING))). Modul PING))) akan mengeluarkan pulsa *high* pada pin SIG setelah memancarkan gelombang ultrasonik. Setelah pantulan gelombang terdeteksi, modul PING))) akan membuat pin SIG *low*. Lebar pulsa *high* (tIN) ini sesuai dengan lama waktu tempuh gelombang ultrasonik untuk 2 kali jarak objek, sehingga jarak objek yang terukur adalah [(tIN s X 344m/s) / 2] meter. Ilustrasi cara kerja modul PING))) ditunjukkan dalam Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Ilustrasi Cara Kerja Modul PING)))

Sumber: Parallax, 2008

Sensor PING))) ini memiliki 3 buah kaki atau pin yakni pin VCC, pin GND dan pin SIG. Pin yang digunakan untuk mengirim data adalah pin SIG Komunikasi mikrokontroler dengan PING ditunjukkan dalam Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Komunikasi Mikrokontroler dengan PING)))

Sumber: Parallax, 2008

Sensor PING))) ini memiliki beberapa kelebihan diantaranya bahwa sensor ini memiliki tingkat akurasi yang tinggi, sensor ini mampu mendeteksi benda didepannya walaupun sudutnya tidak tegak lurus dan sensor ini mampu mendeteksi benda walaupun benda tersebut berukuran kecil.

2.6 Motor DC

Motor akan memiliki tiga fungsi, yaitu untuk penghasil udara yang dihembuskan ke dalam bantalan udara yang akan mengangkat keseluruhan badan *hovercraft*, untuk penghasil udara yang dihembuskan sebagai pendorong keseluruhan badan *hovercraft*, dan sebagai pengarah hembusan angin sebagai pendorong *hovercraft*. Motor yang digunakan terdapat dua jenis yaitu motor servo dan motor dc *brushless*. Motor ini mengkonsumsi daya langsung dari tegangan yang berasal dari arduino.

2.6.1 Motor DC *Brushless*

Motor DC *brushless* atau juga dikenal sebagai motor komutasi elektrik adalah motor elektrik yang dicatut dengan arus/tegangan DC (*direct-current*) melalui inverter terintegrasi/ *switching power supply*. Inverter terintegrasi menghasilkan sinyal listrik AC ke *driver* motor (arus bi-directional dengan tidak ada pembatasan pada gelombang) dan mempunyai sistem komutasi elektrik, dibandingkan dengan komutator mekanik dengan sikat. Hubungan antara arus dan torsi serta frekuensi dan kecepatan adalah linier (Brown, 2002; 6).

dengan: I_{line} = Arus tiap jalur (A)
 M = torsi (N.m)

$$K_T = \text{konstanta torsi BLDC (0.00083)} \\ RPM = K_v \times V \quad \dots \dots \dots \quad (2.3)$$

dengan: RPM = kecepatan putaran per menit
 Kv = konstanta BLDC (1400)
 V = tegangan masukan

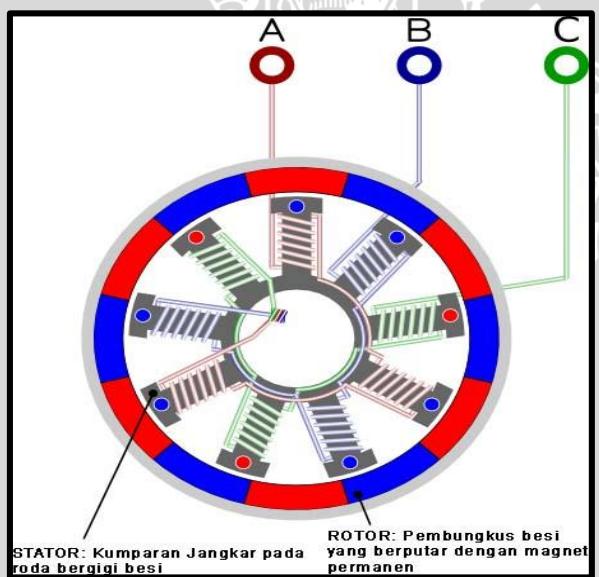
Jika RPM dikonversi dalam satuan kecepatan anguler (ω) maka didapatkan:

$$\omega = \left(\frac{RPM}{60} \right) \times 2\pi \quad \dots \dots \dots \quad (2.4)$$

dengan: ω = kecepatan anguler (rad/s)
 $\pi = 3.14$
 RPM = kecepatan putaran per menit

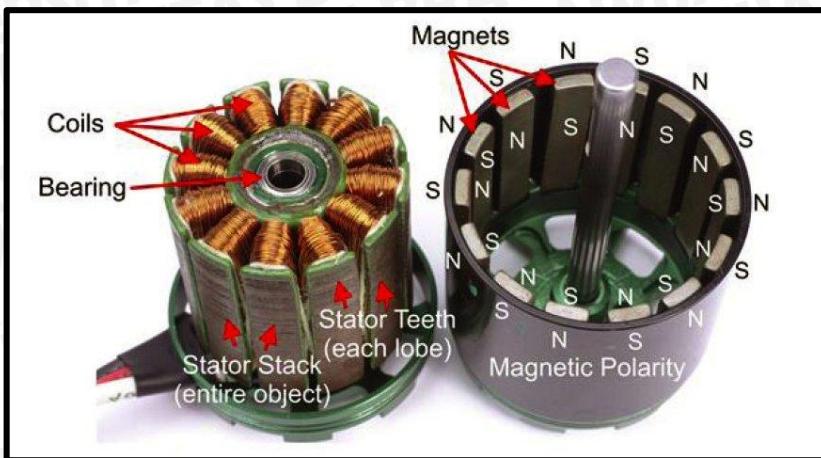
Motor DC *brushless* juga bisa dideskripsikan sebagai motor *stepper*. Motor DC *brushless* memiliki magnet permanen yang tetap dan mungkin juga dengan beberapa pole pada rotor daripada stator. Versi yang lain mungkin tanpa magnet permanen, hanya pole yang diinduksi pada rotor kemudian ditarik pada lilitan stator.

Skematik motor DC *brushless* diperlihatkan dalam Gambar 2.7.



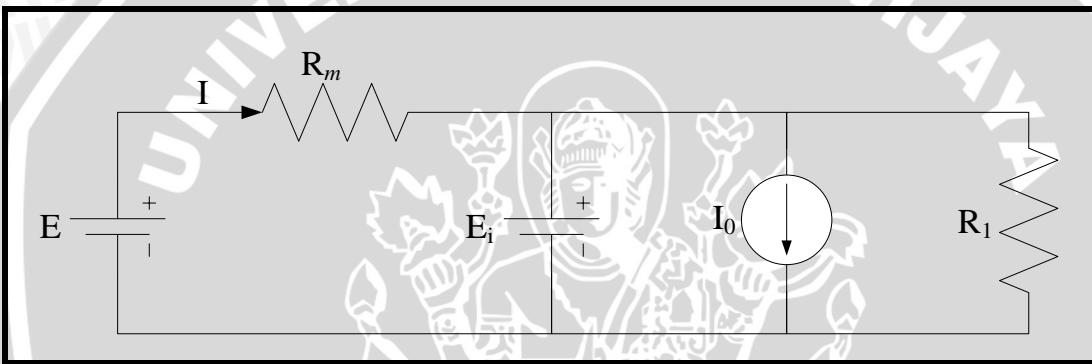
Gambar 2.7 Skematik Motor DC Brushless (Buchi, 2012: 12)

Komponen motor DC *brushless* yang ditunjukkan dalam Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Komponen Motor DC Brushless (www.rcuniverse.com)

Rangkaian ekivalen DC motor ditunjukkan dalam Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Rangkaian Ekivalen DC Motor (Brown, 2002: 6)

Sesuai dengan rangkaian ekivalen motor BLDC dalam Gambar 2.9, dapat ditentukan hubungan (Brown, 2002: 6):

$$E_i = E - IR_m \quad \dots \dots \dots \quad (2.5)$$

dengan :
 E_i = back-EMF (V)
 E = tegangan baterai (V)
 I = arus baterai (A)
 R_m = resistansi winding (Ω)

Maka kecepatan putaran motor ditentukan melalui:

$$K_v = \frac{N}{E_i} \quad \dots \dots \dots \quad (2.6)$$

dengan :
 K_v = konstanta RPM/ volt
 N = kecepatan putaran motor (RPM)
 E_i = back-EMF (V)

Nilai R_1 dari rangkaian ekivalen motor BLDC dapat ditentukan melalui:

$$R_1 = \frac{E - I(R_m + R_{ESC})}{I - I_0} \quad \dots \dots \dots \quad (2.7)$$

dengan : R_1 = rugi arus Eddy (Ω)

Seperti motor 3 fasa pada umumnya, BLDC motor memiliki 2 jenis lilitan pada statornya yaitu Y dan Δ . Hubungan pada nilai torsi antara keduanya ditunjukkan dengan persamaan (Brown, 2002: 6):

$$M_Y = \sqrt{M_4} \quad \dots \dots \dots \quad (2.8)$$

dengan : M = torsi (N.m)

$$\omega_Y = \frac{1}{\sqrt{3}}\omega_A \quad \dots \quad (2.9)$$

dengan : ω = kecepatan anguler (rad/s)

2.6.2 Motor Servo

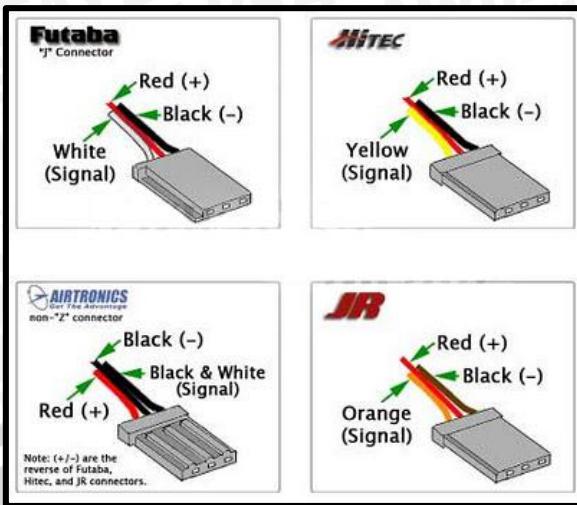
Berbeda dengan motor DC dan motor Stepper, motor servo adalah motor dengan sistem *closed feedback* yang berarti posisi dari motor akan diinformasikan kembali ke rangkaian kontrol yang ada dalam motor servo. Motor ini terdiri atas sebuah motor, serangkaian *internal gear*, potensiometer dan rangkaian kontrol. Potensiometer berfungsi untuk menentukan batas sudut putaran servo. Sedangkan sudut sumbu motor servo diatur berdasarkan lebar pulsa yang dikirim melalui kaki sinyal dari kabel motor.

Motor servo mampu bekerja dua arah yaitu CW (*clockwise*) atau searah jarum jam dan CCW (*counter clockwise*) atau berlawanan arah jarum jam yang arah dan sudut pergerakan rotornya dapat dikendalikan hanya dengan memberikan pengaturan *duty cycle* sinyal PWM (*pulse width modulation*) pada bagian pin kontrolnya. Gambar 2.10 menunjukkan gambar motor servo.



Gambar 2.10 Motor Servo

Sumber: Parallax, Inc.



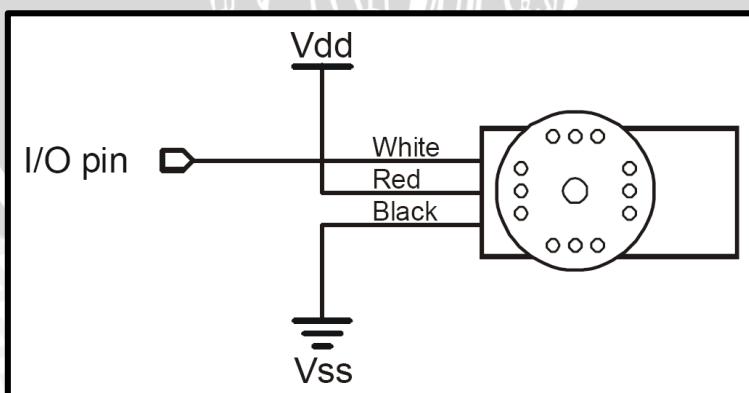
Gambar 2.11 Jalur Kabel Motor Servo

Sumber: fikri4share.blogspot.com

Motor servo merupakan motor yang berputar lambat, biasanya ditunjukkan oleh *rate* putarannya yang lambat, namun demikian memiliki torsi yang kuat karena *internal gear*-nya. Karakteristik motor servo adalah sebagai berikut:

1. Memiliki 3 jalur kabel: *power*, *ground*, dan *control* seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.11.
2. Pin *Control* untuk mengendalikan posisi.
3. Operasional dari motor servo dikendalikan oleh sebuah pulsa selebar ± 20 ms, dengan lebar pulsa antara 0.5 ms dan 2 ms menyatakan akhir dari *range* sudut maksimum.
4. Konstruksi didalamnya meliputi *internal gear*, *potensiometer*, dan *feedback control*.

Gambar 2.12 menunjukkan konfigurasi pin pengabelan motor servo.



Gambar 2.12 Konfigurasi Pin Pengabelan Motor Servo

Sumber: Parallax, Inc.

Secara umum terdapat dua jenis motor servo, yaitu:

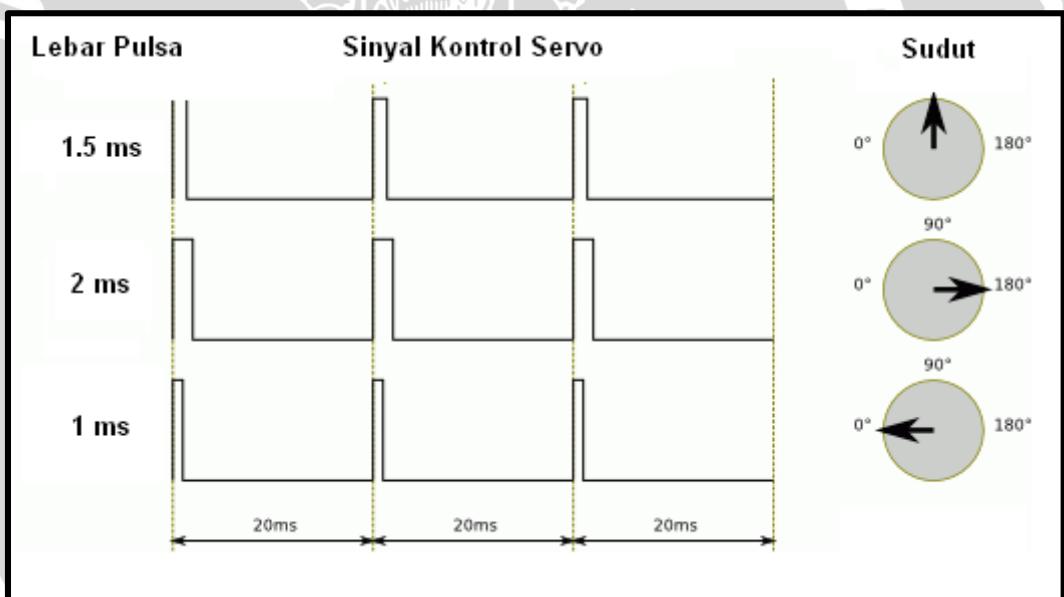
1. Motor Servo Standar 180°

Motor servo jenis ini merupakan motor yang hanya mampu bergerak dua arah (*CW* dan *CCW*) dan mempunyai *defleksi* masing-masing sudut mencapai 90° sehingga total *defleksi* sudut dari kanan – tengah – kiri adalah 180° .

2. Motor Servo *Continuous*

Motor servo jenis ini mampu bergerak dua arah (*CW* dan *CCW*) dan tanpa batasan *defleksi* sudut putar (dapat berputar secara kontinyu) sehingga motor ini berputar 360° .

Pengaturan sudut motor servo diperlukan untuk mengetahui gerakan dari motor servo dengan pulsa yang harus diberikan untuk bergerak ke kanan atau bergerak ke kiri. Gambar 2.13 menunjukkan teknik PWM (*pulse width modulation*) untuk mengatur sudut motor servo.



Gambar 2.13 Pengaturan Sudut Motor Servo

Sumber: Parallax, Inc.

Dalam Gambar 2.13 diasumsikan bahwa saat diberikan sinyal periodik dengan lebar 1 ms maka motor servo akan bergerak dengan sudut 0° , jika diberi sinyal 1.5 ms maka motor servo akan bergerak dengan sudut 90° , dan jika diberi sinyal 2 ms maka motor servo akan bergerak dengan sudut 180° .

2.7 Kontroler

Sistem pengendalian dirancang untuk melakukan dan menyelesaikan tugas tertentu.

Syarat utama sistem pengendalian adalah harus stabil. Di samping kestabilan mutlak, maka sistem harus memiliki kestabilan secara relatif, yakni tolak ukur kualitas kestabilan sistem dengan menganalisis sampai sejauh mana batas-batas kestabilan sistem tersebut jika dikenai gangguan (Ogata K.,1997). Selain itu analisis juga dilakukan untuk mengetahui bagaimana kecepatan sistem dalam merespons *input*, dan bagaimana peredaman terhadap adanya lonjakan (*over shoot*).

Suatu sistem dikatakan stabil jika diberi gangguan maka sistem tersebut akan kembali ke keadaan *steady state* di mana *output* berada dalam keadaan tetap seperti tidak ada gangguan. Sistem dikatakan tidak stabil jika *outputnya* berosilasi terus menerus ketika dikenai suatu gangguan. Karena suatu sistem pengendalian biasanya melibatkan penyimpanan energi maka *output* sistem ketika diberi suatu *input*, tidak dapat mengikuti *input* secara serentak, tapi menunjukkan respons transien berupa suatu osilasi teredam sebelum mencapai *steady state*.

Dalam sistem pengendalian terdapat 2 macam *loop*:

- ## 1. Pengendalian dengan *loop* terbuka

Sistem kontrol *loop* terbuka adalah sistem kontrol yang keluarannya tidak berpengaruh pada aksi pengontrolan. Jadi pada sistem kontrol *loop* terbuka, keluaran tidak diukur atau diumpam balikan untuk dibandingkan dengan masukan.

- ## 2. Pengendalian dengan *loop* tertutup

Sistem kontrol *loop* tertutup adalah sistem kontrol yang keluarannya mempunyai pengaruh langsung pada aksi pengontrolan. Disebut juga sistem kontrol yang menggunakan umpan balik untuk memperkecil kesalahan sistem.

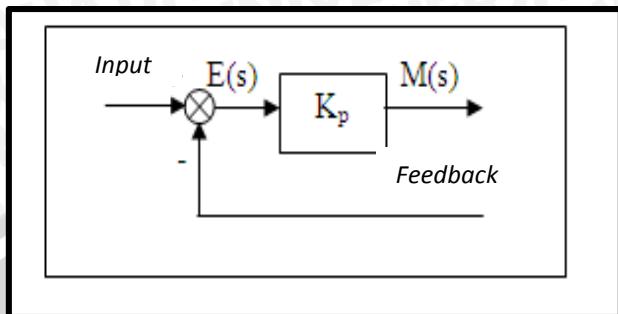
2.7.1 Kontroler Proporsional

Untuk kontroler dengan aksi kontrol proporsional, hubungan antara keluaran kontroler $m(t)$ dan sinyal kesalahan penggerak $e(t)$ adalah:

atau, dalam besaran transformasi Laplace,

Di mana K_p adalah kepekaan proporsional atau penguatan.

Apapun wujud mekanisme yang sebenarnya dan apapun bentuk daya penggeraknya, kontroler proporsional pada dasarnya merupakan penguat dengan penguatan yang dapat diatur (Ogata K.,1997). Diagram blok kontroler proporsional ditunjukkan dalam Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Diagram Blok Kontroler Proporsional

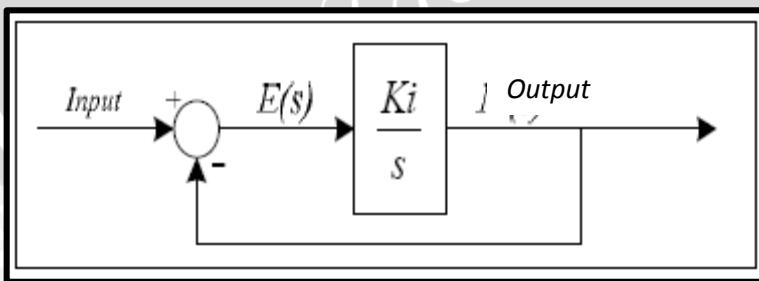
Sumber: Ogata K., 1997

2.7.2 Kontroler Integral

Pada kontroler dengan aksi integral, harga keluaran kontroler $m(t)$ diubah dengan laju yang sebanding dengan sinyal kesalahan penggerak $e(t)$.

Jadi,

Jika harga $e(t)$ diuakalikan, maka harga $m(t)$ berubah dengan laju perubahan menjadi dua kali semula. Jika kesalahan penggerak nol, maka harga $m(t)$ tetap stasioner. Aksi kontrol integral seringkali disebut kontrol *reset* (Ogata K.,1997). Gambar 2.15 menunjukkan diagram blok kontroler integral.



Gambar 2.15 Diagram Blok Kontroler Integral

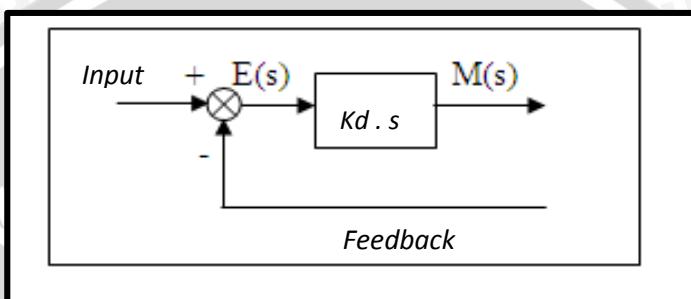
Sumber: Ogata K., 1997

2.7.3 Kontroler Diferensial

Kontroler ini digunakan untuk memperbaiki atau mempercepat respons transien sebuah sistem kontrol dengan cara memperbesar *phase lead* terhadap penguatan kontrol

dan mengurangi *phase lag* penguatan tersebut (Ogata K.,1997). Kontroler diferensial tidak dapat mengeluarkan *output* bila tidak ada perubahan *input*, selain itu kontroler differensial tidak dapat digunakan untuk proses yang mengandung *noise*. Hubungan antara keluaran kontroler $m(s)$ dan sinyal kesalahan penggerak $e(s)$ adalah :

Gambar 2.16 menunjukkan diagram blok kontroler diferensial.



Gambar 2.16 Diagram Blok Kontroler Diferensial

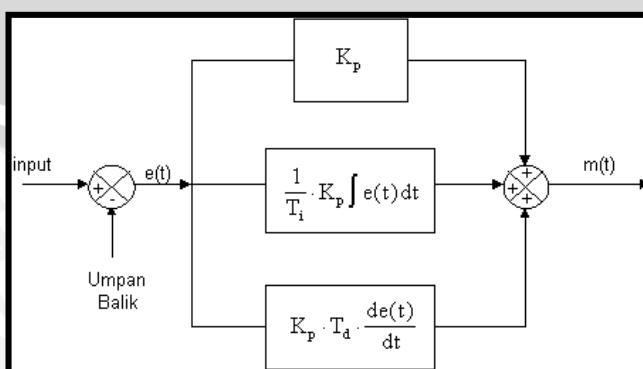
Sumber: Teknik Kontrol Automatik, Katsuhiko Ogata, 1997

2.7.4 Kontroler Proporsional Integral Diferensial (PID)

Gabungan aksi kontrol proporsional, integral, dan diferensial mempunyai keunggulan dapat saling menutupi kekurangan dan kelebihan dari masing-masing kontroler. Persamaan kontroler PID ini dapat dinyatakan sebagai berikut :

Dalam transformasi Laplace dinyatakan sebagai berikut :

Gambar 2.17 menunjukkan diagram blok kontroler PID



Gambar 2.17 Diagram Blok Kontroler PID

Sumber: Ogata K., 1997

2.7.5 Hand Tuning Kontroler PID

Kontroler PID dapat di *tuning* dalam beberapa cara, antara lain Ziegler-Nichols *tuning*, *loop tuning*, metode analitis, optimisasi, *pole placement*, *auto tuning*, dan *hand tuning* (Smith, 1979; Astrom & Hagglund, 1995). Pada skripsi ini digunakan cara *hand tuning* untuk menentukan besar K_p , K_i , dan K_d . Hal ini dilakukan karena ada kendala untuk melakukan cara lain yang disebutkan di atas. Kendala tersebut adalah tidak dapat melihat respon motor secara langsung karena tidak digunakannya sensor untuk mengukur kecepatan motor saat system berjalan. Selain itu tidak adanya model matematis dari motor membuat cara analitis sulit untuk dilakukan.

Menurut Smith (1979), untuk melakukan *hand tuning* prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Melepaskan kontroler integral dan deferensial dengan memberikan nilai $K_i = 0$ dan $K_d = 0$.
2. Mengatur nilai K_p hingga didapatkan respons yang diinginkan, dengan mengabaikan *offset* dari *setpoint*.
3. Dengan terus menaikkan nilai K_p , nilai dari K_d dinaikkan untuk mengurangi *overshoot* yang terjadi.
4. Naikkan nilai K_i untuk mengurangi *offset*.

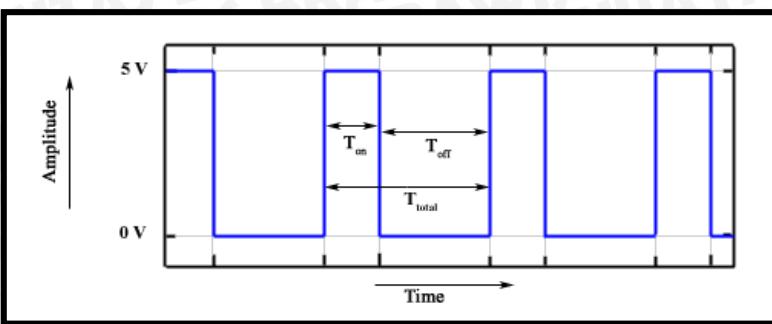
Keuntungan dari *hand tuning* adalah prosedur di atas dapat dilakukan dengan segera, *online* dan dapat melihat dengan cepat respons system setelah perubahan K_p , K_i , dan K_d . Kerugian dari cara ini adalah kesulitan untuk melihat apakah *setting* akhir dari kontroler merupakan nilai optimal atau tidak (Jantzen, 2001).

2.8 PWM (*Pulse Width Modulation*)

PWM (*Pulse Width Modulation*) digunakan untuk mengatur kecepatan dari motor DC. Kecepatan motor DC tergantung pada besarnya *duty cycle* yang diberikan pada motor DC tersebut.

Pada sinyal PWM, frekuensi sinyal konstan sedangkan *duty cycle* bervariasi dari 0% - 100%. Dengan mengatur *duty cycle* akan diperoleh keluaran yang diinginkan. Sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) secara umum dapat dilihat dalam Gambar 2.18 berikut:





Gambar 2.18 Sinyal PWM Secara Umum

Sumber: electronics-scheme.com

Dengan:

Ton = Periode logika tinggi

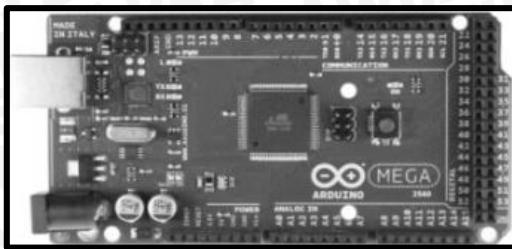
T = Periode keseluruhan

Sedangkan frekuensi sinyal dapat ditentukan dengan rumus berikut:

2.9 Arduino Mega

Arduino adalah papan rangkaian elektronik (*electronic board*) *open source* yang didalamnya terdapat komponen utama yaitu sebuah chip mikrokontroler berbasis ATMega 2560. Mikrokontroler itu sendiri adalah suatu chip atau IC (*Integrated circuit*) yang bisa deprogram menggunakan komputer. Program yang direkam bertujuan agar rangkaian elektronik dapat membaca *input*, memproses dan kemudian menghasilkan *output* sesuai yang diinginkan. *Output*-nya bisa berupa sinyal, besaran tegangan, lampu, suara, getaran, gerakan dan sebagainya.

Saat ini arduino sangat populer, banyak pemula maupun profesional ikut mengembangkan aplikasi elektronik menggunakan Arduino, Bahasa yang dipakai, bahasa C yang disederhanakan dengan bantuan pustaka – pustaka (*libraries*) Arduino, Arduino Mega 2560 dapat dilihat pada Gambar 2.19



Gambar 2.19 Arduino Mega 2560

Sumber: <http://riset.budiluhur.ac.id>

Pada dasarnya dalam menggunakan komponen yang dihubungkan dengan Arduino. Arduino hanya mengeluarkan tegangan 0 Volt dan 5 Volt saja kepada komponen tersebut. Kondisi *input* yang demikian dikenal sebagai digital *input* dengan logika 1 dan 0, dimana 1 untuk tegangan *HIGH* atau 5 volt dan 0 untuk tegangan *LOW* atau 0 volt.

Arduino khusus menyediakan 6 kanal (8 kanal pada model Mini dan Nano, dan 16 pada model Mega) untuk difungsikan sebagai analog *input*. Analog ke digital konverternya menggunakan resolusi 10 bit yang berarti *range* nilai analog dari 0 volt sampai 5 volt akan dirubah ke nilai integer 0 sampai 1023, atau resolusinya adalah $5 \text{ volt}/1024 = 4,9\text{mV}$ per unit di mana itu berarti nilai digital yang dihasilkan akan berubah setiap perubahan 4,9mV dari tegangan *input* analognya. Akan tetapi *range input* analog dan resolusi tersebut dapat dirubah dengan fungsi *analogReference()*. Perintah yang digunakan untuk fungsi analog *input* ini adalah *analogRead(pin)* yang berfungsi untuk membaca nilai analog pada input pin yang akan menghasilkan nilai integer antara 0-1023 dan *analogReference(parameter)* yang berfungsi untuk menentukan referensi yang digunakan.

Arduino menggunakan cara *Pulse Width Modulation* (PWM) atau modulasi lebar pulsa untuk menghasilkan analog *output* yang dikehendaki. Metode PWM ini menggunakan pendekatan perubahan lebar pulsa untuk menghasilkan nilai tegangan analog yang diinginkan. Pin yang difungsikan sebagai PWM analog output akan mengeluarkan sinyal pulsa digital dengan frekwensi 490 Hz dimana nilai tegangan analog diperoleh dengan merubah *Duty Cycle* atau perbandingan lamanya pulsa *HIGH* terhadap periode (T) dari sinyal digital tersebut. Jika pulsa *HIGH* muncul selama setengah dari periode sinyal maka akan menghasilkan *duty cycle* 50% yang berarti sinyal analog yang dihasilkan sebesar setengah dari tegangan analog maksimal yaitu $\frac{1}{2}$ dari 5 V atau sama dengan 2,5 V begitu juga halnya jika pulsa *HIGH* hanya seperempat bagian dari periode sinyal maka tegangan analog identik yang dihasilkan adalah $1/4$ dari 5V = 1,25 V dan seterusnya.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN DAN PERANCANGAN

3.1 Metodologi Penelitian

Kajian dalam skripsi ini merupakan penelitian yang bersifat aplikatif, yaitu merancang dan membuat suatu *Hovercraft Line Follower* dengan menitikberatkan pengendalian sudut motor servo pada motor pendorong dengan menggunakan kontroler *Proporsional Integral Defersial* (PID) yang bertujuan agar dapat menampilkan performansi sistem sesuai dengan yang direncanakan.

Langkah-langkah yang perlu dilakukan untuk merealisasikan alat yang akan dibuat adalah sebagai berikut:

1. Spesifikasi alat
2. Perancangan dan realisasi pembuatan alat
3. Pengujian alat
4. Pengambilan kesimpulan

3.1.1 Spesifikasi Alat

Adapun spesifikasi alat yang akan direalisasikan adalah sebagai berikut:

1. *Hovercraft* yang digunakan jenis *Hovercraft Flexible Skirt*.
2. *Hovercraft* memiliki dimensi lebar 26 cm, panjang 26 cm, dan tinggi 20 cm. Menggunakan *acrylic* 2 mm dan 3 mm sebagai kerangka serta *Styrofoam* sebagai sekat penghubung rangka.
3. Arduino yang digunakan ialah Arduino Mega 2560.
4. Kontroler yang digunakan ialah kontroler Proporsional, Defersial dan Integral (PID).
5. Pemrograman menggunakan bahasa pemrograman tingkat ke tiga, yaitu C++.
6. Rangkaian Arduino, sensor, dan *electronic speed controller* (ESC) terletak dalam lambung sedangkan tombol *tuning* dan LCD terletak pada bagian depan.
7. Motor DC *brushless* 1400kV terletak pada lambung mengarah ke dalam dan pada bagian belakang sebagai pendorong dengan masing-masing menggunakan *propeller* 6 x 5 inchi.

3.1.2 Perancangan dan Realisasi Pembuatan Alat

3.1.2.1 Perancangan Perangkat Keras dan Realisasi Pembuatan Alat

- a. Pembuatan diagram blok secara lengkap
- b. Penentuan dan perhitungan komponen yang akan digunakan
- c. Merakit perangkat keras (*hardware*) untuk masing-masing blok.

3.1.2.2 Perancangan dan Perhitungan Komponen yang akan Digunakan

Setelah mengetahui seperti apa perangkat keras yang dirancang, maka dibutuhkan perangkat lunak untuk mengendalikan dan mengatur kerja dari alat ini. Desain dan parameter yang telah dirancang, kemudian ditetapkan pada arduino dengan menggunakan bahasa pemrograman C++.

3.1.2.3 Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak dilakukan setelah mengetahui nilai parameter Proporsional (P), Integral (I), dan Deferensial (D). Perancangan dimulai dari pembuatan *flowchart*, kemudian dilanjutkan dengan penulisan *listing code*.

3.1.3 Pengujian Alat

Setelah semua komponen pada alat sudah terhubung sesuai dengan diagram blok sistem yang telah dirancang dan perangkat lunak untuk mendukung sistem yang telah dibuat, maka diadakan pengujian dan analisa alat. Metode pengujinya adalah sebagai berikut:

1. Pengujian Catu Tegangan Baterai

Pengujian baterai dilakukan dengan cara menghubungkan dengan multimeter pengukur tegangan. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tegangan yang dihasilkan oleh baterai. Baterai yang akan diuji adalah baterai *li-po* 11.1 V 2200 mA.

2. Pengujian Tegangan Regulator dan ESC

Pengujian dilakukan dengan cara memberi catu rangkaian regulator +5 V dan ESC dengan baterai *li-po* dan diukur tegangan keluarannya. Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan hasil tegangan keluaran yang akan digunakan untuk memberi catu mikrokontroler. Hasil keluaran dipilih tegangan yang stabil mendekati +5 V.

3. Pengujian Sensor



Pengujian sensor dilakukan dengan cara mensimulasikan rangkaian sensor dan hasil pemodelan rangkaian sensor. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan sensor dan hasil pemodelan sensor dapat bekerja sesuai dengan perancangan dan memberikan analisa terhadap hasil pengujian. Terdapat rangkaian sensor utama yang akan diuji, yaitu sensor *photo reflective* sebagai pengukur intensitas cahaya yang dikonversi ke dalam tegangan.

4. Pengujian RPM dan *Thrush* Motor DC *Brushless Hover*

Pengujian ini dilakukan dengan mensimulasikan berbagai macam kecepatan putaran motor yang telah dipasang *propeller* untuk melihat RPM dan gaya angkat yang dihasilkan. Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan *thrust* secara perhitungan dan pengujian.

5. Pengujian Sinyal PWM Motor Servo

Pengujian ini dilakukan dengan mensimulasikan macam sudut arah servo yang telah dipasang sirip untuk melihat sudut terbaik yang dapat mengarahkan gerak robot dalam mengikuti garis hitam.

6. Pengujian Massa Robot *Hovercraft Line Follower*

Pengujian ini dilakukan dengan cara menimbang keseluruhan robot untuk mengetahui massa rata-rata yang digunakan sebagai nilai ukur untuk menghitung gaya berat.

7. Pengujian RPM Motor DC *Brushless Pendorong*

Pengujian ini dilakukan dengan cara mensimulasikan robot saat mengikuti garis dengan dan tanpa kontroler. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah keluaran kontroler sudah sesuai dengan yang direncanakan atau tidak.

8. Pengujian Sistem Keseluruhan

Pengujian ini dilakukan dengan cara menggabungkan semua bagian alat yang dibuat dan melihat kinerja alat. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja alat yang dibuat dan memberikan analisa terhadap kinerja alat.

3.1.4 Pengambilan Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan diambil berdasarkan data yang diperoleh dari pengujian sistem secara keseluruhan. Jika hasil yang didapatkan telah sesuai dengan yang direncanakan sebelumnya, maka sistem kendali tersebut telah berhasil memenuhi harapan dan tentunya memerlukan saran untuk pengembangan lebih lanjut untuk penyempurnaan.

3.2 Perancangan dan Pembuatan Alat

Perancangan dan pembuatan alat ini terdiri dari dua bagian, yaitu bagian perangkat keras dan bagian perangkat lunak. Perancangan dan pembuatan alat dilakukan secara bertahap untuk memudahkan analisa sistem. Beberapa aspek yang perlu dijelaskan dalam bab ini meliputi penentuan spesifikasi alat, perencanaan masing-masing blok rangkaian dan perencanaan sistem secara keseluruhan.

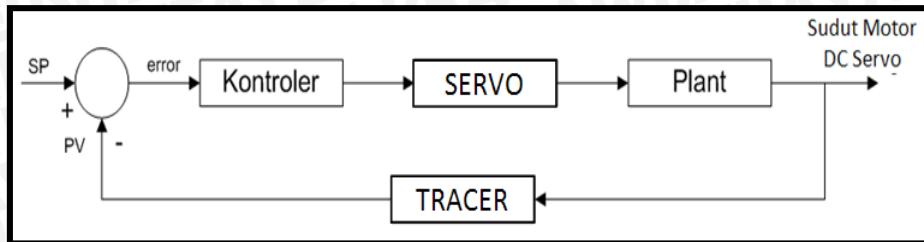
3.2.1 Spesifikasi Sistem

Spesifikasi sistem yang dirancang adalah sebagai berikut:

1. Robot *Hovercraft Line Follower* menggunakan rangka dengan spesifikasi sebagai berikut:
 - Robot mempunyai bentuk segi delapan dengan masing-masing sisi mempunyai panjang 9,3 cm
 - Tinggi robot adalah 20 cm.
 - Sisi penutup robot menggunakan acrylic dengan tebal 3mm.
 - Penyangga motor *hover* dan motor pendorong menggunakan bahan *acrylic* dengan tebal 3 mm.
 - Sekat untuk menggabungkan *body* atas dan bawah menggunakan *Styrofoam* dengan tebal 1.5cm.
 - *Skirt* untuk perangkap udara menggunakan plastik hitam.
2. Pergerakan robot *Hovercraft Line Follower* menggunakan 2 (dua) buah motor DC *brushless* dengan 1 (satu) buah motor untuk menghasilkan gaya angkat dan 1 (satu) buah motor untuk menghasilkan gaya dorong.
3. *Propeller* pada *shaft* motor menggunakan EMP *Electric Propeller* 6x5E (diameter 6 inchi).
4. 2 (dua) *Electronic Speed Controller* sebagai pengkondisi sinyal masukan pada motor DC *brushless* sebesar 30 A untuk motor DC *brushless* pendorong dan 60A untuk motor DC *brushless* *hover*.
5. Menggunakan 9 (sembilan) buah sensor *photo reflective*.
6. Menggunakan Arduino Mega sebagai pengontrol utama.
7. Catu tegangan menggunakan baterai *Li-po* 11.1 V 2200mA.

3.2.2 Diagram Blok Sistem

Diagram blok secara umum ditunjukkan dalam Gambar 3.1.

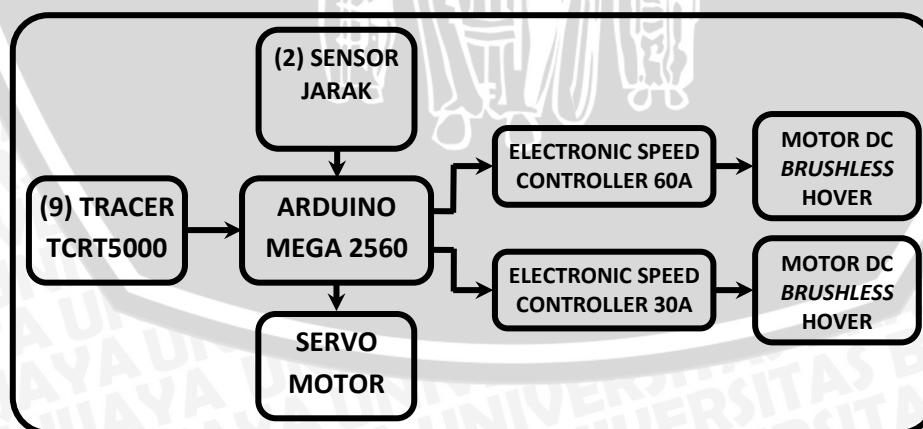


Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem secara Umum (Perancangan, 2016)

Keterangan diagram blok dalam Gambar 3.1 adalah:

- *Input* berupa nilai parameter dari pembacaan sensor saat posisi lurus $SP = 0$.
- Sinyal *feedback* dari sensor berupa nilai bobot (PV) pembacaan sensor yang diumpam balikkan.
- *Error* berupa simpangan antar bobot sensor (PV) dengan nilai acuan (SP).
- Kontroler yang digunakan adalah Proporsional, Integral, dan Diferensial dengan menggunakan arduino mega untuk mengolah nilai PID yang digunakan sebagai nilai kontrol kecepatan motor DC *brushless*.
- Aktuator berupa 2 (dua) motor DC *brushless*, satu motor servo.
- *Plan* berupa robot *hovercraft line follower*.
- *Output* berupa nilai hasil kontrol yang berpengaruh pada pergerakan motor dc servo.

Blok diagram sistem *hovercraft line follower* secara keseluruhan ditunjukkan dalam Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram Blok Sistem Robot *Hovercraft Line Follower* (Perancangan, 2016)

Keterangan diagram blok dalam Gambar 3.2 adalah:

- *Photo Reflective* memberikan nilai $SP = 0$ dan nilai PV sesuai nilai bobot pembacaan yang diberikan tiap sensor.

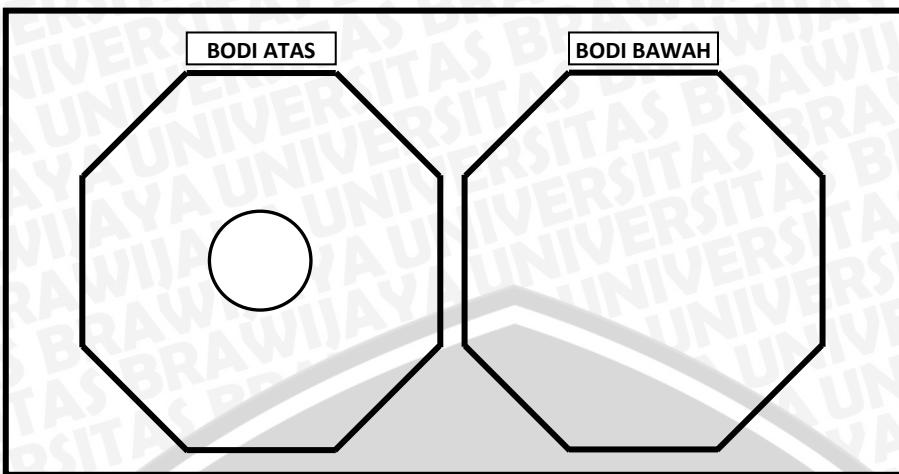
- Sensor Jarak HY-SRF05 memberikan nilai jarak pada rintangan atau halangan yang ada di depan robot.
- Arduino Mega mengolah nilai *error* dari simpangan antara nilai SP sebagai *input* dan bobot sensor (PV) untuk menghasilkan sinyal kontrol yang kemudian dikirimkan ke motor servo, 2 motor DC, dan ESC.
- Arduino Mega memberikan sinyal kontrol menuju ESC motor DC *brushless hover*, mengolah sinyal dan menghasilkan sinyal control PID yang kemudian dikirimkan menuju motor DC Servo.
- ESC berfungsi menguatkan sinyal kontrol dan diteruskan menuju motor DC *brushless*.
- Keluaran akan mempengaruhi posisi robot sehingga akan memberikan nilai bobot sensor (PV) pembacaan sensor baru.
- Hasil pembacaan sensor kemudian dikurangkan dengan *input* sehingga arduino mega mampu mengkompensasi *error* yang terjadi.

3.2.3 Perancangan Perangkat Keras

Perangkat keras terdiri dari rangka *hovercraft line follower*, board arduino mega, board sensor *line tracer*, *electronic speed controller*, motor DC *brushless*, sensor jarak HY-SRF05 dan *propeller* dan sistem kendali arah.

3.2.3.1 Perancangan Rangka Robot *Hovercraft Line Follower*

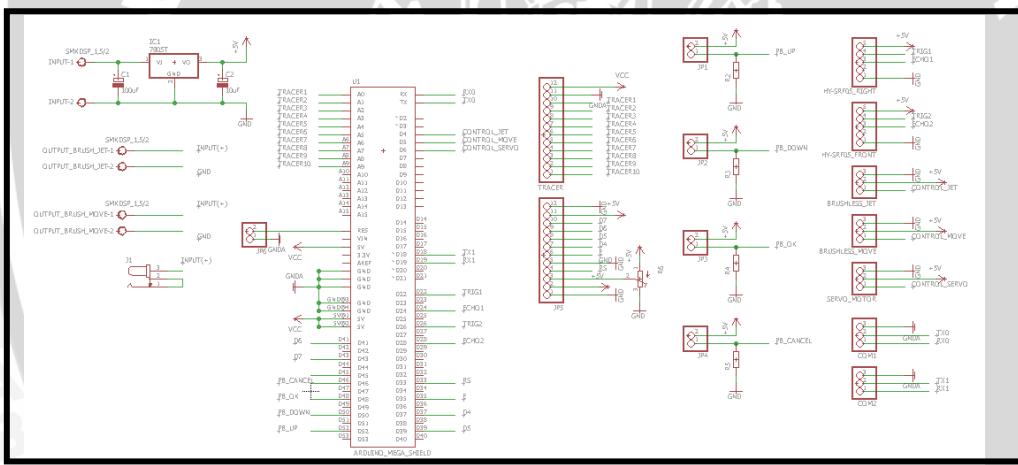
Perancangan rangka dilakukan sebagai dasar dari komponen-komponen yang akan diletakkan. Secara umum rangka robot *hovercraft line follower* ditunjukkan dalam Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Rangka Robot Hovercraft Line Follower (Perancangan, 2016)

3.2.3.2 Rangkaian Shield Arduino Mega 2560

Shield arduino mega 2560 merupakan rangkaian utama dari sistem robot *hovercraft line follower*. Arduino terhubung langsung dengan sensor *photo reflective*, Sensor Jarak HY-SRF05, motor servo dan dua buah ESC. Rangkaian board shield arduino mega ditunjukkan dalam Gambar 3.4:



Gambar 3.4 Rangkaian Shield Arduino Mega 2560 (Perancangan, 2016)

Arduino mega 2560 memiliki 54 jalur yang dapat diprogram menjadi keluaran atau masukan. Pin masukan dan keluaran arduino mega 2560 pada perancangan akan difungsikan sesuai Tabel 3.1:

Tabel 3.1 Fungsi Pin Arduino Mega (Perancangan, 2016)

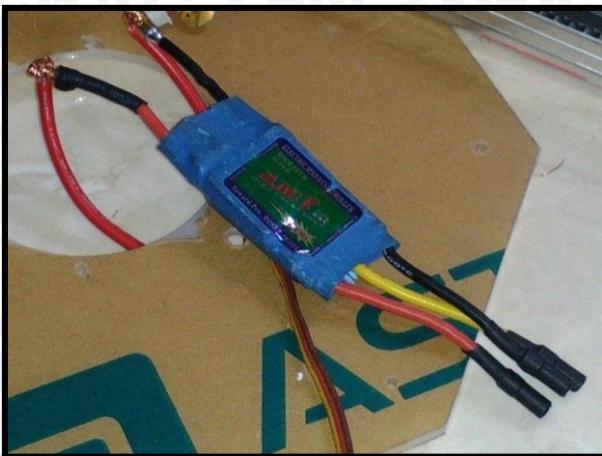
No.	Pin	Fungsi
1	A0	Jalur masukan sensor 0
2	A1	Jalur masukan sensor 1
3	A2	Jalur masukan sensor 2
4	A3	Jalur masukan sensor 3
5	A4	Jalur masukan sensor 4
6	A5	Jalur masukan sensor 5
7	A6	Jalur masukan sensor 6
8	A7	Jalur masukan sensor 7
9	A8	Jalur masukan sensor 8
10	D52	Jalur masukan <i>Push Button UP</i>
11	D50	Jalur masukan <i>Push Button DOWN</i>
12	D48	Jalur masukan <i>Push Button OK</i>
13	D46	Jalur masukan <i>Push Button CANCEL</i>
14	D22	Jalur masukan <i>TRIG HY-SRF05 RIGHT</i>
15	D24	Jalur masukan <i>ECHO HY-SRF05 RIGHT</i>
16	D26	Jalur masukan <i>TRIG HY-SRF05 FRONT</i>
17	D28	Jalur masukan <i>ECHO HY-SRF05 FRONT</i>
18	TX0	Jalur masukan <i>HC-05 Bluetooth Module</i>
19	RX0	Jalur masukan <i>HC-05 Bluetooth Module</i>
20	D4	Jalur keluaran <i>Brushless Hover</i>
21	D5	Jalur keluaran <i>Brushless Pendorong</i>
22	D6	Jalur Keluaran <i>Servo</i>
23	D33	Jalur keluaran <i>RS(LCD)</i>
24	D35	Jalur keluaran <i>E(LCD)</i>
25	D37	Jalur keluaran <i>D4(LCD)</i>
26	D39	Jalur keluaran <i>D5(LCD)</i>
27	D41	Jalur keluaran <i>D6(LCD)</i>
28	D43	Jalur keluaran <i>D6(LCD)</i>

3.2.3.3 Electronic Speed Controller (ESC)

Electronic speed controller berfungsi sebagai penguat tegangan dari keluaran pin motor dan juga berfungsi sebagai pemecah fasa. Karena BLDC yang digunakan merupakan motor DC dengan 3 fasa dengan hubungan *star*.

ESC yang digunakan ditunjukkan dalam Gambar 3.5.





Gambar 3.5 Electronic Speed Controller 30A (Perancangan, 2013)

3.2.3.4 Pemilihan Motor DC *Brushless* dan Propeller

Kombinasi antara motor DC *brushless* dan *propeller* harus tepat agar mampu menghasilkan daya angkat (*thrust*) yang sesuai dengan berat keseluruhan robot *hovercraft line follower* (termasuk *battery*), motor DC *brushless* dan komponen-komponen lainnya. Perhitungan mengenai *thrust* yang dihasilkan sebuah *propeller* didasarkan pada persamaan 3.1 berikut ini:

$$T = cT \frac{4\pi r^4}{\pi^2} \omega^2 \quad \dots \dots \dots \quad (3.1)$$

dimana:

- T = *thrust propeller* (N)
- cT = koefisien *propeller* (0.1098 untuk EMP 6x5E)
- ρ = kerapatan udara (1.225 kg/m^3)
- ω = kecepatan anguler *propeller* ($2\pi n$ satuan rad/s)
- n = jumlah putaran *propeller* per detik
- r = jari-jari *propeller* (m)
- π = 3.1429

Sesuai dengan spesifikasi sistem yang dijabarkan sebelumnya, bahwa pada skripsi ini menggunakan EMP 6x5E dengan motor DC *brushless* 1400kV. EMP 6x5E memiliki diameter 15.24 cm yang memadai untuk diposisikan di dalam lambung robot yang memiliki lebar 20 cm dengan luas penampang robot 0,0887 m^2 .

Tabel 3.2 menunjukkan perhitungan *thrust* yang dihasilkan setiap kenaikan kecepatan motor DC *brushless*.

Tabel 3.2 Perhitungan *Thrust* (Perancangan, 2013)

RPM	ω (rad/s)	Thrust (N)
700	73.334	0.010
1400	146.669	0.040
2100	220.003	0.089
2800	293.337	0.158
3500	366.672	0.247
4200	440.006	0.356
4900	513.340	0.484
5600	586.675	0.632
6300	660.009	0.800
7000	733.343	0.988
7700	806.678	1.195
8400	880.012	1.422
9100	953.346	1.669
9800	1026.681	1.936
10500	1100.015	2.222
11200	1173.349	2.528
11900	1246.684	2.854
12600	1320.018	3.200
13300	1393.352	3.565
14000	1466.687	3.950

Jika berat maksimal *hovercraft line follower* mencapai 1.506 kg, maka perhitungan gaya berat *hovercraft line follower* adalah:

$$F = ma \quad \dots \dots \dots \quad (3.2)$$

dengan F = gaya berat (N)

m = massa benda (kg)

a = gravitasi bumi (9.81 m/s^2)

maka :

$$\begin{aligned} F &= 1.506 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \\ &= 14.774 \text{ N} \end{aligned}$$

Kemudian dibandingkan dengan tekanan dari gaya *thrust* dengan persamaan sebagai berikut:

$$p = \frac{F}{A} \quad \dots \dots \dots \quad (4.3)$$

dengan p = tekanan (N/m^2)

F = gaya berat (N)

A = luas penampang dasar robot (m^2)

maka:

$$p_{robot} = \frac{14.774 \text{ N}}{0.0887 \text{ m}^2}$$

$$p_{robot} = 166.561 \text{ N/m}^2$$

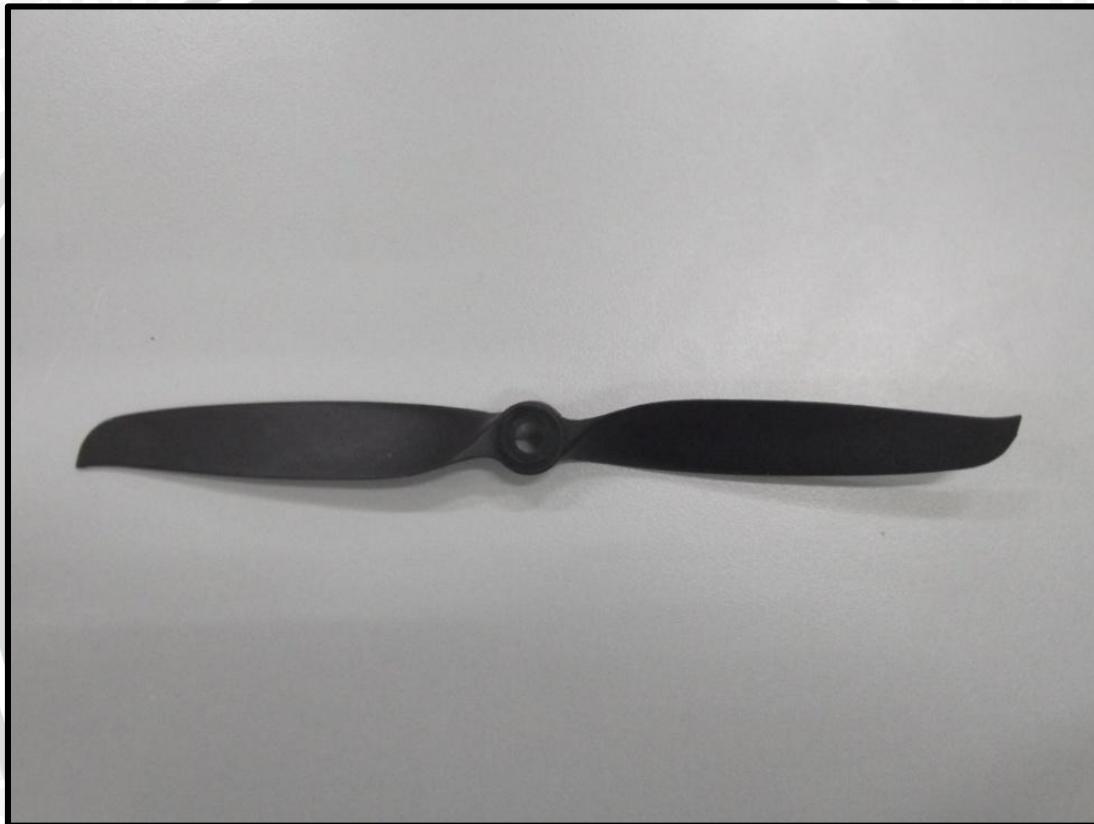
Kemudian untuk tekanan pada thrust 2.854 N dengan 11.900 RPM

maka:

$$p_{thrust} = \frac{2.854 \text{ N}}{0.0887 \text{ m}^2} (\text{T pada RPM } 11.900)$$

$$p_{thrust} = 32.176 \text{ N/m}^2$$

Dari permasalahan bahwa tekanan ke atas yang dibutuhkan adalah pada *thrust* 2.854 N dengan 11.900 RPM. Maka akan terjadi tekanan dalam ruang udara sebesar 32.176 N/m². Bentuk fisik *propeller* EMP 6x5E ditunjukkan dalam Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Propeller EMP 6x5E (Perancangan, 2013)

Selain sesuai dengan dimensi robot, pemilihan *propeller* disesuaikan juga dengan kemampuan putaran motor DC *brushless*.

Motor DC *brushless* 1400kV mampu menghasilkan putaran hingga 15540 rpm dengan tegangan masukan 11.1 V yang terlihat dalam Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Motor DC *Brushless* 1400kV (Perancangan, 2016)

3.2.3.5 Pemilihan Sistem Kendali Arah

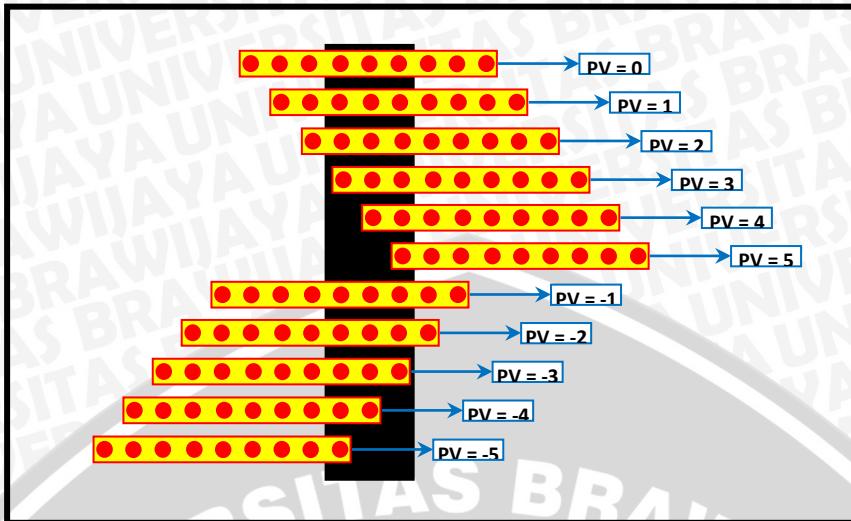
Kendali arah memanfaatkan tiga motor, yaitu satu motor servo dan dua motor DC *Brushless*. Motor servo sebagai penggerak arah aliran hembusan udara BLDC pendorong harus memiliki torsi yang tinggi. Pada motor servo Toward Pro MG996R mampu menghasilkan torsi 9.4 kg/cm dalam tegangan 4.8 V. Alasan dipilihnya torsi tinggi supaya pergerakan arah servo tidak terpengaruh oleh tekanan udara dari BLDC pendorong. Motor servo Toward Pro MG996R ditunjukkan dalam Gambar 3.8.



Gambar 4.8 Motor Servo Toward Pro MG996R (Perancangan, 2016)

3.2.4 Perancangan Nilai *Setpoint*

Perancangan nilai *setpoint* diperlukan untuk menentukan posisi robot pada garis hitam sehingga robot dapat bergerak mengikuti alur garis hitam. Penentuan nilai *setpoint* didasarkan pada pembacaan *tracer* yang berjumlah 9 (sembilan) buah. Adapun penentuan nilai *setpoint* ditunjukkan dalam Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Penentuan Nilai Setpoint Posisi

Berdasarkan Gambar 3.9, penentuan posisi robot didasarkan pada posisi pembacaan tracer pada garis hitam. Di mana ketika posisi robot sebelah kanan dari garis hitam, nilai posisi yang terbaca adalah + (positif). Adapun juga sebaliknya ketika posisi robot ada di sebelah kiri garis hitam, nilai posisi yang terbaca adalah – (negatif). Nilai *setpoint* posisi robot yang diharapkan adalah pada posisi PV=0.

3.2.5 Penentuan Nilai Penguatan Kontroler

Penentuan nilai penguatan kontroler dengan parameter K_p, K_i dan K_d dilakukan dengan metode Ziegler-Nichols. Penentuan nilai parameter dilakukan dengan cara menambahkan nilai pada parameter K_{cr} dari kecil bertahap sampai terjadi osilasi dengan periode yang stabil, dimana nilai T_i dan T_d diberikan nilai 0. Kemudian dari grafik osilasi yang mempunyai periode stabil didapatkan nilai P_{cr}. Nilai K_{cr} dan P_{cr} yang sudah didapatkan melalui proses eksperimental dimasukkan ke dalam tabel aturan dasar Ziegler-Nichols yang ditunjukkan dalam Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Aturan Dasar Ziegler-Nichols Berdasarkan *Critical Gain* K_{cr} dan *Critical Period* P_{cr}
(Perancangan, 2016)

Tipe Kontroler	K _p	T _i	T _d
P	0.5 K _{cr}	∞	0
PI	0.45 K _{cr}	$\frac{1}{1.2} P_{cr}$	0
PID	0.6 K _{cr}	0.5 P _{cr}	0.125 P _{cr}

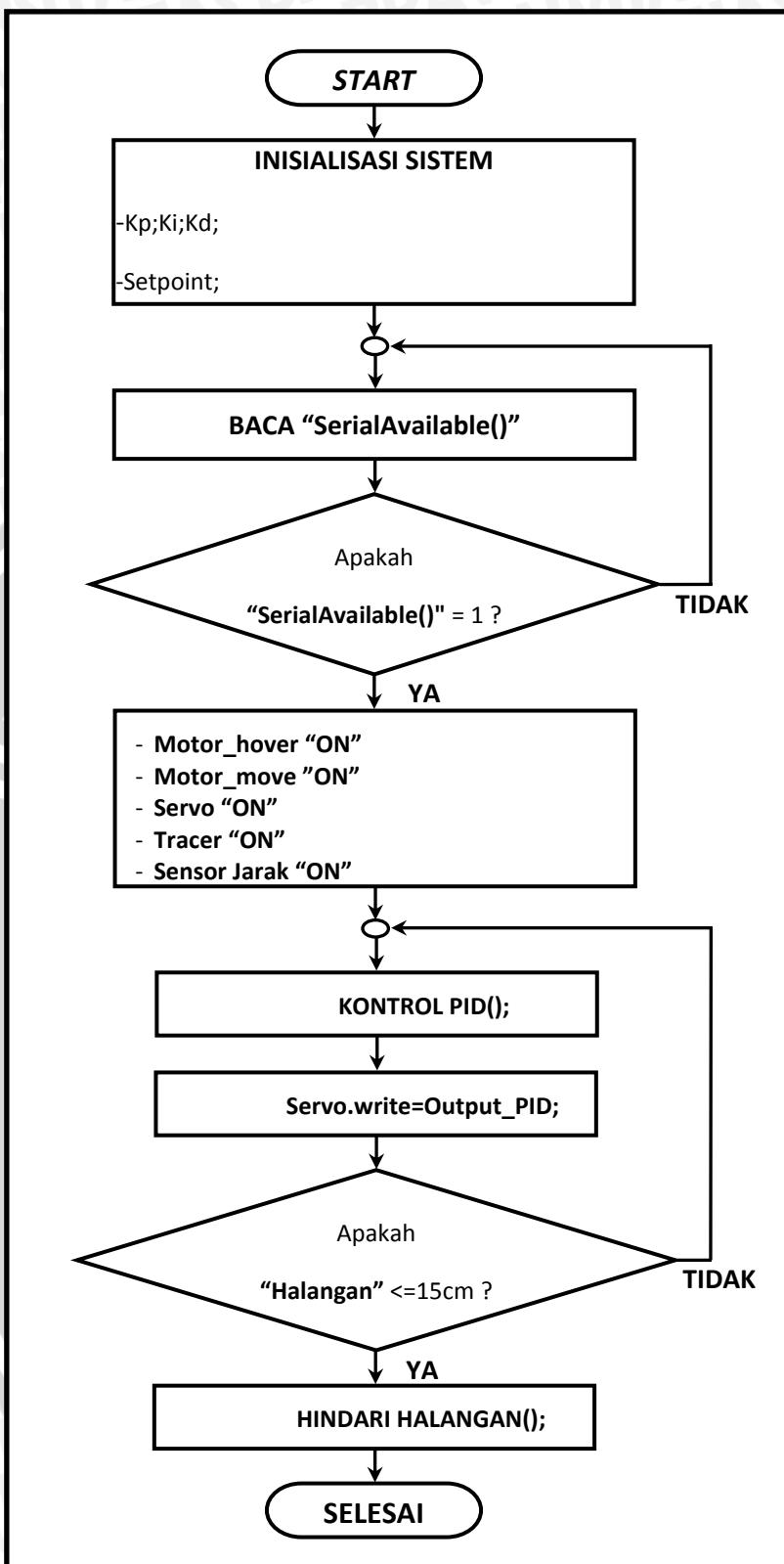
Adapun setelah ditemukan parameter K_p, K_i dan K_d dari hasil aturan dasar Ziegler-Nichols kemudian diamati respon dari plan. Apabila respon yang terjadi belum sesuai

dengan yang diharapkan, maka dilakukan *tuning* nilai Kp, Ki dan Kd sampai didapatkan respon plan seperti yang diharapkan.

3.2.6 Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak pada penelitian ini menggunakan *compiler Arduino.Ide*. Adapun perancangan perangkat lunak perlu dilakukan untuk didapatkan respon plan dari robot yang sesuai dengan yang diharapkan. *Flowchart* perangkat lunak ditunjukkan dalam Gambar 3.10.





Gambar 3.10 Flowchart Perangkat Lunak (Perancangan, 2016)

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISIS

Tujuan pengujian sistem ini adalah untuk menentukan apakah alat yang telah dibuat berfungsi dengan baik dan sesuai dengan perancangan. Pengujian pada sistem ini meliputi pengujian setiap blok maupun pengujian secara keseluruhan. Pengujian setiap blok ini dilakukan untuk menemukan letak kesalahan dan mempermudah analisis pada sistem apabila alat tidak bekerja sesuai dengan perancangan. Pengujian dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu:

1. Pengujian catu tegangan baterai
2. Pengujian tegangan regulator dan ESC
3. Pengujian tegangan keluaran sensor *photo reflective*
4. Pengujian sinyal PWM motor servo
5. Pengujian Sensor Jarak HY-SRF05
6. Pengujian Sistem keseluruhan

4.1 Pengujian Catu Tegangan Baterai

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui catu tegangan yang dihasilkan oleh baterai *Li-po* yang digunakan untuk mencatu sistem keseluruhan.

4.1.1 Peralatan Pengujian

1. Baterai *Li-po* 11,1 V 2200 mA
2. Digital Multimeter FLUKE 111

4.1.2 Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan kutub positif dan kutub negatif dengan multimeter digital. Kemudian hasil pengukuran dicatat yang kemudian dihitung nilai error nya.

4.1.3 Hasil Pengujian

Pengujian catu tegangan baterai *Li-po* 11,1 V 2200 mA ditunjukkan dalam Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Pengujian Catu Tegangan Baterai Li-po 11,1 V 2200 mA (Pengujian, 2016)

Dari hasil pengujian baterai yang dilakukan diketahui mempunyai error:

$$error(\%) = \frac{|V_{Pengukuran} - V_{baterai}|}{V_{baterai}} \times 100\% \quad \dots \dots \dots (4.2)$$

dengan $V_{\text{Pengukuran}}$ = tegangan baterai yang diukur.

V_{baterai} = tegangan standar baterai 11.1 V

$$error = \frac{|12,08 - 11,1|}{11,1} \times 100\%$$

error = 8,82 %

terjadi *error* sebesar 8.82 %, namun tegangan tersebut mampu memberikan catu lebih lama dalam pengujian.

4.2 Pengujian Tegangan ESC

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui hasil dari pengaturan tegangan regulator +5 V pada mikrokontroler dan tegangan keluaran pada rangkaian ESC.

4.2.1 Peralatan Pengujian

1. Baterai *Li-po* 11.1 V 2200A
2. Digital Multimeter FLUKE 111
3. Rangkaian regulator pada Arduino Mega.
4. Modul ESC FLYFUN 30 A
5. Modul ESC HELICOX PENTIUM 60A

4.2.2 Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan baterai 11,1 V pada arduino mega. Kemudian tegangan keluaran pada pin 5V diukur menggunakan multimeter digital dan dilakukan pencatatan. Untuk ESC dihubungkan dengan baterai 11,1 V pada kabel catu tegangan kemudian tegangan keluaran diukur menggunakan multimeter pada kabel tegangan keluaran ESC.

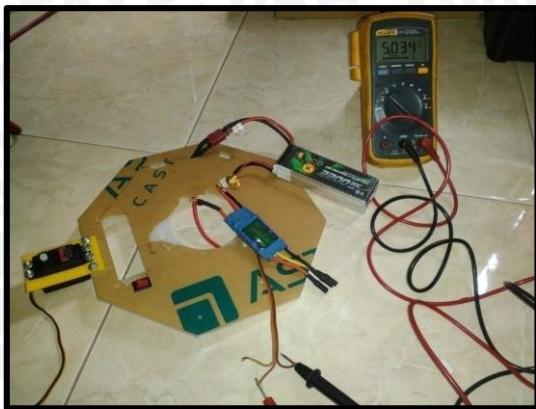
4.2.3 Hasil Pengujian

Setelah melakukan prosedur pengujian, maka didapatkan hasil untuk tegangan ESC FLYFUN 30A yang ditunjukkan dalam Tabel 4.1:

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Tegangan Regulator dan ESC FLYFUN 30A (Pengujian, 2016)

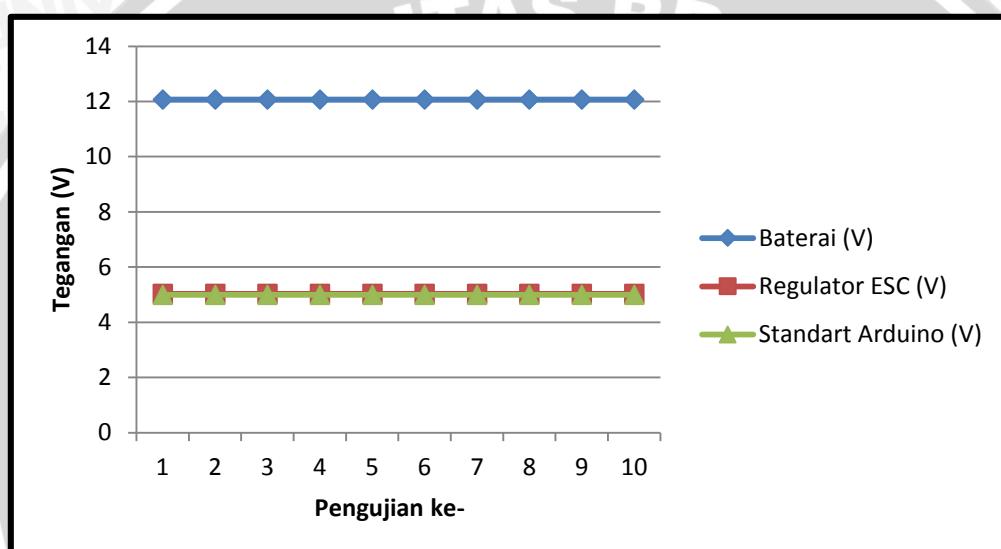
PENGUJIAN ESC 30-A				
Pengujian ke-	Baterai (V)	Regulator ESC (V)	Standart Arduino (V)	ERROR (V)
1	12,07	5,034	5	0,034
2	12,07	5,034	5	0,034
3	12,07	5,034	5	0,034
4	12,07	5,034	5	0,034
5	12,07	5,034	5	0,034
6	12,07	5,034	5	0,034
7	12,07	5,034	5	0,034
8	12,07	5,034	5	0,034
9	12,07	5,034	5	0,034
10	12,07	5,034	5	0,034
RATA-RATA		5,034	5	0,034

Pengujian untuk tegangan ESC ditunjukkan dalam Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Pengujian Tegangan ESC FLYFUN 30A (Pengujian, 2016)

Grafik pengujian ditunjukkan dalam Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik Tegangan ESC FLYFUN 30A (Pengujian, 2016)

Dari hasil pengujian tegangan ESC FLYFUN 30A mengalami *error* sebesar:

$$\text{error rata-rata} = 0,034\text{V}$$

$$\text{error}(\%) = \frac{|V_{\text{rata-rata}} - V_{MK}|}{V_{MK}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

dengan $V_{\text{rata-rata}}$ = tegangan rata-rata dari 10 kali pengujian

V_{MK} =
tegangan standar mikrokontroler

$$\text{error} = \frac{|5,034 - 5|}{5} \times 100\%$$

$$\text{error} = 0.68\%.$$

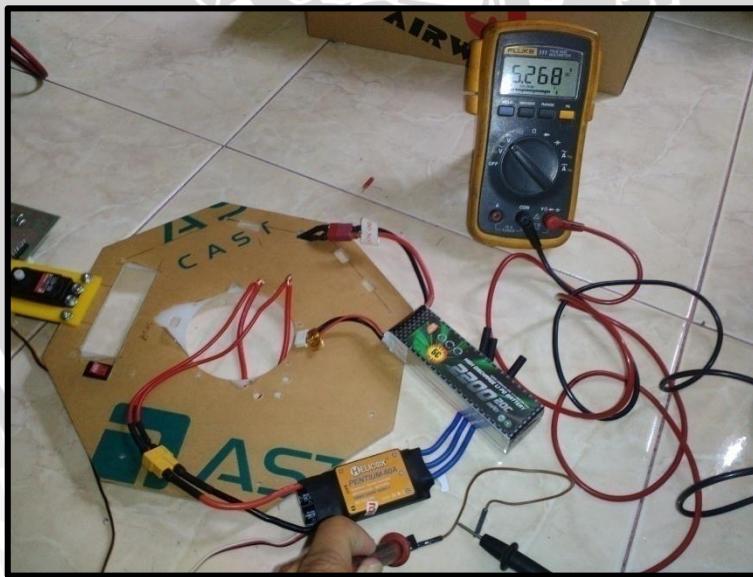
Hasil dari pengujian ESC FLYFUN 30A menunjukkan bahwa *error* tegangan rata-rata yang terjadi pada ESC sebesar 0.034V. Dan nilai % error rata-rata adalah sebesar

0,68%. Kemudian untuk hasil pengujian tegangan ESC HELICOX PENTIUM 60A ditunjukkan dalam Tabel 4.2:

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Tegangan Regulator dan ESC HELICOX PENTIUM 60A
(Pengujian, 2016)

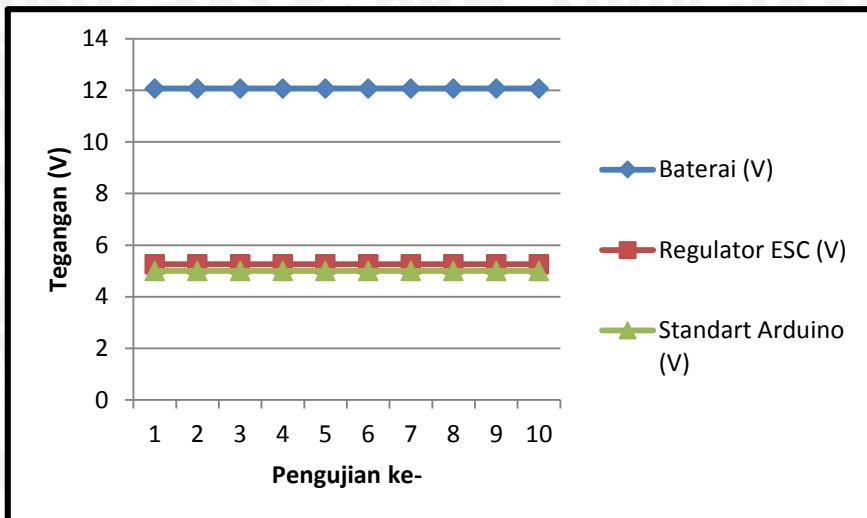
PENGUJIAN ESC 60-A				
Pengujian ke-	Baterai (V)	Regulator ESC (V)	Standart Arduino (V)	ERROR (V)
1	12,08	5,268	5	0,268
2	12,08	5,268	5	0,268
3	12,08	5,268	5	0,268
4	12,08	5,268	5	0,268
5	12,07	5,268	5	0,268
6	12,07	5,268	5	0,268
7	12,07	5,268	5	0,268
8	12,07	5,268	5	0,268
9	12,07	5,268	5	0,268
10	12,07	5,268	5	0,268
RATA-RATA		5,268	5	0,268

Pengujian untuk tegangan ESC HELICOX PENTIUM 60A ditunjukkan dalam Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Pengujian Tegangan ESC HELICOX PENTIUM 60A (Pengujian, 2016)

Grafik pengujian ditunjukkan dalam Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Grafik Tegangan ESC HELICOX PENTIUM 60A (Pengujian, 2016)

Dari hasil pengujian tegangan ESC FLYFUN 30A mengalami *error* sebesar:

$$\text{error rata-rata} = 0,268\text{V}$$

$$\text{error}(\%) = \frac{|V_{\text{rata-rata}} - V_{MK}|}{V_{MK}} \times 100\%$$

dengan $V_{\text{rata-rata}}$ = tegangan rata-rata dari 10 kali pengujian

V_{MK} =
tegangan standar mikrokontroler

$$\text{error} = \frac{|5,268 - 5|}{5} \times 100\%$$

$$\text{error} = 5,36\%.$$

Hasil dari pengujian ESC HELICOX PENTIUM 60A menunjukkan bahwa *error* tegangan rata-rata yang terjadi pada ESC sebesar 0.268V. Dan nilai % error rata-rata adalah sebesar 5.36%.

4.3 Pengujian Tegangan Keluaran Sensor Photo Reflective

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui besar tegangan yang dihasilkan sensor saat membaca garis hitam. Besar kecilnya nilai tegangan akan memberikan masukan digital 0 atau 1 pada mikrokontroler.



4.3.1 Peralatan Pengujian

1. 9 sensor *photo reflective*
2. Catu tegangan dari Arduino Mega
3. Arduino Mega
4. Baterai *Li-po* 11,1 V 2200mA
5. Digital Multimeter FLUKE 111

4.3.2 Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan dengan memberi catu tegangan pada arduino mega. Kemudian pin keluaran 5V arduino mega dihubungkan ke rangkaian paralel catu tegangan 5V pada rangkaian sensor *photo reflective*. Kemudian setiap sensor diarahkan pada garis warna hitam dan putih. Setiap kabel keluaran sensor diukur menggunakan multimeter untuk mengetahui tegangan yang dihasilkan oleh pembacaan sensor ketika membaca garis warna hitam dan putih. Data yang diperoleh kemudian dicatat dan digunakan untuk menentukan nilai logika sensor pada mikrokontroler.

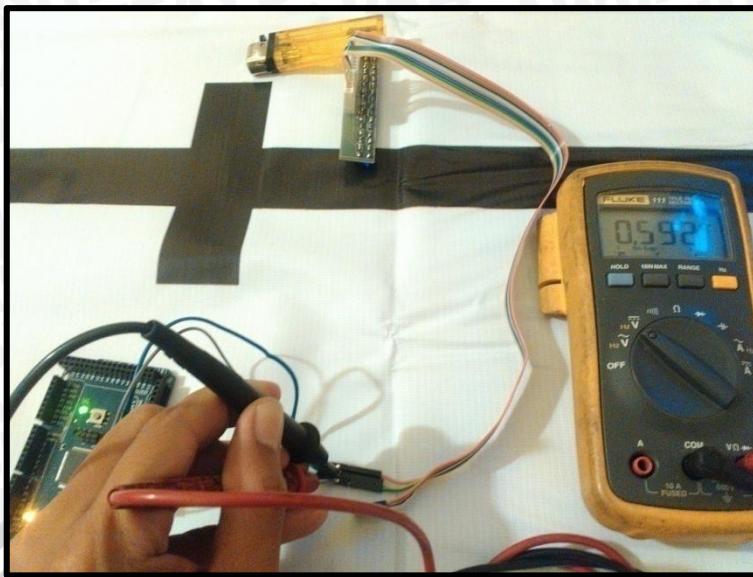
4.3.3 Hasil Pengujian

Setelah melakukan prosedur pengujian, didapatkan hasil yang ditunjukkan dalam Tabel 4.3.

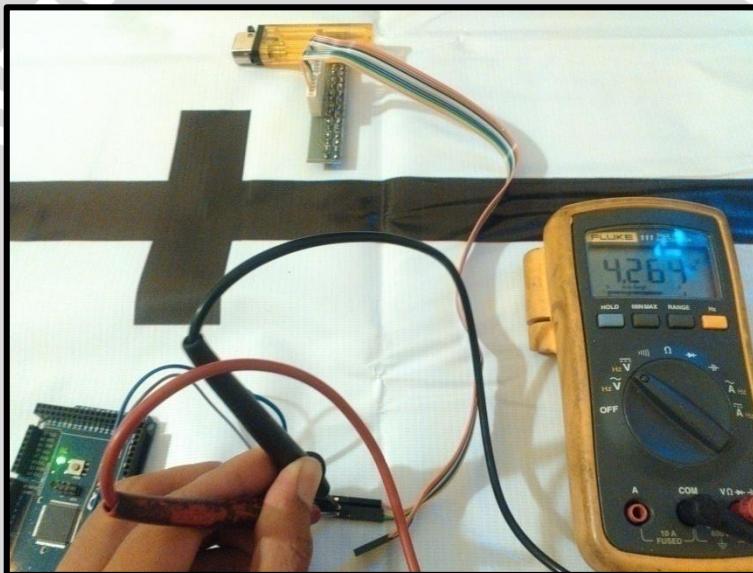
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Sensor *Photo Reflective*

PENGUJIAN TRACER				
NO.	TRACER	VCC	VOUT	
			HITAM	PUTIH
1	S1	4,5	0,592	4,264
2	S2	4,5	0,089	4,237
3	S3	4,5	0,666	4,217
4	S4	4,49	0,599	4,213
5	S5	4,5	0,558	4,182
6	S6	4,5	0,543	4,195
7	S7	4,5	0,556	4,213
8	S8	4,5	0,568	4,22
9	S9	4,5	0,491	4,199
V rata-rata			0,518	4,22

Pengujian sensor *photo reflective* pada garis warna hitam dan putih ditunjukkan dalam Gambar 4.6 dan 4.7.

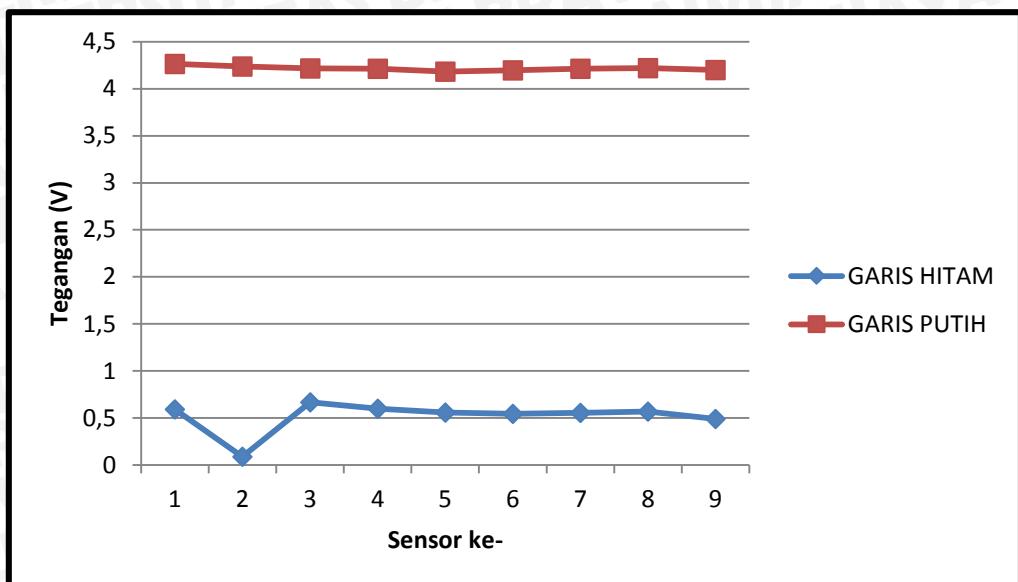


Gambar 4.6 Pengujian Sensor *Photo Reflective* Pada Garis Warna Hitam (Pengujian, 2016)



Gambar 4.7 Pengujian Sensor *Photo Reflective* Pada Garis Warna Putih (Pengujian, 2016)

Penentuan tegangan untuk logika 0 dan 1 diambil dari jarak minimum dan maksimum tegangan yang terukur. Sehingga ditentukan rentang tegangan untuk logika 0 adalah 0 – 1 V dan logika 1 adalah 3,5 – 5 V. Gambar 4.8 menunjukkan grafik rata-rata tegangan logika tiap sensor.



Gambar 4.8 Grafik Rata-rata Nilai Tegangan pada Logika Tiap Sensor (Pengujian, 2016)

4.4 Pengujian Sensor Jarak HY-SRF05

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui pembacaan sensor jarak HY-SRF05 yang pada sistem digunakan untuk mengetahui halangan / rintangan yang ada di depannya pada saat robot bergerak mengikuti garis hitam.

4.4.1 Peralatan Pengujian

1. Sensor Jarak HY-SRF05
2. Arduino Mega
3. Penggaris
4. Komputer / Laptop
5. Benda Objek

4.4.2 Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan sensor jarak HY-SRF05 pada arduino mega. Kemudian arduino mega dihubungkan dengan komputer atau laptop untuk memberi catu daya tegangan arduino mega dan untuk menampilkan hasil pembacaan sensor jarak HY-SRF05 pada serial monitor arduino.exe. Kemudian sensor jarak mulai mengukur jarak objek atau benda yang pembacaannya akan dibandingkan dengan penggaris.

4.4.3 Hasil Pengujian

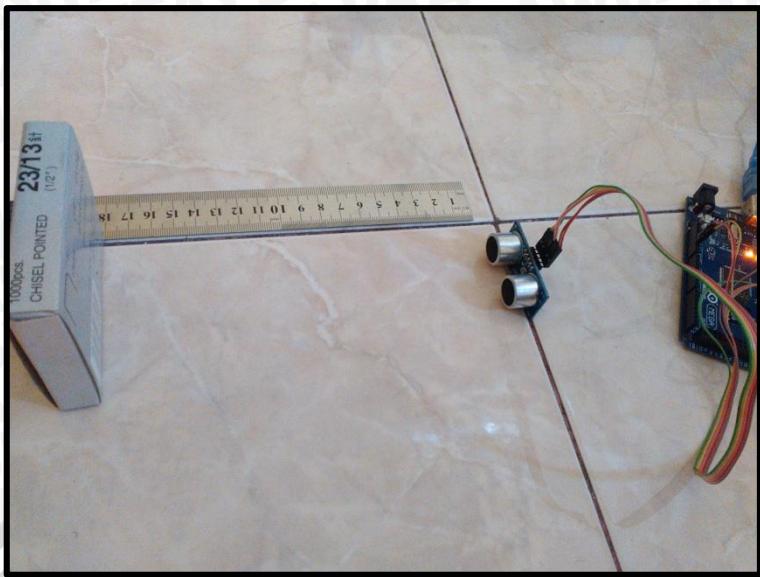
Setelah melakukan prosedur pengujian, didapatkan hasil yang ditunjukkan dalam Tabel 4.4.

PENGUJIAN HY-SRF05			
Penggaris (Cm)	HY-SRF05(Cm)	Error (Cm)	Error (%)
1	0,83	0,17	17,00
2	1,55	0,45	22,50
3	2,47	0,53	17,67
4	3,4	0,6	15,00
5	4,83	0,17	3,40
6	4,98	1,02	17,00
7	5,45	1,55	22,14
8	6,98	1,02	12,75
9	8	1	11,11
10	8,83	1,17	11,70
11	9,84	1,16	10,55
12	10,71	1,29	10,75
13	11,69	1,31	10,08
14	12,72	1,28	9,14
15	13,74	1,26	8,40
16	14,76	1,24	7,75
17	15,79	1,21	7,12
18	16,6	1,4	7,78
19	17,57	1,43	7,53
20	18,55	1,45	7,25
21	19,62	1,38	6,57
22	20,66	1,34	6,09
23	21,55	1,45	6,30
24	22,4	1,6	6,67
25	23,47	1,53	6,12
ERROR RATA-RATA		1,12	10,73
Error Max		1,53	22,5
Error Min		0,17	6,12

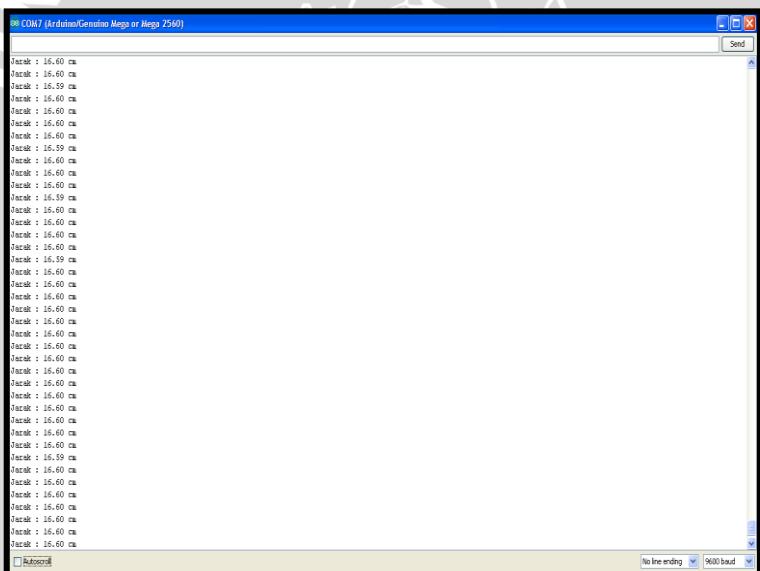
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Sensor Jarak HY-SRF05

Pengujian sensor jarak HY-SRF05 ditunjukkan dalam Gambar 4.9 dan 4.10.



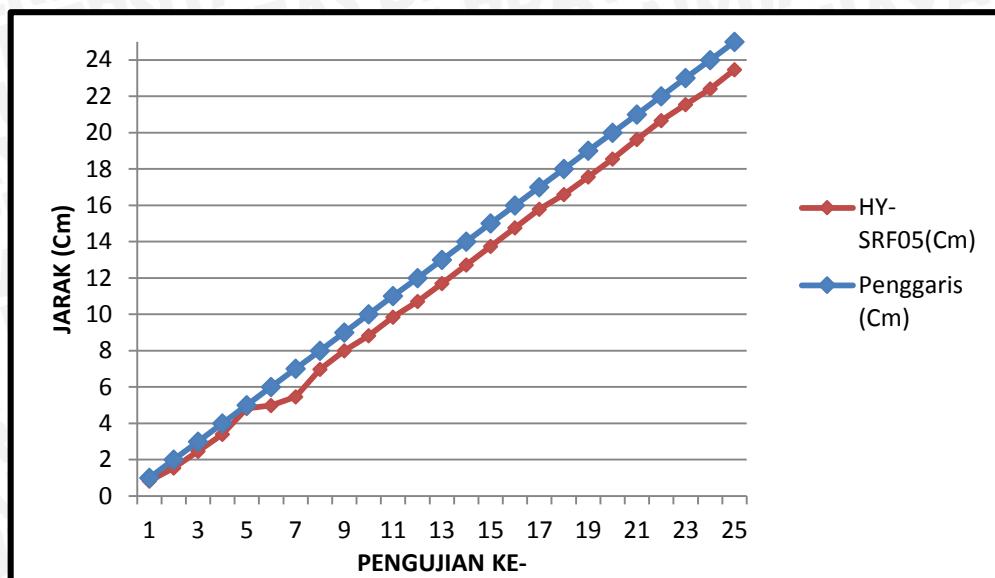


Gambar 4.9 Pengujian Sensor Jarak HY-SRF05 pada jarak 18cm (Pengujian, 2016)



Gambar 4.10 Serial Monitor Pengukuran Sensor Jarak HY-SRF05 Pada jarak 18cm
(Pengujian, 2016)

Grafik hasil pengujian sensor jarak HY-SRF05 dibandingkan dengan alat ukur penggaris ditunjukkan dalam Gambar 4.11



Gambar 4.11 Grafik Hasil Pengujian Sensor Jarak HY-SRF05 (Pengujian, 2016)

Berdasarkan hasil pengujian sensor jarak HY-SRF05 dengan pengukuran pada jarak 1cm sampai 25cm diketahui bahwa sensor mempunyai *error* rata-rata sebesar 1,12 cm dan %*error* rata-rata sebesar 10.73%. Nilai *error* maksimum adalah 1,53cm dan nilai *error* minimum sebesar 0,17cm.

4.5 Pengujian Sinyal PWM Motor Servo

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui bentuk sinyal saat pada posisi sudut-sudut motor DC Servo yang telah ditentukan untuk mengarahkan motor DC *brushless* pendorong.

4.5.1 Peralatan Pengujian

1. Baterai *Li-po* 11,1 V 2200A
2. Arduino Mega
3. Motor DC Servo HS-422
4. Busur

4.5.2 Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan baterai dengan arduino mega untuk memberi catu tegangan arduino mega. Kemudian menghubungkan pin digital arduino sebagai keluaran pada motor servo. Setelah semua terhubung, baterai di-on-kan kemudian pada serial monitor diaktifkan untuk mengetahui nilai sudut yang dihasilkan arduino mega

dan dilakukan pengukuran pada tiap-tiap sudut yang dihasilkan dari pergerakan servo dari 0^0 sampai 180^0 . Kemudian pergerakan servo dibandingkan dengan busur.

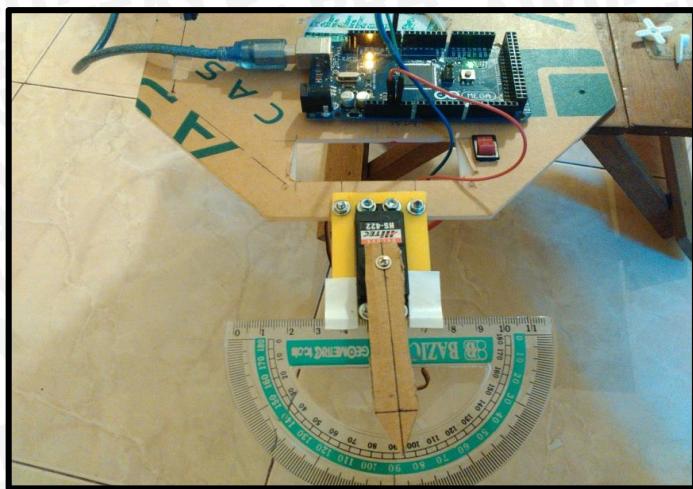
4.5.3 Hasil Pengujian

Setelah melakukan prosedur pengujian, didapatkan hasil pengujian yang ditunjukkan dalam Tabel 4.5. Parameter yang ditunjukkan adalah perbandingan pergerakan sudut servo dibandingkan dengan busur.

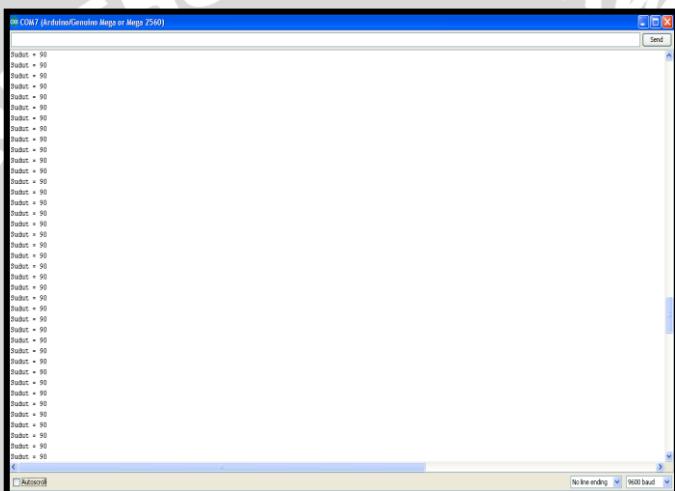
Tabel 4.5 Hasil Pengujian Sudut Motor DC Servo

PENGUJIAN SERVO			
BUSUR(Derajat)	Servo(Derajat)	ERROR(Derajat)	ERROR(%)
0	0	0	0,00
10	10	0	0,00
20	20	0	0,00
30	30	0	0,00
40	40	0	0,00
50	49	1	2,00
60	58	2	3,33
70	69	1	1,43
80	79	1	1,25
90	89	1	1,11
100	99	1	1,00
110	108	2	1,82
120	118	2	1,67
130	128	2	1,54
140	140	0	0,00
150	148	2	1,33
160	157	3	1,88
170	167	3	1,76
180	178	2	1,11
ERROR RATA-RATA		1,28	1,18

Pengujian motor DC Servo ditunjukkan dalam Gambar 4.12 dan 4.13

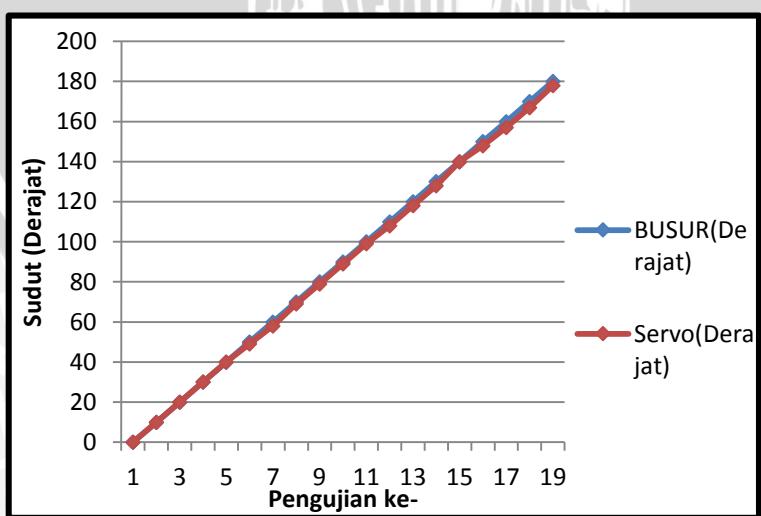


Gambar 4.12 Pengujian Sudut Motor Servo pada Sudut 90° (Pengujian, 2016)



Gambar 4.13 Serial Monitor Arduino Mega pada Sudut 90° (Pengujian, 2016)

Grafik pengujian Motor DC Servo terhadap busur ditunjukkan dalam Gambar 4.14



Gambar 4.14 Grafik Pengujian Motor DC Servo Terhadap Busur (pengujian, 2016)

Berdasarkan hasil pengujian motor DC servo didapatkan nilai error rata-rata sebesar $1,28^0$ dan %error rata-rata dari 10 kali pengujian adalah sebesar 1,18%.

4.6 Pengujian Hand Tuning PID

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan parameter Kp, Ki dan Kd dari respon posisi robot saat mengikuti garis hitam dengan jalur yang telah ditentukan.

4.6.1 Peralatan Pengujian

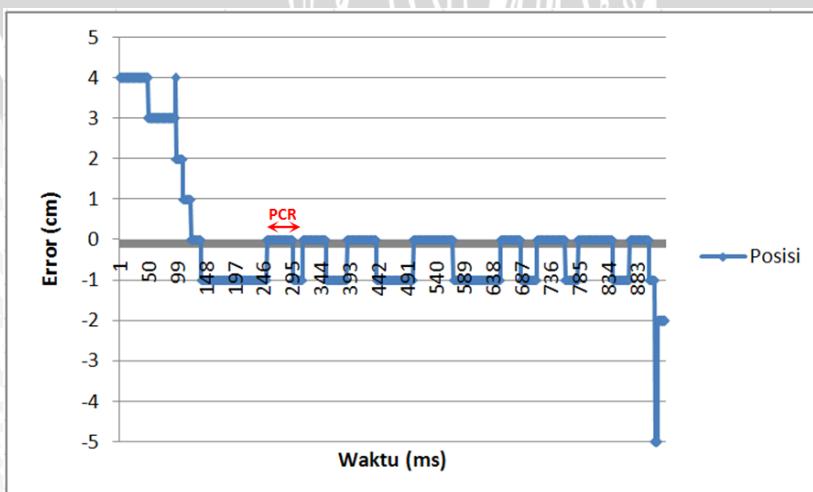
1. Robot *hovercraft*
2. Lintasan bergaris

4.6.2 Prosedur Pengujian

Pengujian ini dilakukan dengan cara memberikan nilai Kp, Ki dan Kd secara *hand tuning* kemudian mengaktifkan robot yang telah diprogram untuk mengikuti garis hitam. Respon robot diamati untuk mengetahui simpangan terjauh yang terjadi pada saat robot mengikuti garis hitam. Apabila respon robot tidak seperti yang diharapkan, maka nilai Kp, Ki dan Kd dirubah sampai ditemukan respon robot yang diinginkan saat mengikuti garis hitam.

4.6.3 Pembahasan Pengujian PID

Pada pengujian PID dilakukan dengan cara memberi nilai $K_p=0,5$, $K_i=0$ dan $K_d=0$. Kemudian nilai K_p dinaikkan sampai terjadi osilasi yang mempunyai periode stabil. Pada pengujian PID dengan nilai $K_p=1,5$, $K_i=0$, $K_d=0$ didapatkan nilai periode yang tetap dengan nilai 690ms. Hal ini ditunjukkan dalam Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Respon Posisi Robot Hovercraft Pada Pengujian $K_p=1,5$, $K_i=0$, $K_d=0$

Berdasarkan hasil pengujian didapatkan nilai $P_{cr} = 0.828$ pada saat diberikan nilai $K_{cr} = 1.5$. Kemudian nilai K_{cr} dan P_{cr} dimasukkan dalam tabel dasar aturan PID *Ziegler-Nichols*. Maka diperoleh nilai K_p , K_i dan K_d sebagai berikut:

- $K_p = 0,6 \times K_{cr}$
= $0,6 \times 1.5$
= 0,9
- $K_i = 0,5 \times P_{cr}$
= $0,5 \times 0,828$
= 0,414
- $K_d = 0,125 \times P_{cr}$
= $0,125 \times 0,828$
= 0,1035

Setelah diperoleh nilai K_p , K_i dan K_d berdasarkan tabel aturan dasar PID *Ziegler-Nichols*, maka dilakukan pengujian pada robot dengan menggunakan parameter yang sudah didapatkan. Apabila respon plan kurang sesuai dengan yang diharapkan maka nilai K_p , K_i dan K_d dituning kembali sampai didapatkan respon plan seperti yang diharapkan.

4.6.4 Hasil Pengujian

4.6.4.1 Pengujian $K_p=0,5$, $K_i=0$, $K_d=0$

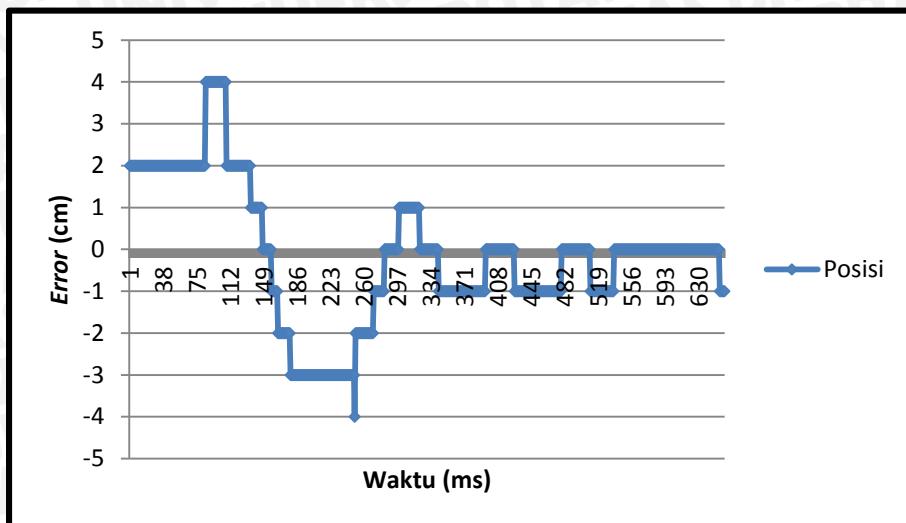
Hasil pengujian dengan parameter $K_p=0,5$, $K_i=0$ dan $K_d=0$ selama 20 kali *time sampling* ditunjukkan dalam Tabel 4.6. Untuk data lengkap bisa dilihat di lampiran.



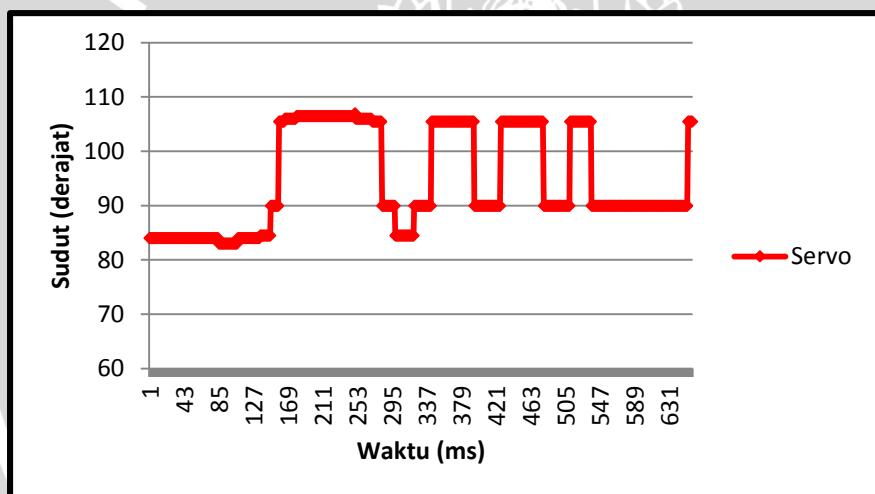
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Parameter Kp=0,5, Ki=0, Kd=0

No.	Posisi	Servo
1	2	84
2	2	84
3	2	84
4	2	84
5	2	84
6	2	84
7	2	84
8	2	84
9	2	84
10	2	84
11	2	84
12	2	84
13	2	84
14	2	84
15	2	84
16	2	84
17	2	84
18	2	84
19	2	84
20	2	84

Hasil pengujian respon posisi robot dengan nilai $K_p=0,5$, $K_i=0$, $K_d=0$ ditunjukkan dalam Gambar 4.16 dan 4.17



Gambar 4.16 Respon Posisi Robot *Hovercraft* Terhadap Waktu



Gambar 4.17 Respon Posisi Sudut Servo Robot *Hovercraft* Terhadap Waktu

Berdasarkan hasil pengujian respon posisi robot dengan nilai $K_p=0,5$, $K_i=0$, $K_d=0$ menunjukkan bahwa posisi robot masih belum dapat *steady* di *setpoint*. Respon robot masih memiliki *overshoot* yang cukup tinggi sehingga diperlukan perubahan parameter K_p , K_i dan K_d .

4.6.4.2 Pengujian $K_p=1$, $K_i=0$, $K_d=0$

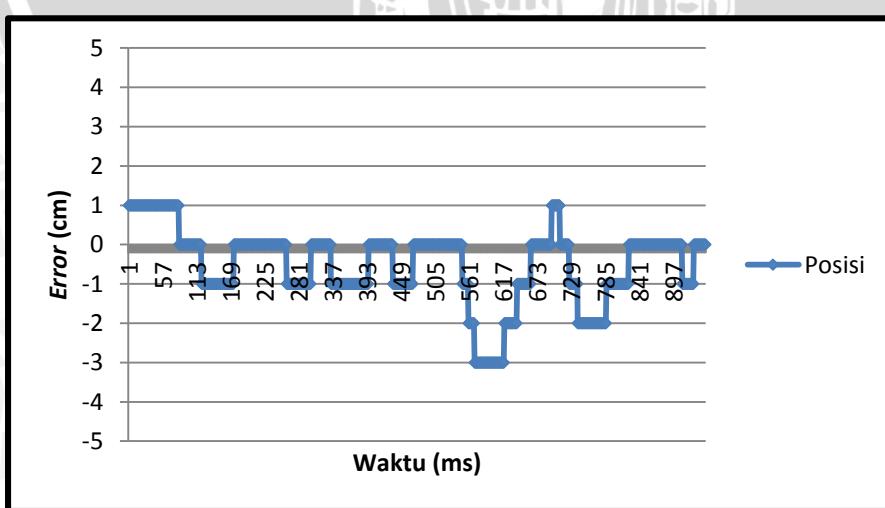
Hasil pengujian dengan parameter $K_p=1$, $K_i=0$ dan $K_d=0$ selama 20 kali *time sampling* ditunjukkan dalam Tabel 4.7. Untuk data lengkap bisa dilihat di lampiran.

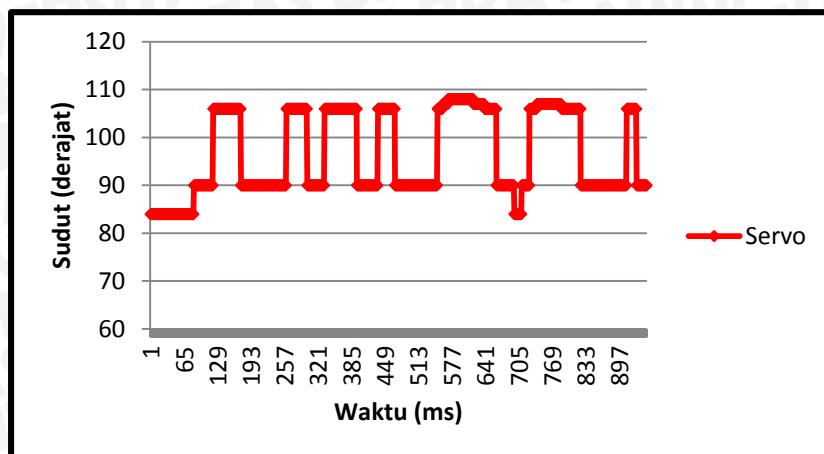


Tabel 4.7 Hasil Pengujian Parameter Kp=1, Ki=0, Kd=0

No.	Posisi	Servo
1	1	84
2	1	84
3	1	84
4	1	84
5	1	84
6	1	84
7	1	84
8	1	84
9	1	84
10	1	84
11	1	84
12	1	84
13	1	84
14	1	84
15	1	84
16	1	84
17	1	84
18	1	84
19	1	84
20	1	84

Hasil pengujian respon posisi robot dengan nilai Kp=1, Ki=0, Kd=0 ditunjukkan dalam Gambar 4.18 dan 4.19.

**Gambar 4.18** Respon Posisi Robot *Hovercraft* Terhadap Waktu



Gambar 4.19 Respon Posisi Sudut Servo Robot Hovercraft Terhadap Waktu

Berdasarkan hasil pengujian respon posisi robot dengan nilai $K_p=1$, $K_i=0$, $K_d=0$ menunjukkan bahwa posisi robot sudah *steady* di *setpoint*, akan tetapi masih terjadi osilasi. Sehingga diperlukan perubahan parameter K_p , K_i dan K_d .

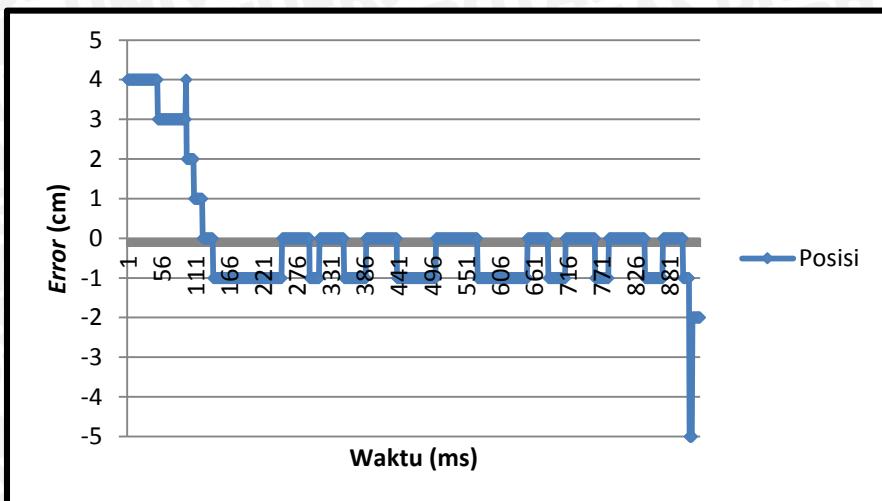
4.6.4.3 Pengujian $K_p=1.5$, $K_i=0$, $K_d=0$

Hasil pengujian dengan parameter $K_p=1.5$, $K_i=0$ dan $K_d=0$ selama 20 kali *time sampling* ditunjukkan dalam Tabel 4.8. Untuk data lengkap bisa dilihat di lampiran.

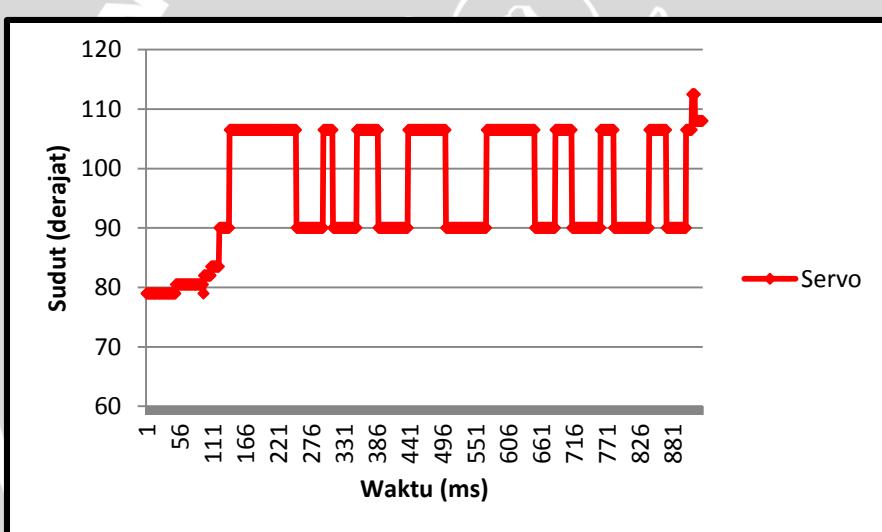
Tabel 4.8 Hasil Pengujian Parameter $K_p=1.5$, $K_i=0$, $K_d=0$

No.	Posisi	Servo
1	4	79
2	4	79
3	4	79
4	4	79
5	4	79
6	4	79
7	4	79
8	4	79
9	4	79
10	4	79
11	4	79
12	4	79
13	4	79
14	4	79
15	4	79
16	4	79
17	4	79
18	4	79
19	4	79
20	4	79

Hasil pengujian respon posisi robot dengan nilai $K_p=1,5$, $K_i=0$, $K_d=0$ ditunjukkan dalam Gambar 4.20 dan 4.21.



Gambar 4.20 Respon Posisi Robot *Hovercraft* Terhadap Waktu



Gambar 4.21 Respon Posisi Sudut Servo Robot *Hovercraft* Terhadap Waktu

Berdasarkan hasil pengujian respon posisi robot dengan nilai $K_p=1,5$, $K_i=0$, $K_d=0$ menunjukkan bahwa posisi robot dapat *steady* di *setpoint*, namun masih memiliki osilasi. Sehingga diperlukan perubahan parameter K_p , K_i dan K_d .

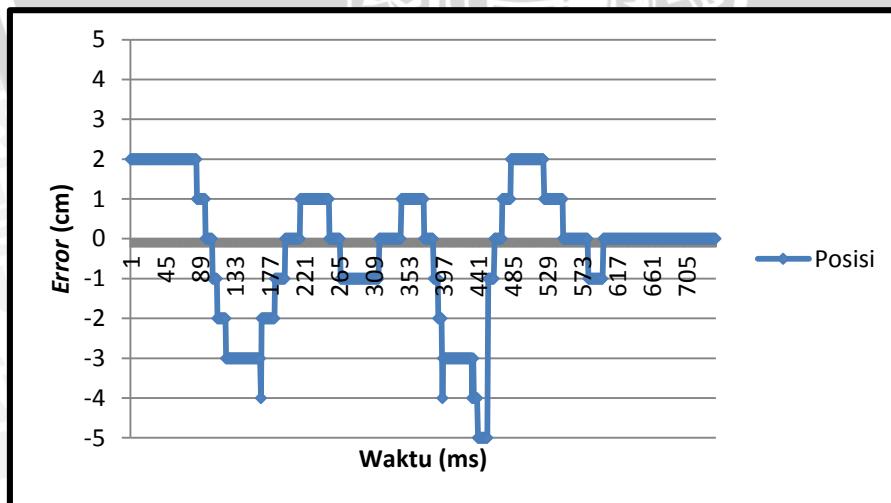
4.6.4.4 Pengujian $K_p=0,9$, $K_i=0,414$, $K_d=0,1035$

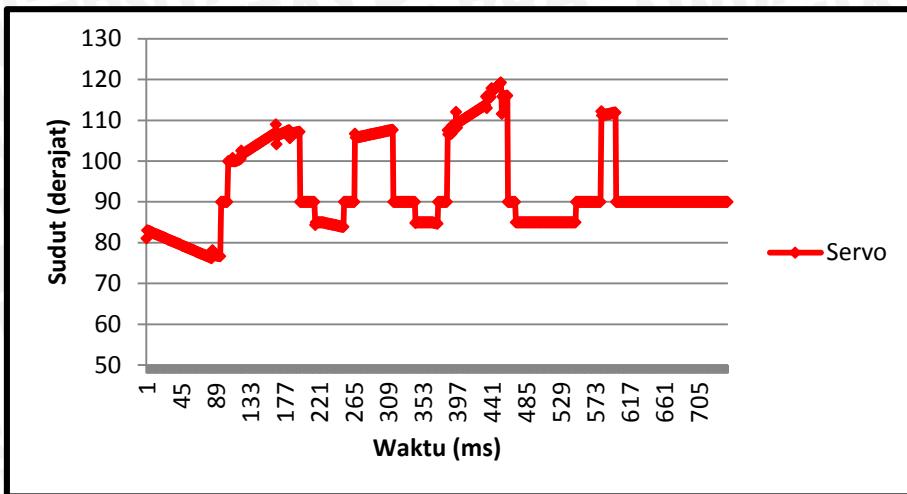
Hasil pengujian dengan parameter $K_p=0,9$, $K_i=0,414$ dan $K_d=0,1035$ selama 20 kali *time sampling* ditunjukkan dalam Tabel 4.9. Untuk data lengkap bisa dilihat di lampiran.

Tabel 4.9 Hasil Pengujian Parameter Kp=0,9, Ki=0,414, Kd=0,1035

No.	Posisi	Servo
1	2	81,05
2	2	83,03
3	2	82,95
4	2	82,87
5	2	82,79
6	2	82,7
7	2	82,62
8	2	82,54
9	2	82,45
10	2	82,37
11	2	82,29
12	2	82,21
13	2	82,12
14	2	82,04
15	2	81,96
16	2	81,88
17	2	81,79
18	2	81,71
19	2	81,63
20	2	81,54

Hasil pengujian respon posisi robot dengan nilai Kp=0,9, Ki=0,414, Kd=0,1035 ditunjukkan dalam Gambar 4.22 dan 4.23.

**Gambar 4.22** Respon Posisi Robot Hovercraft Terhadap Waktu



Gambar 4.23 Respon Posisi Sudut Servo Robot Hovercraft Terhadap Waktu

Berdasarkan hasil pengujian respon posisi robot dengan nilai $K_p=0,9$, $K_i=0,414$ $K_d=0,1035$ menunjukkan bahwa posisi robot masih belum dapat *steady* di *setpoint* dan masih mempunyai osilasi. Sehingga diperlukan perubahan parameter K_p , K_i dan K_d .

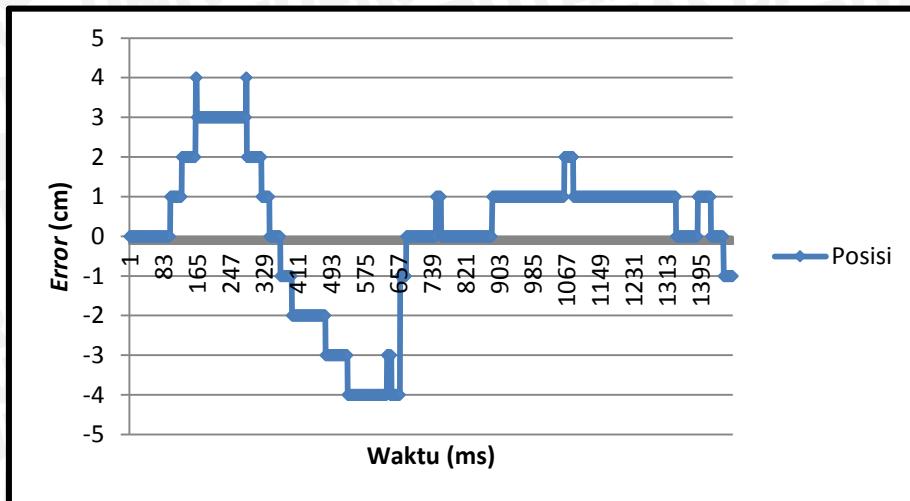
4.6.4.5 Pengujian $K_p=0,6$, $K_i=0,414$, $K_d=0,1235$

Hasil pengujian dengan parameter $K_p=0,6$, $K_i=0,414$ dan $K_d=0,1235$ selama 20 kali *time sampling* ditunjukkan dalam Tabel 4.10. Untuk data lengkap bisa dilihat di lampiran.

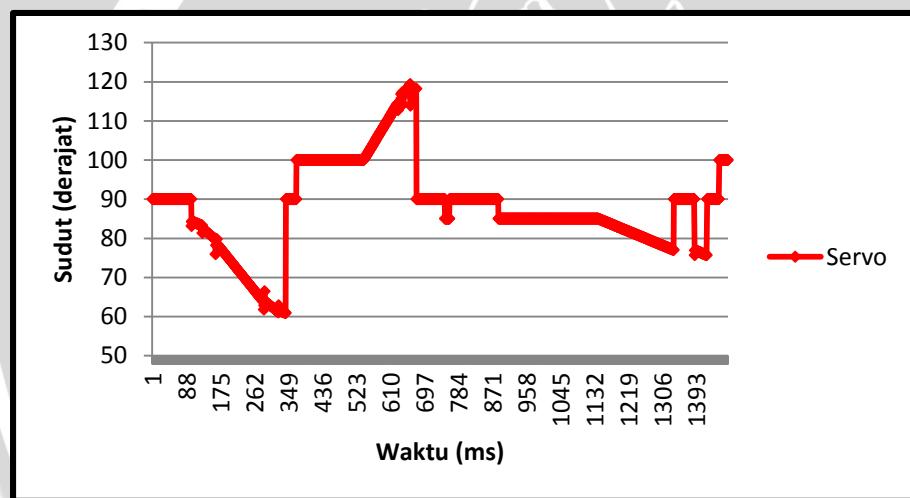
Tabel 4.10 Hasil Pengujian Parameter $K_p=0,6$, $K_i=0,414$, $K_d=0,1235$

No.	Posisi	Servo
1	0	90
2	0	90
3	0	90
4	0	90
5	0	90
6	0	90
7	0	90
8	0	90
9	0	90
10	0	90
11	0	90
12	0	90
13	0	90
14	0	90
15	0	90
16	0	90
17	0	90
18	0	90
19	0	90
20	0	90

Hasil pengujian respon posisi robot dengan nilai $K_p=0,6$, $K_i=0,414$, $K_d=0,1235$ ditunjukkan dalam Gambar 4.24 dan 4.25.



Gambar 4.24 Respon Posisi Robot Hovercraft Terhadap Waktu



Gambar 4.25 Respon Posisi Sudut Servo Robot Hovercraft Terhadap Waktu

Berdasarkan hasil pengujian respon posisi robot dengan nilai $K_p=0,6$, $K_i=0,414$, $K_d=0,1235$ menunjukkan bahwa posisi robot sudah dapat *steady* di *setpoint* dan masih memiliki *overshoot*. Sehingga diperlukan perubahan parameter K_p , K_i dan K_d .

4.6.4.6 Pengujian $K_p=0,65$, $K_i=0,414$, $K_d=0,1335$

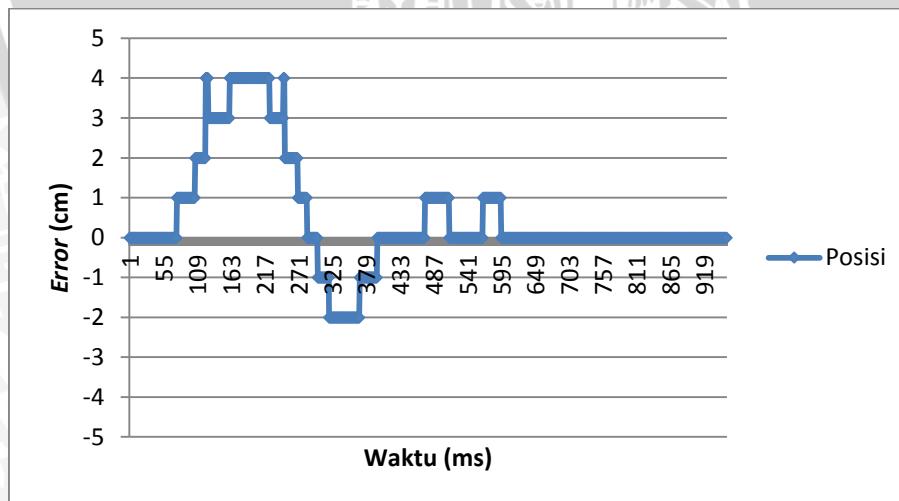
Hasil pengujian dengan parameter $K_p=0,65$, $K_i=0,414$ dan $K_d=0,1335$ selama 20 kali *time sampling* ditunjukkan dalam Tabel 4.11. Untuk data lengkap bisa dilihat di lampiran.

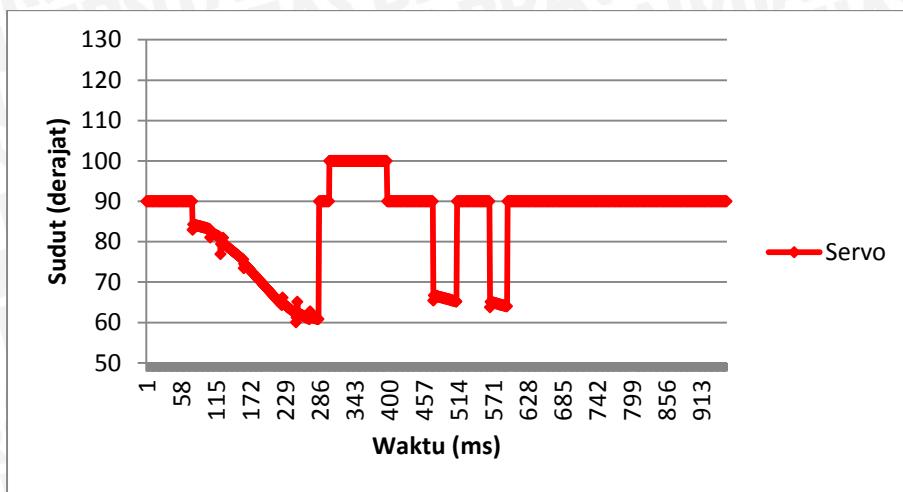


Tabel 4.11 Hasil Pengujian Parameter Kp=0,65, Ki=0,414, Kd=0,1335

No.	Posisi	Servo
1	0	90
2	0	90
3	0	90
4	0	90
5	0	90
6	0	90
7	0	90
8	0	90
9	0	90
10	0	90
11	0	90
12	0	90
13	0	90
14	0	90
15	0	90
16	0	90
17	0	90
18	0	90
19	0	90
20	0	90

Hasil pengujian respon posisi robot dengan nilai Kp=0,65, Ki=0,414, Kd=0,1335 ditunjukkan dalam Gambar 4.26 dan 4.27.

**Gambar 4.26 Respon Posisi Robot Hovercraft Terhadap Waktu**



Gambar 4.27 Respon Posisi Sudut Servo Robot Hovercraft Terhadap Waktu

Berdasarkan hasil pengujian respon posisi robot dengan nilai $K_p=0,65$, $K_i=0,414$ $K_d=0,1335$ menunjukkan bahwa posisi robot dapat *steady* di *setpoint* dan masih memiliki *overshoot*. Sehingga diperlukan perubahan parameter K_p , K_i dan K_d .

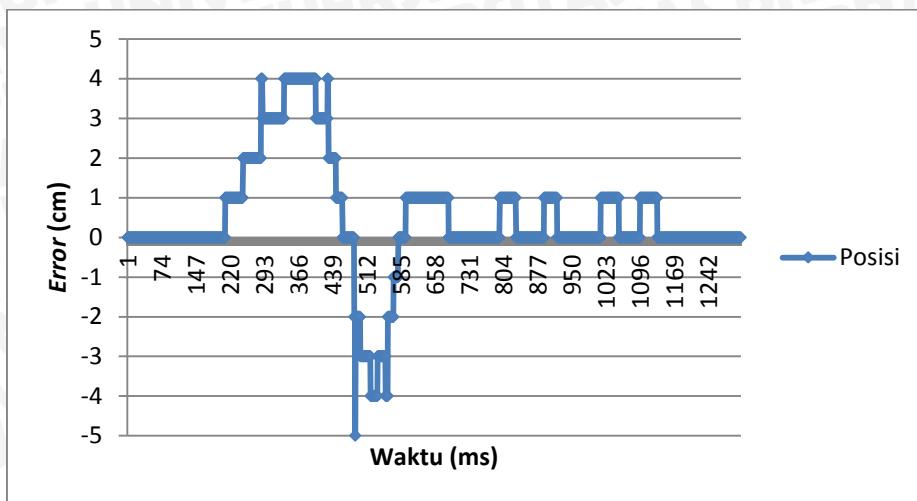
4.6.4.7 Pengujian $K_p=0,6$, $K_i=0,414$, $K_d=0,1235$

Hasil pengujian dengan parameter $K_p=0,6$, $K_i=0,414$ dan $K_d=0,1235$ selama 20 kali *time sampling* ditunjukkan dalam Tabel 4.12. Untuk data lengkap bisa dilihat di lampiran.

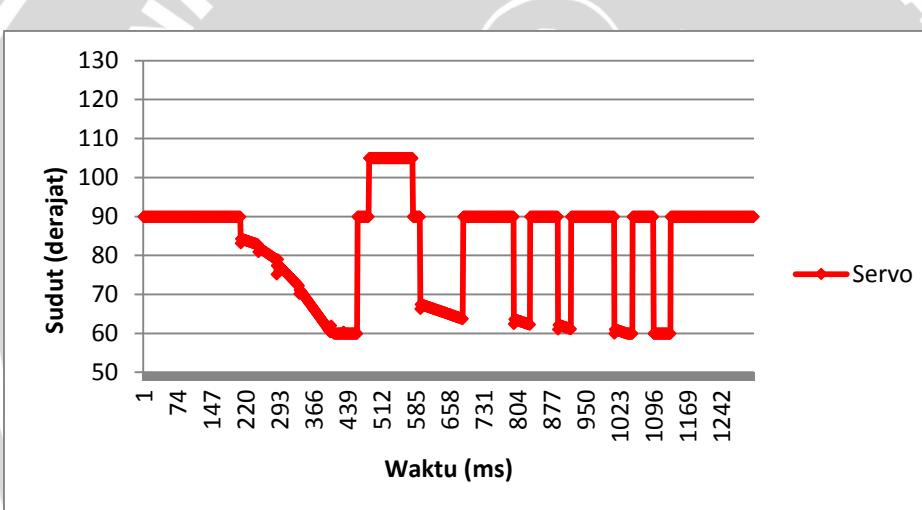
Tabel 4.12 Hasil Pengujian Parameter $K_p=0,6$, $K_i=0,414$, $K_d=0,1235$

No.	Posisi	Servo
1	0	90
2	0	90
3	0	90
4	0	90
5	0	90
6	0	90
7	0	90
8	0	90
9	0	90
10	0	90
11	0	90
12	0	90
13	0	90
14	0	90
15	0	90
16	0	90
17	0	90
18	0	90
19	0	90
20	0	90

Hasil pengujian respon posisi robot dengan nilai $K_p=0,6$, $K_i=0,414$, $K_d=0,1235$ ditunjukkan dalam Gambar 4.28 dan 4.29.



Gambar 4.28 Respon Posisi Robot *Hovercraft* Terhadap Waktu



Gambar 4.29 Respon Posisi Sudut Servo Robot *Hovercraft* Terhadap Waktu

Berdasarkan hasil pengujian respon posisi robot dengan nilai $K_p=0,6$, $K_i=0,414$, $K_d=0,1235$ menunjukkan bahwa posisi robot dapat *steady* di *setpoint* dan masih memiliki *overshoot*. Sehingga diperlukan perubahan parameter K_p , K_i dan K_d .

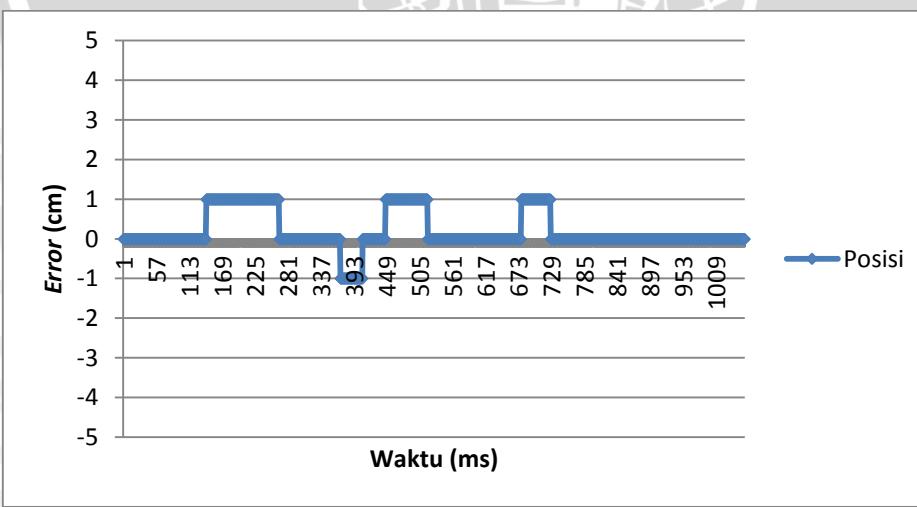
4.6.4.8 Pengujian Respon Posisi Robot Dengan $K_p=0,6$, $K_i=0,4$, $K_d=0,1235$

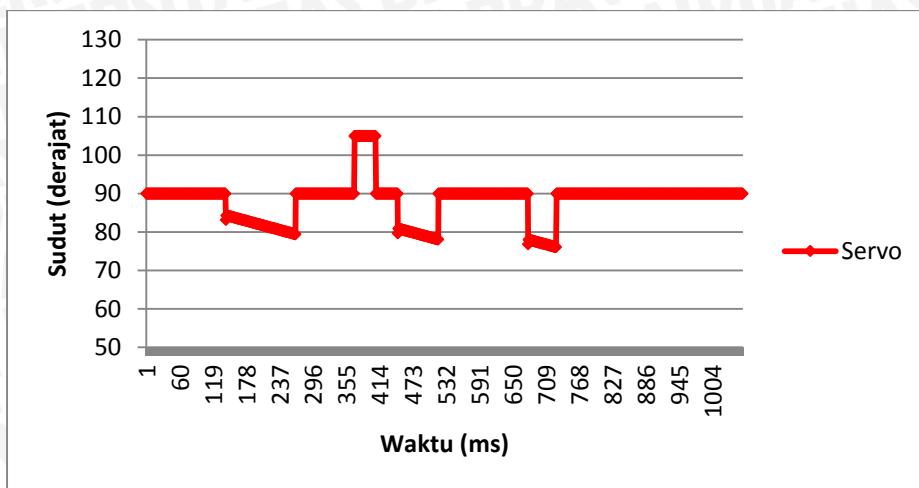
Hasil pengujian dengan parameter $K_p=0,6$, $K_i=0,4$ dan $K_d=0,1235$ selama 20 kali *time sampling* ditunjukkan dalam Tabel 4.13. Untuk data lengkap bisa dilihat di lampiran.

Tabel 4.13 Hasil Pengujian Parameter Kp=0,6, Ki=0,4, Kd=0,1235

No.	Posisi	Servo	Error (Cm)	Error (%)
1	1	83	1	20
2	1	84	1	20
3	1	84	1	20
4	1	84	1	20
5	1	84	1	20
6	1	84	1	20
7	1	84	1	20
8	1	84	1	20
9	1	84	1	20
10	1	84	1	20
11	1	84	1	20
12	1	84	1	20
13	1	84	1	20
14	1	84	1	20
15	1	84	1	20
16	1	84	1	20
17	1	84	1	20
18	1	84	1	20
19	1	84	1	20
20	1	84	1	20

Hasil pengujian respon posisi robot dengan nilai Kp=0,6, Ki=0,4, Kd=0,1235 ditunjukkan dalam Gambar 4.30 dan 4.31.

**Gambar 4.30** Respon Posisi Robot Hovercraft Terhadap Waktu



Gambar 4.31 Respon Posisi Sudut Servo Robot Hovercraft Terhadap Waktu

Berdasarkan hasil pengujian respon posisi robot dengan nilai $K_p=0,6$, $K_i=0,4$ $K_d=0,1235$ menunjukkan bahwa posisi robot dapat *steady* di *setpoint* dan memiliki *overshoot* 5cm.

4.7 Pengujian Sistem Keseluruhan

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui respon posisi robot saat mengikuti garis hitam dan juga untuk mengetahui respon robot ketika melewati halangan di depan nya.

4.7.1 Peralatan Pengujian

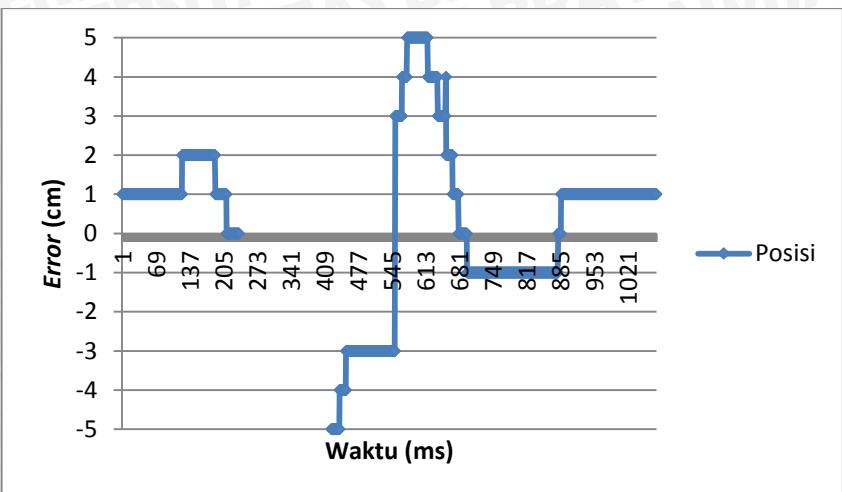
1. Robot *hovercraft*
2. Lintasan bergaris
3. Benda halangan

4.7.2 Prosedur Pengujian

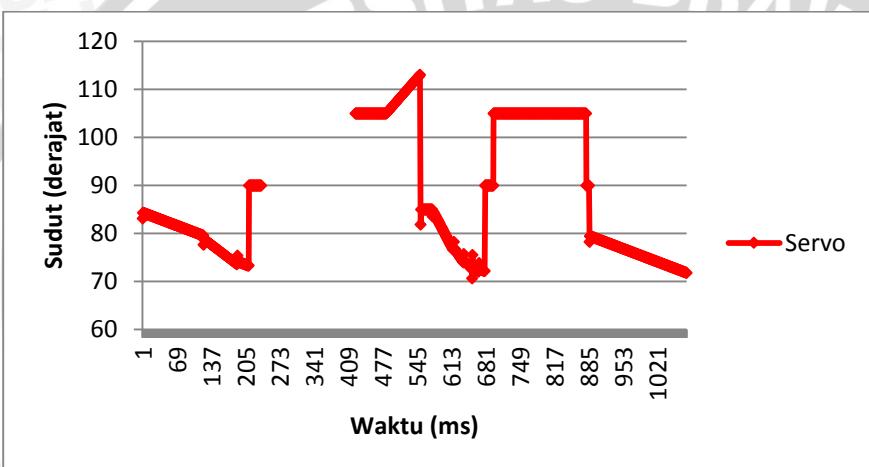
Pengujian ini dilakukan dengan cara meletakkan robot pada lintasan garis hitam, dimana nilai K_p , K_i dan K_d yang digunakan adalah $K_p = 0,6$, $K_i = 0,4$, $K_d = 0,1235$. Pada lintasan garis hitam juga diberi halangan suatu benda, dimana robot juga harus melewati halangan yang ada di depannya dan kemudian kembali ke jalur garis hitam.

4.7.3 Hasil Pengujian

Hasil pengujian sistem keseluruhan ditunjukkan dalam Gambar 4.32 dan 4.33.



Gambar 4.32 Respon Posisi Robot *Hovercraft* Terhadap Waktu



Gambar 4.33 Respon Posisi Sudut Servo Robot *Hovercraft* Terhadap Waktu

Hasil pengujian sistem secara keseluruhan seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4.32 dan 4.33 menunjukkan bahwa robot sudah berfungsi sesuai dengan yang diharapkan. Hal ini dapat dilihat dari respon robot yang sudah mampu mengikuti garis hitam dengan menggunakan metode PID dan dapat melewati halangan yang ada di depannya yang kemudian dapat kembali lagi mengikuti garis hitam setelah melewati halangan.

Pada pengujian sistem keseluruhan yang ditunjukkan dalam gambar 4.32 menunjukkan bahwa robot *start* awal dengan mempunyai *error minimum* 20% (1cm) dan *error maksimum* 100% (5cm). Kemudian robot berjalan mengikuti garis hitam sampai terdapat halangan di depan robot pada jarak 20cm. Ketika di depan robot terdapat halangan, maka robot tidak lagi membaca garis hitam sebagai setpoint. Robot akan melewati halangan yang ada di depannya dengan acuan sensor jarak yang ada pada bagian depan dan samping. Kemudian setelah robot selesai melewati halangan, robot akan membaca garis hitam kembali.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Pada penelitian ini telah dirancang dan dibuat robot *hovercraft line follower* dalam bentuk segi delapan dengan menggunakan metode kontrol PID dan dengan dimensi panjang 26 cm, lebar 26 cm, dan tinggi 20 cm. Robot *hovercraft line follower* menggunakan 9 buah sensor *photo reflective* sebagai penanda posisi robot yang dijadikan sebagai *setpoint* robot. Robot menggunakan motor servo sebagai aktuator untuk mengatur posisi robot pada garis hitam sesuai dengan pembacaan sensor *photo reflective* yang dijadikan sebagai setpoint.
2. Berdasarkan hasil pengujian parameter PID dengan nilai $K_p = 0,6$, $K_i = 0,4$, dan $K_d = 0,1235$ dapat diaplikasikan pada sistem. Sistem robot *hovercraft line follower* memiliki respon yang mampu mempertahankan posisi setimbang saat mengikuti garis dengan mengatur sudut servo. Dan robot mampu menghindari halangan yang ada di depannya yang kemudian dapat kembali mengikuti garis setelahnya. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa robot *start* awal dengan mempunyai *error* minimum 20% (1cm) dan *error* maksimum ketika melewati rintangan 100% (5cm).

5.2 Saran

Dalam perancangan dan pembuatan alat ini masih terdapat beberapa kelemahan. Untuk memperbaiki kinerja robot *hovercraft line follower* dan pengembangan lebih lanjut disarankan:

1. Penyempurnaan desain mekanik robot dengan memperhitungkan sisi aerodinamis robot. Sehingga harapannya robot memiliki gerak yang lebih stabil dan dinamis.
2. Mengganti sensor jarak dengan sensor yang memiliki kemampuan dan akurasi yang lebih tinggi seperti kamera. Sehingga robot dapat mengenali beberapa halangan yang ada disekitarnya baik halangan yang tinggi ataupun halangan yang rendah.



DAFTAR PUSTAKA

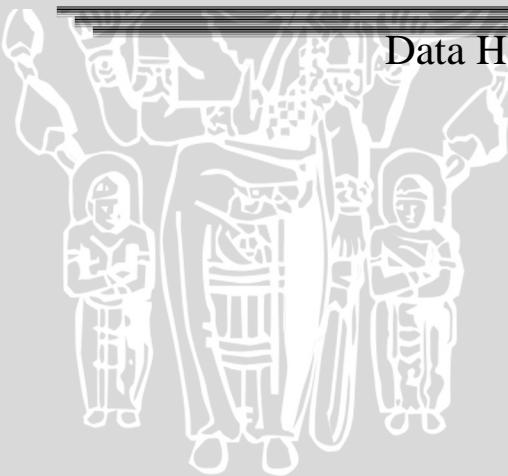
- Aprilyan, Adeck. 2013. Sistem Pengendalian Kecepatan Motor Pendorong Robot Hovercraft Line Follower Menggunakan Kontroler PID Berbasis Mikrokontroler ATmega 8535. Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang. Malang : Indonesia.
- Amstrom, K. J., & Hagglund, Tore. 1995. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning Instrument*. Society of America: Research Triangle Park.
- Arif, Muhamad Faishol. 2015. *Sistem Kontrol Kecepatan Motor DC D-6759 Berbasis Arduino Mega*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Gopal, M. 1998. *Digital Control Engineering*. New Delhi: Wiley Eastern Limited.
- Ogata, Katsuhiko. 1997. *Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan)*. Jakarta, Erlangga.
- Dwi Y., H. 2010. Perencanaan Sistem Thruster dan Lifter Tipe Terpisah untuk Hovercraft Militer dengan Payload 15 Ton. Proceedings Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sistem Perkapalan – Fakultas Teknologi Kelautan ITS. Surabaya: Indonesia.
- VISHAY. 2011. Reflective Optical Sensor with Transistor Output. www.vishay.com.
- Fajar P., E. 2011. Rancang Bangun Pengendali Jarak Jauh Arah dan Laju Kendaraan Hover dengan 2 Tenaga Dorong. Proceedings Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektronika – Politeknik Elektronika Negeri Surabaya. Surabaya: Indonesia.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LAMPIRAN I

Data Hasil Pengujian



Hasil Pengujian Parameter Kp=0,5, Ki=0, Kd=0

No.	Posisi	Servo
1	2	84
2	2	84
3	2	84
4	2	84
5	2	84
6	2	84
7	2	84
8	2	84
9	2	84
10	2	84
11	2	84
12	2	84
13	2	84
14	2	84
15	2	84
16	2	84
17	2	84
18	2	84
19	2	84
20	2	84
21	2	84
22	2	84
23	2	84
24	2	84
25	2	84
26	2	84
27	2	84
28	2	84
29	2	84
30	2	84
31	2	84
32	2	84
33	2	84
34	2	84
35	2	84
36	2	84
37	2	84
38	2	84
39	2	84
40	2	84

No.	Posisi	Servo
41	2	84
42	2	84
43	2	84
44	2	84
45	2	84
46	2	84
47	2	84
48	2	84
49	2	84
50	2	84
51	2	84
52	2	84
53	2	84
54	2	84
55	2	84
56	2	84
57	2	84
58	2	84
59	2	84
60	2	84
61	2	84
62	2	84
63	2	84
64	2	84
65	2	84
66	2	84
67	2	84
68	2	84
69	2	84
70	2	84
71	2	84
72	2	84
73	2	84
74	2	84
75	2	84
76	2	84
77	2	84
78	2	84
79	2	84
80	2	84

No.	Posisi	Servo
81	2	84
82	2	84
83	2	84
84	2	84
85	4	83
86	4	83
87	4	83
88	4	83
89	4	83
90	4	83
91	4	83
92	4	83
93	4	83
94	4	83
95	4	83
96	4	83
97	4	83
98	4	83
99	4	83
100	4	83
101	4	83
102	4	83
103	4	83
104	4	83
105	4	83
106	4	83
107	4	83
108	2	84
109	2	84
110	2	84
111	2	84
112	2	84
113	2	84
114	2	84
115	2	84
116	2	84
117	2	84
118	2	84
119	2	84
120	2	84

No.	Posisi	Servo
121	2	84
122	2	84
123	2	84
124	2	84
125	2	84
126	2	84
127	2	84
128	2	84
129	2	84
130	2	84
131	2	84
132	2	84
133	2	84
134	2	84
135	1	84,5
136	1	84,5
137	1	84,5
138	1	84,5
139	1	84,5
140	1	84,5
141	1	84,5
142	1	84,5
143	1	84,5
144	1	84,5
145	1	84,5
146	1	84,5
147	1	84,5
148	0	90
149	0	90
150	0	90
151	0	90
152	0	90
153	0	90
154	0	90
155	0	90
156	0	90
157	0	90
158	-1	105,5
159	-1	105,5
160	-1	105,5

No.	Posisi	Servo
161	-1	105,5
162	-1	105,5
163	-1	105,5
164	-1	105,5
165	-2	106
166	-2	106
167	-2	106
168	-2	106
169	-2	106
170	-2	106
171	-2	106
172	-2	106
173	-2	106
174	-2	106
175	-2	106
176	-2	106
177	-2	106
178	-2	106
179	-3	106,5
180	-3	106,5
181	-3	106,5
182	-3	106,5
183	-3	106,5
184	-3	106,5
185	-3	106,5
186	-3	106,5
187	-3	106,5
188	-3	106,5
189	-3	106,5
190	-3	106,5
191	-3	106,5
192	-3	106,5
193	-3	106,5
194	-3	106,5
195	-3	106,5
196	-3	106,5
197	-3	106,5
198	-3	106,5
199	-3	106,5
200	-3	106,5

Hasil Pengujian Parameter Kp=1, Ki=0, Kd=0

No.	Posisi	Servo
1	1	84
2	1	84
3	1	84
4	1	84
5	1	84
6	1	84
7	1	84
8	1	84
9	1	84
10	1	84
11	1	84
12	1	84
13	1	84
14	1	84
15	1	84
16	1	84
17	1	84
18	1	84
19	1	84
20	1	84
21	1	84
22	1	84
23	1	84
24	1	84
25	1	84
26	1	84
27	1	84
28	1	84
29	1	84
30	1	84
31	1	84
32	1	84
33	1	84
34	1	84
35	1	84
36	1	84
37	1	84
38	1	84
39	1	84
40	1	84

No.	Posisi	Servo
41	1	84
42	1	84
43	1	84
44	1	84
45	1	84
46	1	84
47	1	84
48	1	84
49	1	84
50	1	84
51	1	84
52	1	84
53	1	84
54	1	84
55	1	84
56	1	84
57	1	84
58	1	84
59	1	84
60	1	84
61	1	84
62	1	84
63	1	84
64	1	84
65	1	84
66	1	84
67	1	84
68	1	84
69	1	84
70	1	84
71	1	84
72	1	84
73	1	84
74	1	84
75	1	84
76	1	84
77	1	84
78	1	84
79	1	84
80	1	84

No.	Posisi	Servo
81	1	84
82	1	84
83	1	84
84	0	90
85	0	90
86	0	90
87	0	90
88	0	90
89	0	90
90	0	90
91	0	90
92	0	90
93	0	90
94	0	90
95	0	90
96	0	90
97	0	90
98	0	90
99	0	90
100	0	90
101	0	90
102	0	90
103	0	90
104	0	90
105	0	90
106	0	90
107	0	90
108	0	90
109	0	90
110	0	90
111	0	90
112	0	90
113	0	90
114	0	90
115	0	90
116	0	90
117	0	90
118	0	90
119	0	90
120	0	90

No.	Posisi	Servo
121	-1	106
122	-1	106
123	-1	106
124	-1	106
125	-1	106
126	-1	106
127	-1	106
128	-1	106
129	-1	106
130	-1	106
131	-1	106
132	-1	106
133	-1	106
134	-1	106
135	-1	106
136	-1	106
137	-1	106
138	-1	106
139	-1	106
140	-1	106
141	-1	106
142	-1	106
143	-1	106
144	-1	106
145	-1	106
146	-1	106
147	-1	106
148	-1	106
149	-1	106
150	-1	106
151	-1	106
152	-1	106
153	-1	106
154	-1	106
155	-1	106
156	-1	106
157	-1	106
158	-1	106
159	-1	106
160	-1	106

No.	Posisi	Servo
161	-1	106
162	-1	106
163	-1	106
164	-1	106
165	-1	106
166	-1	106
167	-1	106
168	-1	106
169	-1	106
170	-1	106
171	-1	106
172	-1	106
173	-1	106
174	0	90
175	0	90
176	0	90
177	0	90
178	0	90
179	0	90
180	0	90
181	0	90
182	0	90
183	0	90
184	0	90
185	0	90
186	0	90
187	0	90
188	0	90
189	0	90
190	0	90
191	0	90
192	0	90
193	0	90
194	0	90
195	0	90
196	0	90
197	0	90
198	0	90
199	0	90
200	0	90

No.	Posisi	Servo
201	0	90
202	0	90
203	0	90
204	0	90
205	0	90
206	0	90
207	0	90
208	0	90
209	0	90
210	0	90
211	0	90
212	0	90
213	0	90
214	0	90
215	0	90
216	0	90
217	0	90
218	0	90
219	0	90
220	0	90
221	0	90
222	0	90
223	0	90
224	0	90
225	0	90
226	0	90
227	0	90
228	0	90
229	0	90
230	0	90
231	0	90
232	0	90
233	0	90
234	0	90
235	0	90
236	0	90
237	0	90
238	0	90
239	0	90
240	0	90

Hasil Pengujian Parameter Kp=1,5, Ki=0, Kd=0

No.	Posisi	Servo
1	4	79
2	4	79
3	4	79
4	4	79
5	4	79
6	4	79
7	4	79
8	4	79
9	4	79
10	4	79
11	4	79
12	4	79
13	4	79
14	4	79
15	4	79
16	4	79
17	4	79
18	4	79
19	4	79
20	4	79
21	4	79
22	4	79
23	4	79
24	4	79
25	4	79
26	4	79
27	4	79
28	4	79
29	4	79
30	4	79
31	4	79
32	4	79
33	4	79
34	4	79
35	4	79
36	4	79
37	4	79
38	4	79
39	4	79
40	4	79

No.	Posisi	Servo
41	4	79
42	4	79
43	4	79
44	4	79
45	4	79
46	4	79
47	4	79
48	4	79
49	4	79
50	3	80,5
51	3	80,5
52	3	80,5
53	3	80,5
54	3	80,5
55	3	80,5
56	3	80,5
57	3	80,5
58	3	80,5
59	3	80,5
60	3	80,5
61	3	80,5
62	3	80,5
63	3	80,5
64	3	80,5
65	3	80,5
66	3	80,5
67	3	80,5
68	3	80,5
69	3	80,5
70	3	80,5
71	3	80,5
72	3	80,5
73	3	80,5
74	3	80,5
75	3	80,5
76	3	80,5
77	3	80,5
78	3	80,5
79	3	80,5
80	3	80,5

No.	Posisi	Servo
81	3	80,5
82	3	80,5
83	3	80,5
84	3	80,5
85	3	80,5
86	3	80,5
87	3	80,5
88	3	80,5
89	3	80,5
90	3	80,5
91	3	80,5
92	3	80,5
93	3	80,5
94	3	80,5
95	3	80,5
96	4	79
97	2	82
98	2	82
99	2	82
100	2	82
101	2	82
102	2	82
103	2	82
104	2	82
105	2	82
106	2	82
107	2	82
108	2	82
109	1	83,5
110	1	83,5
111	1	83,5
112	1	83,5
113	1	83,5
114	1	83,5
115	1	83,5
116	1	83,5
117	1	83,5
118	1	83,5
119	1	83,5
120	1	83,5

No.	Posisi	Servo
121	1	83,5
122	1	83,5
123	0	90
124	0	90
125	0	90
126	0	90
127	0	90
128	0	90
129	0	90
130	0	90
131	0	90
132	0	90
133	0	90
134	0	90
135	0	90
136	0	90
137	0	90
138	0	90
139	0	90
140	-1	106,5
141	-1	106,5
142	-1	106,5
143	-1	106,5
144	-1	106,5
145	-1	106,5
146	-1	106,5
147	-1	106,5
148	-1	106,5
149	-1	106,5
150	-1	106,5
151	-1	106,5
152	-1	106,5
153	-1	106,5
154	-1	106,5
155	-1	106,5
156	-1	106,5
157	-1	106,5
158	-1	106,5
159	-1	106,5
160	-1	106,5

No.	Posisi	Servo
161	-1	106,5
162	-1	106,5
163	-1	106,5
164	-1	106,5
165	-1	106,5
166	-1	106,5
167	-1	106,5
168	-1	106,5
169	-1	106,5
170	-1	106,5
171	-1	106,5
172	-1	106,5
173	-1	106,5
174	-1	106,5
175	-1	106,5
176	-1	106,5
177	-1	106,5
178	-1	106,5
179	-1	106,5
180	-1	106,5
181	-1	106,5
182	-1	106,5
183	-1	106,5
184	-1	106,5
185	-1	106,5
186	-1	106,5
187	-1	106,5
188	-1	106,5
189	-1	106,5
190	-1	106,5
191	-1	106,5
192	-1	106,5
193	-1	106,5
194	-1	106,5
195	-1	106,5
196	-1	106,5
197	-1	106,5
198	-1	106,5
199	-1	106,5
200	-1	106,5

No.	Posisi	Servo
201	-1	106,5
202	-1	106,5
203	-1	106,5
204	-1	106,5
205	-1	106,5
206	-1	106,5
207	-1	106,5
208	-1	106,5
209	-1	106,5
210	-1	106,5
211	-1	106,5
212	-1	106,5
213	-1	106,5
214	-1	106,5
215	-1	106,5
216	-1	106,5
217	-1	106,5
218	-1	106,5
219	-1	106,5
220	-1	106,5
221	-1	106,5
222	-1	106,5
223	-1	106,5
224	-1	106,5
225	-1	106,5
226	-1	106,5
227	-1	106,5
228	-1	106,5
229	-1	106,5
230	-1	106,5
231	-1	106,5
232	-1	106,5
233	-1	106,5
234	-1	106,5
235	-1	106,5
236	-1	106,5
237	-1	106,5
238	-1	106,5
239	-1	106,5
240	-1	106,5

Hasil Pengujian Parameter Kp=0,9, Ki=0,414, Kd=0,1035

No.	Posisi	Servo
1	2	81,05
2	2	83,03
3	2	82,95
4	2	82,87
5	2	82,79
6	2	82,7
7	2	82,62
8	2	82,54
9	2	82,45
10	2	82,37
11	2	82,29
12	2	82,21
13	2	82,12
14	2	82,04
15	2	81,96
16	2	81,88
17	2	81,79
18	2	81,71
19	2	81,63
20	2	81,54
21	2	81,46
22	2	81,38
23	2	81,3
24	2	81,21
25	2	81,13
26	2	81,05
27	2	80,96
28	2	80,88
29	2	80,8
30	2	80,72
31	2	80,63
32	2	80,55
33	2	80,47
34	2	80,38
35	2	80,3
36	2	80,22
37	2	80,14
38	2	80,05
39	2	79,97
40	2	79,89
41	2	79,81
42	2	79,72
43	2	79,64
44	2	79,56
45	2	79,47
46	2	79,39
47	2	79,31
48	2	79,23
49	2	79,14
50	2	79,06
51	2	78,98
52	2	78,89
53	2	78,81
54	2	78,73
55	2	78,65
56	2	78,56
57	2	78,48
58	2	78,4
59	2	78,31
60	2	78,23
61	2	78,15
62	2	78,07
63	2	77,98
64	2	77,9
65	2	77,82
66	2	77,74
67	2	77,65
68	2	77,57
69	2	77,49
70	2	77,4
71	2	77,32
72	2	77,24
73	2	77,16
74	2	77,07
75	2	76,99
76	2	76,91
77	2	76,82
78	2	76,74
79	2	76,66
80	2	76,58
81	2	76,49
82	2	76,41
83	2	76,33
84	2	76,24
85	1	78,14
86	1	77,06
87	1	77,02
88	1	76,98
89	1	76,94
90	1	76,9
91	1	76,86
92	1	76,81
93	1	76,77
94	1	76,73
95	1	76,69
96	0	90
97	0	90
98	0	90
99	0	90
100	0	90
101	0	90
102	0	90
103	0	90
104	0	90
105	-1	100
106	-1	100
107	-1	100
108	-1	100
109	-1	100
110	-1	100
111	-2	100,76
112	-2	100
113	-2	100
114	-2	100
115	-2	100,05
116	-2	100,13
117	-2	100,22
118	-2	100,3
119	-2	100,38
120	-2	100,47
121	-2	100,55
122	-3	102,61
123	-3	101,7
124	-3	101,82
125	-3	101,95
126	-3	102,07
127	-3	102,19
128	-3	102,32
129	-3	102,44
130	-3	102,57
131	-3	102,69
132	-3	102,81
133	-3	102,94
134	-3	103,06
135	-3	103,19
136	-3	103,31
137	-3	103,44
138	-3	103,56
139	-3	103,68
140	-3	103,81
141	-3	103,93
142	-3	104,06
143	-3	104,18
144	-3	104,31
145	-3	104,43
146	-3	104,55
147	-3	104,68
148	-3	104,8
149	-3	104,93
150	-3	105,05
151	-3	105,17
152	-3	105,3
153	-3	105,42
154	-3	105,55
155	-3	105,67
156	-3	105,8
157	-3	105,92
158	-3	106,04
159	-3	106,17
160	-3	106,29
161	-3	106,42
162	-3	106,54
163	-3	106,67
164	-3	106,79
165	-3	106,91
166	-4	109,01
167	-2	104,19
168	-2	106,34
169	-2	106,43
170	-2	106,51
171	-2	106,59
172	-2	106,68
173	-2	106,76
174	-2	106,84
175	-2	106,92
176	-2	107,01
177	-2	107,09
178	-2	107,17
179	-2	107,26
180	-2	107,34
181	-2	107,42
182	-2	107,5
183	-2	107,59
184	-1	105,69
185	-1	106,77
186	-1	106,81
187	-1	106,85
188	-1	106,89
189	-1	106,94
190	-1	106,98
191	-1	107,02
192	-1	107,06
193	-1	107,1
194	-1	107,14
195	-1	107,18
196	-1	107,22
197	0	90
198	0	90
199	0	90
200	0	90
201	0	90
202	0	90
203	0	90
204	0	90
205	0	90
206	0	90
207	0	90
208	0	90
209	0	90
210	0	90
211	0	90
212	0	90
213	0	90
214	0	90
215	0	90
216	1	84,35
217	1	85
218	1	85
219	1	85
220	1	85
221	1	85
222	1	85
223	1	85
224	1	85
225	1	85
226	1	84,97
227	1	84,93
228	1	84,89
229	1	84,85
230	1	84,8
231	1	84,76
232	1	84,72
233	1	84,68
234	1	84,64
235	1	84,6
236	1	84,56
237	1	84,51
238	1	84,47
239	1	84,43
240	1	84,39

Hasil Pengujian Parameter Kp=0.6, Ki=0.414, Kd=0.1235

No.	Posisi	Servo																		
1	0	90	41	0	90	81	0	90	121	1	83,53	161	2	79,91	201	3	74,26	202	3	74,13
2	0	90	42	0	90	82	0	90	122	1	83,49	162	2	79,83	203	3	74,01	204	3	73,89
3	0	90	43	0	90	83	0	90	123	1	83,45	163	4	75,99	205	3	73,76	206	3	73,64
4	0	90	44	0	90	84	0	90	124	1	83,41	164	4	78,29	207	3	73,51	208	3	73,39
5	0	90	45	0	90	85	0	90	125	1	83,36	165	4	78,13	209	3	73,26	210	3	73,14
6	0	90	46	0	90	86	0	90	126	1	83,32	166	3	79,84	211	3	73,02	212	3	72,89
7	0	90	47	0	90	87	0	90	127	1	83,28	167	3	78,48	213	3	72,77	214	3	72,64
8	0	90	48	0	90	88	0	90	128	1	83,24	168	3	78,36	215	3	72,52	216	3	72,39
9	0	90	49	0	90	89	0	90	129	2	81,32	169	3	78,23	217	3	72,27	218	3	72,15
10	0	90	50	0	90	90	0	90	130	2	82,48	170	3	78,11	219	3	72,02	220	3	71,9
11	0	90	51	0	90	91	0	90	131	2	82,39	171	3	77,98	221	3	71,77	222	3	71,65
12	0	90	52	0	90	92	0	90	132	2	82,31	172	3	77,86	223	3	71,53	224	3	71,4
13	0	90	53	0	90	93	0	90	133	2	82,23	173	3	77,74	225	3	71,28	226	3	71,15
14	0	90	54	0	90	94	0	90	134	2	82,14	174	3	77,61	227	3	71,03	228	3	70,9
15	0	90	55	0	90	95	0	90	135	2	82,06	175	3	77,49	229	3	70,78	230	3	70,66
16	0	90	56	0	90	96	0	90	136	2	81,98	176	3	77,36	231	3	70,53	232	3	70,41
17	0	90	57	0	90	97	0	90	137	2	81,9	177	3	77,24	233	3	70,28	234	3	70,16
18	0	90	58	0	90	98	0	90	138	2	81,81	178	3	77,11	235	3	70,03	236	3	69,91
19	0	90	59	0	90	99	0	90	139	2	81,73	179	3	76,99	237	3	69,79	238	3	69,66
20	0	90	60	0	90	100	0	90	140	2	81,65	180	3	76,87	239	3	69,54	240	3	69,41
21	0	90	61	0	90	101	1	83,12	141	2	81,56	181	3	76,74						
22	0	90	62	0	90	102	1	84,32	142	2	81,48	182	3	76,62						
23	0	90	63	0	90	103	1	84,28	143	2	81,4	183	3	76,49						
24	0	90	64	0	90	104	1	84,23	144	2	81,32	184	3	76,37						
25	0	90	65	0	90	105	1	84,19	145	2	81,23	185	3	76,24						
26	0	90	66	0	90	106	1	84,15	146	2	81,15	186	3	76,12						
27	0	90	67	0	90	107	1	84,11	147	2	81,07	187	3	76						
28	0	90	68	0	90	108	1	84,07	148	2	80,98	188	3	75,87						
29	0	90	69	0	90	109	1	84,03	149	2	80,9	189	3	75,75						
30	0	90	70	0	90	110	1	83,99	150	2	80,82	190	3	75,62						
31	0	90	71	0	90	111	1	83,94	151	2	80,74	191	3	75,5						
32	0	90	72	0	90	112	1	83,9	152	2	80,65	192	3	75,38						
33	0	90	73	0	90	113	1	83,86	153	2	80,57	193	3	75,25						
34	0	90	74	0	90	114	1	83,82	154	2	80,49	194	3	75,13						
35	0	90	75	0	90	115	1	83,78	155	2	80,41	195	3	75						
36	0	90	76	0	90	116	1	83,74	156	2	80,32	196	3	74,88						
37	0	90	77	0	90	117	1	83,7	157	2	80,24	197	3	74,75						
38	0	90	78	0	90	118	1	83,65	158	2	80,16	198	3	74,63						
39	0	90	79	0	90	119	1	83,61	159	2	80,07	199	3	74,51						
40	0	90	80	0	90	120	1	83,57	160	2	79,99	200	3	74,38						

No.	Posisi	Servo
1	0	90
2	0	90
3	0	90
4	0	90
5	0	90
6	0	90
7	0	90
8	0	90
9	0	90
10	0	90
11	0	90
12	0	90
13	0	90
14	0	90
15	0	90
16	0	90
17	0	90
18	0	90
19	0	90
20	0	90
21	0	90
22	0	90
23	0	90
24	0	90
25	0	90
26	0	90
27	0	90
28	0	90
29	0	90
30	0	90
31	0	90
32	0	90
33	0	90
34	0	90
35	0	90
36	0	90
37	0	90
38	0	90
39	0	90
40	0	90

No.	Posisi	Servo
41	0	90
42	0	90
43	0	90
44	0	90
45	0	90
46	0	90
47	0	90
48	0	90
49	0	90
50	0	90
51	0	90
52	0	90
53	0	90
54	0	90
55	0	90
56	0	90
57	0	90
58	0	90
59	0	90
60	0	90
61	0	90
62	0	90
63	0	90
64	0	90
65	0	90
66	0	90
67	0	90
68	0	90
69	0	90
70	0	90
71	0	90
72	0	90
73	0	90
74	0	90
75	0	90
76	0	90
77	1	82,97
78	1	84,27
79	1	84,23
80	1	84,18

No.	Posisi	Servo
81	1	84,14
82	1	84,1
83	1	84,06
84	1	84,02
85	1	83,98
86	1	83,94
87	1	83,89
88	1	83,85
89	1	83,81
90	1	83,77
91	1	83,73
92	1	83,69
93	1	83,65
94	1	83,6
95	1	83,56
96	1	83,52
97	1	83,48
98	1	83,44
99	1	83,4
100	1	83,36
101	1	83,31
102	1	83,27
103	1	83,23
104	1	83,19
105	1	83,15
106	2	81,08
107	2	82,33
108	2	82,25
109	2	82,17
110	2	82,09
111	2	82
112	2	81,92
113	2	81,84
114	2	81,75
115	2	81,67
116	2	81,59
117	2	81,51
118	2	81,42
119	2	81,34
120	2	81,26

No.	Posisi	Servo
121	2	81,17
122	2	81,09
123	4	76,96
124	4	79,46
125	4	79,29
126	4	79,13
127	3	80,99
128	3	79,53
129	3	79,41
130	3	79,28
131	3	79,16
132	3	79,03
133	3	78,91
134	3	78,79
135	3	78,66
136	3	78,54
137	3	78,41
138	3	78,29
139	3	78,16
140	3	78,04
141	3	77,92
142	3	77,79
143	3	77,67
144	3	77,54
145	3	77,42
146	3	77,3
147	3	77,17
148	3	77,05
149	3	76,92
150	3	76,8
151	3	76,67
152	3	76,55
153	3	76,43
154	3	76,3
155	3	76,18
156	3	76,05
157	3	75,93
158	3	75,8
159	3	75,68
160	3	75,56

No.	Posisi	Servo
161	4	73,41
162	4	74,58
163	4	74,41
164	4	74,24
165	4	74,08
166	4	73,91
167	4	73,75
168	4	73,58
169	4	73,42
170	4	73,25
171	4	73,09
172	4	72,92
173	4	72,75
174	4	72,59
175	4	72,42
176	4	72,26
177	4	72,09
178	4	71,93
179	4	71,76
180	4	71,59
181	4	71,43
182	4	71,26
183	4	71,1
184	4	70,93
185	4	70,77
186	4	70,6
187	4	70,44
188	4	70,27
189	4	70,1
190	4	69,94
191	4	69,77
192	4	69,61
193	4	69,44
194	4	69,28
195	4	69,11
196	4	68,95
197	4	68,78
198	4	68,61
199	4	68,45
200	4	68,28

No.	Posisi	Servo
201	4	68,12
202	4	67,95
203	4	67,79
204	4	67,62
205	4	67,45
206	4	67,29
207	4	67,12
208	4	66,96
209	4	66,79
210	4	66,63
211	4	66,46
212	4	66,3
213	4	66,13
214	4	65,96
215	4	65,8
216	4	65,63
217	4	65,47
218	4	65,3
219	4	65,14
220	4	64,97
221	4	64,8
222	4	64,64
223	4	64,47
224	4	64,31
225	3	66,17
226	3	64,71
227	3	64,59
228	3	64,46
229	3	64,34
230	3	64,21
231	3	64,09
232	3	63,96
233	3	63,84
234	3	63,72
235	3	63,59
236	3	63,47
237	3	63,34
238	3	63,22
239	3	63,1
240	3	62,97

Hasil Pengujian Parameter Kp=0.65, Ki=0.414, Kd=0.1335

Hasil Pengujian Parameter Kp=0.6, Ki=0.414, Kd=0.1235

No.	Posisi	Servo
1	0	90
2	0	90
3	0	90
4	0	90
5	0	90
6	0	90
7	0	90
8	0	90
9	0	90
10	0	90
11	0	90
12	0	90
13	0	90
14	0	90
15	0	90
16	0	90
17	0	90
18	0	90
19	0	90
20	0	90
21	0	90
22	0	90
23	0	90
24	0	90
25	0	90
26	0	90
27	0	90
28	0	90
29	0	90
30	0	90
31	0	90
32	0	90
33	0	90
34	0	90
35	0	90
36	0	90
37	0	90
38	0	90
39	0	90
40	0	90
41	0	90
42	0	90
43	0	90
44	0	90
45	0	90
46	0	90
47	0	90
48	0	90
49	0	90
50	0	90
51	0	90
52	0	90
53	0	90
54	0	90
55	0	90
56	0	90
57	0	90
58	0	90
59	0	90
60	0	90
61	0	90
62	0	90
63	0	90
64	0	90
65	0	90
66	0	90
67	0	90
68	0	90
69	0	90
70	0	90
71	0	90
72	0	90
73	0	90
74	0	90
75	0	90
76	0	90
77	0	90
78	0	90
79	0	90
80	0	90
81	0	90
82	0	90
83	0	90
84	0	90
85	0	90
86	0	90
87	0	90
88	0	90
89	0	90
90	0	90
91	0	90
92	0	90
93	0	90
94	0	90
95	0	90
96	0	90
97	0	90
98	0	90
99	0	90
100	0	90
101	0	90
102	0	90
103	0	90
104	0	90
105	0	90
106	0	90
107	0	90
108	0	90
109	0	90
110	0	90
111	0	90
112	0	90
113	0	90
114	0	90
115	0	90
116	0	90
117	0	90
118	0	90
119	0	90
120	0	90
121	0	90
122	0	90
123	0	90
124	0	90
125	0	90
126	0	90
127	0	90
128	0	90
129	0	90
130	0	90
131	0	90
132	0	90
133	0	90
134	0	90
135	0	90
136	0	90
137	0	90
138	0	90
139	0	90
140	0	90
141	0	90
142	0	90
143	0	90
144	0	90
145	0	90
146	0	90
147	0	90
148	0	90
149	0	90
150	0	90
151	0	90
152	0	90
153	0	90
154	0	90
155	0	90
156	0	90
157	0	90
158	0	90
159	0	90
160	0	90
161	0	90
162	0	90
163	0	90
164	0	90
165	0	90
166	0	90
167	0	90
168	0	90
169	0	90
170	0	90
171	0	90
172	0	90
173	0	90
174	0	90
175	0	90
176	0	90
177	0	90
178	0	90
179	0	90
180	0	90
181	0	90
182	0	90
183	0	90
184	0	90
185	0	90
186	0	90
187	0	90
188	0	90
189	0	90
190	0	90
191	0	90
192	0	90
193	0	90
194	0	90
195	0	90
196	0	90
197	0	90
198	0	90
199	0	90
200	0	90
201	0	90
202	0	90
203	0	90
204	0	90
205	0	90
206	0	90
207	0	90
208	0	90
209	0	90
210	1	83,12
211	1	84,32
212	1	84,28
213	1	84,23
214	1	84,19
215	1	84,15
216	1	84,11
217	1	84,07
218	1	84,03
219	1	83,99
220	1	83,94
221	1	83,9
222	1	83,86
223	1	83,82
224	1	83,78
225	1	83,74
226	1	83,7
227	1	83,65
228	1	83,61
229	1	83,57
230	1	83,53
231	1	83,49
232	1	83,45
233	1	83,41
234	1	83,36
235	1	83,32
236	1	83,28
237	1	83,24
238	1	83,2
239	1	83,16
240	1	83,12

Hasil Pengujian Parameter Kp=0.6, Ki=0.4, Kd=0.1235

No.	Posisi	Servo	Error (Cm)	Error (%)
1	1	83	1	20
2	1	84	1	20
3	1	84	1	20
4	1	84	1	20
5	1	84	1	20
6	1	84	1	20
7	1	84	1	20
8	1	84	1	20
9	1	84	1	20
10	1	84	1	20
11	1	84	1	20
12	1	84	1	20
13	1	84	1	20
14	1	84	1	20
15	1	84	1	20
16	1	84	1	20
17	1	84	1	20
18	1	84	1	20
19	1	84	1	20
20	1	84	1	20
21	1	84	1	20
22	1	84	1	20
23	1	83	1	20
24	1	83	1	20
25	1	83	1	20
26	1	83	1	20
27	1	83	1	20
28	1	83	1	20
29	1	83	1	20
30	1	83	1	20
31	1	83	1	20
32	1	83	1	20
33	1	83	1	20
34	1	83	1	20
35	1	83	1	20
36	1	83	1	20
37	1	83	1	20
38	1	83	1	20
39	1	83	1	20
40	1	83	1	20
41	1	83	1	20
42	1	83	1	20
43	1	83	1	20
44	1	83	1	20
45	1	83	1	20
46	1	83	1	20
47	1	83	1	20
48	1	82	1	20
49	1	82	1	20
50	1	82	1	20

No.	Posisi	Servo	Error (Cm)	Error (%)
51	1	82	1	20
52	1	82	1	20
53	1	82	1	20
54	1	82	1	20
55	1	82	1	20
56	1	82	1	20
57	1	82	1	20
58	1	82	1	20
59	1	82	1	20
60	1	82	1	20
61	1	82	1	20
62	1	82	1	20
63	1	82	1	20
64	1	82	1	20
65	1	82	1	20
66	1	82	1	20
67	1	82	1	20
68	1	82	1	20
69	1	82	1	20
70	1	82	1	20
71	1	82	1	20
72	1	82	1	20
73	1	81	1	20
74	1	81	1	20
75	1	81	1	20
76	1	81	1	20
77	1	81	1	20
78	1	81	1	20
79	1	81	1	20
80	1	81	1	20
81	1	81	1	20
82	1	81	1	20
83	1	81	1	20
84	1	81	1	20
85	1	81	1	20
86	1	81	1	20
87	1	81	1	20
88	1	81	1	20
89	1	81	1	20
90	1	81	1	20
91	1	81	1	20
92	1	81	1	20
93	1	81	1	20
94	1	81	1	20
95	1	81	1	20
96	1	81	1	20
97	1	81	1	20
98	1	80	1	20
99	1	80	1	20
100	1	80	1	20

No.	Posisi	Servo	Error (Cm)	Error (%)
101	1	80	1	20
102	1	80	1	20
103	1	80	1	20
104	1	80	1	20
105	1	80	1	20
106	1	80	1	20
107	1	80	1	20
108	1	80	1	20
109	1	80	1	20
110	1	80	1	20
111	1	80	1	20
112	1	80	1	20
113	1	80	1	20
114	1	80	1	20
115	1	80	1	20
116	1	80	1	20
117	1	80	1	20
118	1	80	1	20
119	1	80	1	20
120	1	80	1	20
121	1	80	1	20
122	2	78	2	40
123	2	79	2	40
124	2	79	2	40
125	2	79	2	40
126	2	79	2	40
127	2	78	2	40
128	2	78	2	40
129	2	78	2	40
130	2	78	2	40
131	2	78	2	40
132	2	78	2	40
133	2	78	2	40
134	2	78	2	40
135	2	78	2	40
136	2	78	2	40
137	2	78	2	40
138	2	78	2	40
139	2	78	2	40
140	2	77	2	40
141	2	77	2	40
142	2	77	2	40
143	2	77	2	40
144	2	77	2	40
145	2	77	2	40
146	2	77	2	40
147	2	77	2	40
148	2	77	2	40
149	2	77	2	40
150	2	77	2	40

No.	Posisi	Servo	Error (Cm)	Error (%)
151	2	77	2	40
152	2	76	2	40
153	2	76	2	40
154	2	76	2	40
155	2	76	2	40
156	2	76	2	40
157	2	76	2	40
158	2	76	2	40
159	2	76	2	40
160	2	76	2	40
161	2	76	2	40
162	2	76	2	40
163	2	76	2	40
164	2	76	2	40
165	2	75	2	40
166	2	75	2	40
167	2	75	2	40
168	2	75	2	40
169	2	75	2	40
170	2	75	2	40
171	2	75	2	40
172	2	75	2	40
173	2	75	2	40
174	2	75	2	40
175	2	75	2	40
176	2	75	2	40
177	2	74	2	40
178	2	74	2	40
179	2	74	2	40
180	2	74	2	40
181	2	74	2	40
182	2	74	2	40
183	2	74	2	40
184	2	74	2	40
185	2	74	2	40
186	2	74	2	40
187	2	74	2	40
188	2	74	2	40
189	1	75	1	20
190	1	74	1	20
191	1	74	1	20
192	1	74	1	20
193	1	74	1	20
194	1	74	1	20
195	1	74	1	20
196	1	74	1	20
197	1	74	1	20
198	1	74	1	20
199	1	74	1	20
200	1	74	1	20

No.	Posisi	Servo	Error (Cm)	Error (%)
201	1	74	1	20
202	1	74	1	20
203	1	74	1	20
204	1	74	1	20
205	1	74	1	20
206	1	73	1	20
207	1	73	1	20
208	1	73	1	20
209	1	73	1	20
210	1	73	1	20
211	1	73	1	20
212	0	90	0	0
213	0	90	0	0
214	0	90	0	0
215	0	90	0	0
216	0	90	0	0
217	0	90	0	0
218	0	90	0	0
219	0	90	0	0
220	0	90	0	0
221	0	90	0	0
222	0	90	0	0
223	0	90	0	0
224	0	90	0	0
225	0	90	0	0
226	0	90	0	0
227	0	90	0	0
228	0	90	0	0
229	0	90	0	0
230	0	90	0	0
231	0	90	0	0
232	0	90	0	0
233	0	90	0	0
234	0	90	0	0
235	0	90	0	0
236	0	90	0	0
237	-	-	-	-
238	-	-	-	-
239	-	-	-	-
240	-	-	-	-
241	-	-	-	-
242	-	-	-	-
243	-	-	-	-
244	-	-	-	-
245	-	-	-	-
246	-	-	-	-
247	-	-	-	-
248	-	-	-	-
249	-	-	-	-
250	-	-	-	-

No.	Posisi	Servo	Error (Cm)	Error (%)
251	-	-	-	-
252	-	-	-	-
253	-	-	-	-
254	-	-	-	-
255	-	-	-	-
256	-	-	-	-
257	-	-	-	-
258	-	-	-	-
259	-	-	-	-
260	-	-	-	-
261	-	-	-	-
262	-	-	-	-
263	-	-	-	-
264	-	-	-	-
265	-	-	-	-
266	-	-	-	-
267	-	-	-	-
268	-	-	-	-
269	-	-	-	-
270	-	-	-	-
271	-	-	-	-
272	-	-	-	-
273	-	-	-	-
274	-	-	-	-
275	-	-	-	-
276	-	-	-	-
277	-	-	-	-
278	-	-	-	-
279	-	-	-	-
280	-	-	-	-
281	-	-	-	-
282	-	-	-	-
283	-	-	-	-
284	-	-	-	-
285	-	-	-	-
286	-	-	-	-
287	-	-	-	-
288	-	-	-	-
289	-	-	-	-
290	-	-	-	-
291	-	-	-	-
292	-	-	-	-
293	-	-	-	-
294	-	-	-	-
295	-	-	-	-
296	-	-	-	-
297	-	-	-	-
298	-	-	-	-
299	-	-	-	-
300	-	-	-	-

No.	Posisi	Servo	Error (Cm)	Error (%)
301	-	-	-	-
302	-	-	-	-
303	-	-	-	-
304	-	-	-	-
305	-	-	-	-
306	-	-	-	-
307	-	-	-	-
308	-	-	-	-
309	-	-	-	-
310	-	-	-	-
311	-	-	-	-
312	-	-	-	-
313	-	-	-	-
314	-	-	-	-
315	-	-	-	-
316	-	-	-	-
317	-	-	-	-
318	-	-	-	-
319	-	-	-	-
320	-	-	-	-
321	-	-	-	-
322	-	-	-	-
323	-	-	-	-
324	-	-	-	-
325	-	-	-	-
326	-	-	-	-
327	-	-	-	-
328	-	-	-	-
329	-	-	-	-
330	-	-	-	-
331	-	-	-	-
332	-	-	-	-
333	-	-	-	-
334	-	-	-	-
335	-	-	-	-
336	-	-	-	-
337	-	-	-	-
338	-	-	-	-
339	-	-	-	-
340	-	-	-	-
341	-	-	-	-
342	-	-	-	-
343	-	-	-	-
344	-	-	-	-
345	-	-	-	-
346	-	-	-	-
347	-	-	-	-
348	-	-	-	-
349	-	-	-	-
350	-	-	-	-

No.	Posisi	Servo	Error (Cm)	Error (%)
351	-	-	-	-
352	-	-	-	-
353	-	-	-	-
354	-	-	-	-
355	-	-	-	-
356	-	-	-	-
357	-	-	-	-
358	-	-	-	-
359	-	-	-	-
360	-	-	-	-
361	-	-	-	-
362	-	-	-	-
363	-	-	-	-
364	-	-	-	-
365	-	-	-	-
366	-	-	-	-
367	-	-	-	-
368	-	-	-	-
369	-	-	-	-
370	-	-	-	-
371	-	-	-	-
372	-	-	-	-
373	-	-	-	-
374	-	-	-	-
375	-	-	-	-
376	-	-	-	-
377	-	-	-	-
378	-	-	-	-
379	-	-	-	-
380	-	-	-	-
381	-	-	-	-
382	-	-	-	-
383	-	-	-	-
384	-	-	-	-
385	-	-	-	-
386	-	-	-	-
387	-	-	-	-
388	-	-	-	-
389	-	-	-	-
390	-	-	-	-
391	-	-	-	-
392	-	-	-	-
393	-	-	-	-
394	-	-	-	-
395	-	-	-	-
396	-	-	-	-
397	-	-	-	-
398	-	-	-	-
399	-	-	-	-
400	-	-	-	-

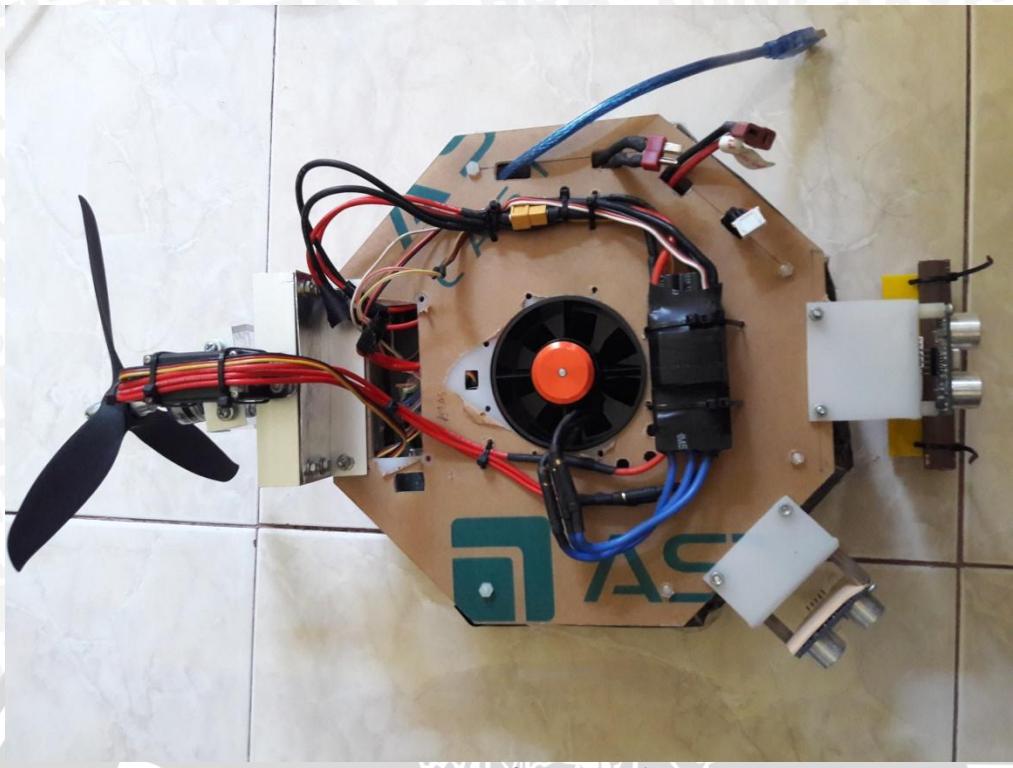
No.	Posisi	Servo	Error (Cm)	Error (%)
401	-	-	-	-
402	-	-	-	-
403	-	-	-	-
404	-	-	-	-
405	-	-	-	-
406	-	-	-	-
407	-	-	-	-
408	-	-	-	-
409	-	-	-	-
410	-	-	-	-
411	-	-	-	-
412	-	-	-	-
413	-	-	-	-
414	-	-	-	-
415	-	-	-	-
416	-	-	-	-
417	-	-	-	-
418	-	-	-	-
419	-	-	-	-
420	-	-	-	-
421	-	-	-	-
422	-	-	-	-
423	5	105	5	100
424	5	105	5	100
425	5	105	5	100
426	5	105	5	100
427	5	105	5	100
428	5	105	5	100
429	5	105	5	100
430	5	105	5	100
431	5	105	5	100
432	5	105	5	100
433	5	105	5	100
434	5	105	5	100
435	5	105	5	100
436	5	105	5	100
437	5	105	5	100
438	5	105	5	100
439	5	105	5	100
440	4	105	4	80
441	4	105	4	80
442	4	105	4	80
443	4	105	4	80
444	4	105	4	80
445	4	105	4	80
446	4	105	4	80
447	4	105	4	80
448	4	105	4	80
449	4	105	4	80
450	4	105	4	80

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LAMPIRAN II



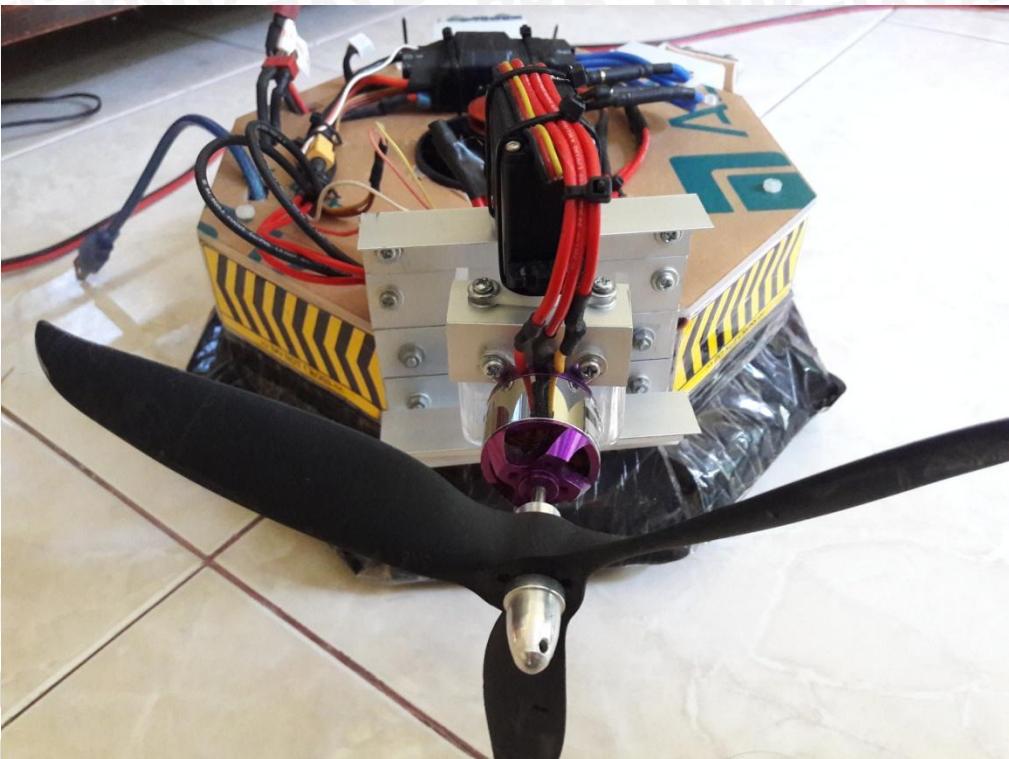
Gambar Alat



Robot Hovercraft Tampak Atas



Robot Hovercraft Tampak Samping



Robot Hovercraft Tampak Belakang



Sensor Tracer Robot Hovercraft



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



LAMPIRAN III

Program Keseluruhan

```
#include <Servo.h>
Servo myservo, jet, moves;
#define sensor0 12
#define sensor1 52
#define sensor2 50
```

```
#define sensor3 48
#define sensor4 46
#define sensor5 8
#define sensor6 9
#define sensor7 10
#define sensor8 11

int S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9;
//int Setpoint[9];
int A, B, C;
char value;
double error, errSum, lastErr, Output, servo;
double timeChange = 0.1;
double kp, ki, kd;
unsigned long lastTime;
int posisi;
byte i = B00000000;

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    // jet.attach(4);
    // moves.attach(5);
    myservo.attach(6);
    kp = 0.6;
    ki = 0.4;
    kd = 0.1235;
    pinMode(sensor0, INPUT);
    pinMode(sensor1, INPUT);
    pinMode(sensor2, INPUT);
    pinMode(sensor3, INPUT);
    pinMode(sensor4, INPUT);
    pinMode(sensor5, INPUT);
    pinMode(sensor6, INPUT);
    pinMode(sensor7, INPUT);
    pinMode(sensor8, INPUT);
    jet.writeMicroseconds(700);
    moves.writeMicroseconds(700);
}

void setpoint()
{
    S1 = digitalRead(sensor0);
    S2 = digitalRead(sensor1);
    S3 = digitalRead(sensor2);
    S4 = digitalRead(sensor3);
    S5 = digitalRead(sensor4);
    S6 = digitalRead(sensor5);
    S7 = digitalRead(sensor6);
    S8 = digitalRead(sensor7);
    S9 = digitalRead(sensor8);

    A = S1+S2+S3;
    B = S4+S5+S6;
    C = S7+S8+S9;

    if (A==2 && B==3 && C==3)
    {error = 5;}
    if (A==1 && B==3 && C==3)
    {error = 4;}
}
```



```
if (A==0 && B==3 && C==3)
{error = 3;}
if (A==1 && B==2 && C==3)
{error = 2;}
if (A==2 && B==1 && C==3)
{error = 1;}

if (A==3 && B==0 && C==3)
{error = 0;}

if (A==3 && B==1 && C==2)
{error = -1;}
if (A==3 && B==2 && C==1)
{error = -2;}
if (A==3 && B==3 && C==0)
{error = -3;}
if (A==3 && B==3 && C==1)
{error = -4;}
if (A==3 && B==3 && C==2)
{error = -5;}
}

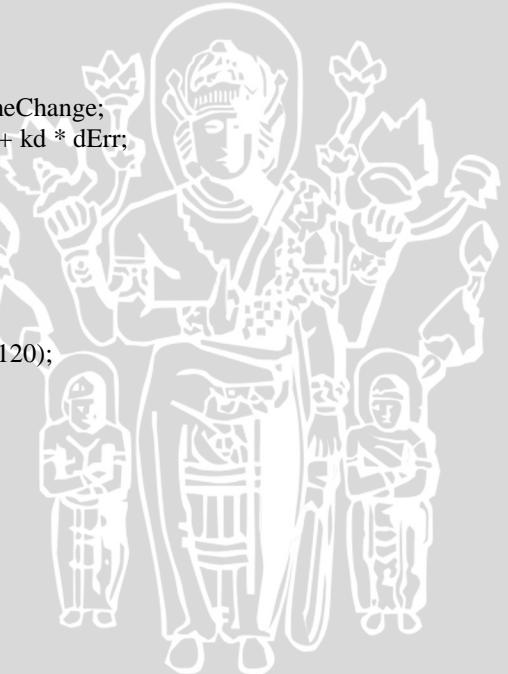
void accumulate()
{
    errSum += (error * timeChange);
    double dErr = (error - lastErr) / timeChange;
    Output = kp * error + ki * errSum + kd * dErr;
}

void pid()
{
    if (error < 0)
    {
        servo = map(Output, -1, -100, 95, 120);
        if (servo > 115)
        {servo = 115;}
        if (servo <= 90)
        {servo = 90;}
        myservo.write(servo);
        lastErr = error;
    }

    if (error > 0)
    {
        servo = map(Output, 1, 100, 90, 65);
        if (servo > 85)
        {servo = 85;}
        if (servo <= 60)
        {servo = 60;}
        myservo.write(servo);
        lastErr = error;
    }

    if (error == 0)
    {myservo.write(90);}
}

void loop()
{
```





```
if (Serial.available())
```

```
    value = Serial.read();
```

```
    if (value == '1')
```

```
{
```

```
    jet.writeMicroseconds(1050);
```

```
    moves.writeMicroseconds(1150);
```

```
    setpoint();
```

```
    accumulate();
```

```
    pid();
```

```
    Serial.print(error);
```

```
    Serial.print("t");
```

```
    Serial.println(servo);
```

```
}
```

```
if (value == '0')
```

```
{
```

```
    jet.writeMicroseconds(700);
```

```
    moves.writeMicroseconds(700);
```

```
    Serial.println("SELESAI");
```

```
}
```

```
}
```

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

