

Aplikasi Sistem Kontrol *Proporsional Integral Derivative* (PID) Pada Robot Beroda Berbasis AVR

Disusun oleh :

Nama : Rocky Anthoni

NRP : 0822059

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha,
Jl.Prof.Drg.Suria Sumantri, MPH No. 65, Bandung, Indonesia.

Email : rocky.anthoni@yahoo.co.id

ABSTRAK

Kontes Robot Cerdas Indonesia (KRCI) merupakan sebuah kompetisi robot yang diadakan setiap tahun. Dari tahun ke tahun, KRCI mengalami perubahan dalam hal tingkat kesulitan yang harus diatasi oleh robot. Robot harus dapat bergerak dengan cepat dan lincah, kembali ke posisi *HOME*, dan memasuki seluruh ruang yang ada. Berbagai kelemahan belum dapat diatasi terutama dalam penerapan sistem kontrol yang banyak mengandalkan sistem kontrol *On Off*.

Untuk itu pada Tugas Akhir ini, dirancang robot beroda yang mempunyai dimensi yang lebih kecil dan menggunakan sistem kontrol PID. Metoda tuning PID yang digunakan merupakan modifikasi antara metoda Ziegler Nichols II dan *trial and error*. Metoda ini dapat membantu mempercepat perolehan nilai parameter PID.

Berdasarkan percobaan yang dilakukan modifikasi *trial and error* dan Ziegler Nichols II dapat diterapkan untuk kecepatan motor DC rendah (*reference* PWM 25, 50), sedangkan untuk kecepatan motor DC tinggi (75, 125) lebih tepat menggunakan metoda *trial and error* saja. Sedangkan desain robot dianjurkan menempatkan posisi sensor lebih kedepan dari *actuator* agar *error* terbaca lebih dahulu dan respon kontroler tidak terlambat.

Kata Kunci : Robot Beroda, KRCI, Sensor UVtron, Sensor Jarak *Ultrasonic*, Pengontrol Mikro Atmega128.

Application of Proportional Integral Derivative (PID) Control System for Wheeled Robot Based on AVR

Composed by :

Name : Rocky Anthoni

NRP : 0822059

Electrical Engineering, Maranatha Christian University,
Jl.Prof.Drg.Suria Sumantri, MPH No. 65, Bandung, Indonesia.

Email : rocky.anthoni@yahoo.co.id

ABSTRACT

Indonesian Intelligent Robot Contest (KRCI) is a robot competition held every year. From year to year, KRCI changes in the level of difficulty to be overcome by the robot. The robot must be able to move quickly and swiftly, back to the HOME position, and into the entire space available. These weaknesses have not been able to overcome, especially in the application of control systems that are relying on the control system On Off.

Therefore the final project, designed a wheeled robot that has smaller dimensions and using the PID control system. PID tuning method used is a modification of the method of Ziegler and Nichols II trial and error. This method can help to accelerate the acquisition of PID parameter values.

Based on experiments conducted trial and error and modification of Ziegler Nichols II can be applied to low-speed DC motor (PWM reference 25, 50), while for high-speed DC motor (75, 125) is more appropriate to use the method of trial and error alone. While the robot design is recommended to put more forward position of the actuator sensor that reads the error response of the controller in advance and do not be late.

Keywords: Wheeled Robot, KRCI, UVTron Sensor, Ultrasonic Sensor, Micro Controller Atmega 128

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSCTRACT	ii
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Pembatasan Masalah	2
1.5 Spesifikasi Alat yang Digunakan	3
1.6 Sistematika Penulisan	3

BAB 2 TEORI DASAR

II.1 Kontroler	5
II.1.1 <i>Feedback</i> Kontrol Sistem (Sistem Kontrol <i>Closed Loop</i>).....	7
II.1.2 Sistem Kontrol <i>Open Loop</i>	8
II.2 Kestabilan Mutlak dan Kestabilan Relatif	8
II.3 Tanggapan Peralihan (<i>Transient Respon</i>).....	9
II.4 Tanggapan Keadaan Tunak.....	10
II.5 Aksi Kontrol	11
II.5.1 Aksi Kontreol <i>On-Off</i>	11
II.5.2 Aksi Kontrol <i>Proportional</i> (P).....	13

II.5.3 Aksi Kontrol <i>Integral</i> (I).....	14
II.5.4 Aksi Kontrol <i>Derivative</i> (D).....	16
II.5.5 Aksi Kontrol PID.....	19
II.6 Tuning PID	22
II.6.1 Ziegler Nichols II (Metoda Osilasi).....	23
II.6.2 <i>Trial and Error</i>	24
II.7 Pengantar Robotika	25
II.7.1 Robot Beroda.....	25
II.7.1.1 <i>Diffential Drive</i>	25
II.7.1.2 <i>Tricycle Drive</i>	26
II.7.1.3 <i>Synchronous Drive</i>	27
II.7.1.4 <i>Holonomic Drive</i>	27
II.8 Sensor	28
II.8.1 Sensor Jarak Ultrasonik (SRF05).....	29
II.8.2 Sensor Api UVTron.....	32
II.8.3 Sensor Warna.....	34
II.9 Pengenalan Mikro	35
II.9.1 Pengenalan ATMEL AVR RISC.....	35
II.9.2 Pengontrol Mikro ATmega 128.....	36
II.9.3 Filtur ATmega 128.....	36
II.9.4 Konfigurasi Pin ATmega 128.....	38
II.10 IC MAX232.....	42
II.11 USB to RS232 Converter	43
II.12 Driver Motor DC VNH3SP30 MD01B	47

BAB 3 PERANCANGAN DAN REALISASI

III.1 Sensor dan Driver Motor DC.....	48
II.1.1 Sensor Jarak Ultrasonic SRF05.....	48
II.1.2 Sensor Api UV-TRON Hamamatsu R2868.....	50
II.1.3 Sensor Warna ZX-03.....	51
II.1.4 Rangkaian <i>Driver</i> Motor DC VNH3SP30 MD01B.....	51
III.2 Penghubung Matlab Pada Laptop dengan Mikrokontroller...	53

III.3 Perancangan Sistem Robot Beroda dengan Sistem Kontrol PID.....	54
II.3.1 Diagram Blok Sistem Kontrol Gerak Robot Beroda.....	56
II.3.2 Diagram Blok Sistem Pemadam Api Robot Beroda.....	57
III.4 Bentuk Robot.....	59
III.5 Perancangan dan Realisasi Robot Beroda Pemadam Api.....	60
III.6 Sistem Gerak.....	62
III.7 Pemutar Kipas Pada Robot.....	62
III.8 Skematik Pengontrol Mikro ATmega128A.....	63
III.9 Metoda Tuning PID.....	70
III.10 Simulink Matlab.....	71
III.11 Algoritma Pemrograman pada Robot.....	77
III.11.1 Flowchart Utama pada Robot Pemadam Beroda.....	78
III.11.2 Flowchart untuk Main Sub Program.....	80
III.11.3 Flowchart untuk Sub Program Set Nilai Kp, Ki, Kd.....	83
III.11.4 Flowchart untuk Sub Program Wall Follower Kanan Menggunakan PID dan Kirim Data ke Matlab.....	86
III.11.5 Flowchart untuk Sub Program Wall Follower Kiri Menggunakan PID.....	89

BAB 4 DATA PENGAMATAN DAN ANALISIS

IV.1 Pengujian Sensor Warna.....	92
IV.2 Pengujian Sensor Ultrasonic / Sensor Jarak SRF05.....	94
IV.3 Tuning PID pada Robot.....	95
IV.3.1 Tuning PID untuk set point jarak (8cm) pada Reference PWM 25 dan 50.....	96
IV.3.1.1 Tuning Nilai Parameter Proportional (Kp) untuk Reference PWM 25 dan set point jarak (8cm).....	96
IV.3.1.2 Tuning Nilai Parameter Integral (Ki) untuk Reference PWM 25 dan set point jarak (8cm).....	100
IV.3.1.3 Tuning Nilai Parameter Derivative (Kd) untuk	

	<i>Reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8cm).....	105
IV.3.1.4	Pengujian Hasil <i>Tuning</i> Terbaik pada Kontroler P, PI dan PID untuk <i>Reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8cm)	111
IV.3.1.5	Pengujian Pada Arena KRCI untuk <i>Reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8cm).....	116
IV.3.2	Pengujian <i>Tuning</i> PID untuk <i>Reference</i> PWM 50 dan <i>set point</i> jarak (8cm).....	122
IV.3.2.1	<i>Tuning</i> Nilai Parameter <i>Proportional</i> (Kp) untuk <i>Reference</i> PWM 50 dan <i>set point</i> jarak (8cm).....	122
IV.3.2.2	<i>Tuning</i> Nilai Parameter <i>Integral</i> (Ki) untuk <i>Reference</i> PWM 50 dan <i>set point</i> jarak (8cm).....	126
IV.3.2.3	<i>Tuning</i> Nilai Parameter <i>Derivative</i> (Kd) untuk <i>Reference</i> PWM 50 dan <i>set point</i> jarak (8cm).....	130
IV.3.2.4	Pengujian Hasil <i>Tuning</i> Terbaik pada Kontroler P, PI dan PID untuk <i>Reference</i> PWM 50 dan <i>set point</i> jarak (8cm).....	134
IV.3.2.5	Pengujian Pada Arena KRCI untuk <i>Reference</i> PWM 50 dan <i>set point</i> jarak (8cm).....	138
IV.3.3	Pengujian <i>Tuning</i> PID untuk <i>Reference</i> PWM 75 dan <i>set point</i> jarak (8cm).....	143
IV.3.3.1	<i>Tuning</i> Nilai Parameter <i>Proportional</i> (Kp) untuk <i>Reference</i> PWM 75 dan <i>set point</i> jarak (8cm).....	144
IV.3.3.2	<i>Tuning</i> Nilai Parameter <i>Integral</i> (Ki) untuk <i>Reference</i> PWM 75 dan <i>set point</i> jarak (8cm).....	148
IV.3.3.3	<i>Tuning</i> Nilai Parameter <i>Derivative</i> (Kd) untuk <i>Reference</i> PWM 75 dan <i>set point</i> jarak (8cm).....	153
IV.3.3.4	Pengujian Hasil <i>Tuning</i> Terbaik pada Kontroler P, PI dan PID untuk <i>Reference</i> PWM 75 dan <i>set point</i> jarak (8cm).....	159
IV.3.3.5	Pengujian Pada Arena KRCI untuk	

	<i>Reference</i> PWM 75 dan <i>set point</i> jarak (8cm).....	162
IV.4	Pengujian Pembanding Kontoler P, PI dan PID.....	168
IV.5	Pengujian Kontroler PID.....	170

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

V.1	Kesimpulan.....	173
V.2	Saran.....	174

	DAFTAR PUSTAKA.....	175
--	----------------------------	-----

LAMPIRAN – A Foto Robot Beroda

LAMPIRAN – B Program pada Pengontrol Mikro ATmega128

LAMPIRAN – C Datasheet

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Pendekatan nilai parameter PID dengan metoda <i>oscillation</i> ..	24
Tabel 2.2 Fungsi khusus Port B.....	39
Tabel 2.3 Fungsi khusus Port C.....	39
Tabel 2.4 Fungsi khusus Port D.....	40
Tabel 2.5 Fungsi khusus Port E.....	40
Tabel 2.6 Fungsi khusus Port G.....	41
Tabel 2.7 Konfigurasi pin RS232.....	45
Tabel 2.8 Fungsi dari masing-masing pin RS232.....	46
Tabel 3.1 Tabel Kebenaran <i>Driver</i> Motor VNH3SP30 MD01B.....	53
Tabel 3.2 Daftar I/O Port A pada mikrokontroler.....	68
Tabel 3.3 Daftar I/O Port B pada mikrokontroler.....	68
Tabel 3.4 Daftar I/O Port C pada mikrokontroler.....	69
Tabel 3.5 Daftar I/O Port D pada mikrokontroler.....	69
Tabel 3.6 Daftar I/O Port E pada mikrokontroler.....	70
Tabel 3.7 Daftar I/O Port F pada mikrokontroler.....	70
Tabel 3.8 Daftar I/O Port G pada mikrokontroler.....	71
Tabel 4.1a Tabel pengukuran sensor warna kiri depan.....	92
Tabel 4.1b Tabel pengukuran sensor warna kiri belakang.....	93
Tabel 4.2 Tabel pengukuran sensor <i>ultrasonic</i> SRF05.....	94

Tabel 4.3a Pengujian kontroler P, PI dan PID pada robot untuk memadamkan api (<i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8cm))	168
Tabel 4.3b Pengujian kontroler P, PI dan PID pada robot untuk memadamkan api (<i>reference</i> PWM 50 dan <i>set point</i> jarak (8cm))	168
Tabel 4.3c Pengujian kontroler P, PI dan PID pada robot untuk memadamkan api (<i>reference</i> PWM 75 dan <i>set point</i> jarak (8cm))	169
Tabel 4.3d Pengujian kontroler P, PI dan PID pada robot untuk memadamkan api (<i>reference</i> PWM 125 dan <i>set point</i> jarak (8cm))	169
Tabel 4.4a Pengujian kontroler PID pada arena KRCI dengan posisi titik api di ruang 1 untuk <i>reference</i> PWM 125.....	170
Tabel 4.4b Pengujian kontroler PID pada arena KRCI dengan posisi titik api di ruang 2 untuk <i>reference</i> PWM 125.....	171
Tabel 4.4c Pengujian kontroler PID pada arena KRCI dengan posisi titik api di ruang 3 untuk <i>reference</i> PWM 125.....	171
Tabel 4.4d Pengujian kontroler PID pada arena KRCI dengan posisi titik api di ruang 4 untuk <i>reference</i> PWM 125.....	172

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Klasifikasi kontroler berdasarkan aksi kontrol.....	5
Gambar 2.2 Jenis-jenis kontroler berdasarkan periodenya.....	6
Gambar 2.3 Diagram blok sistem kontrol tertutup.....	7
Gambar 2.4 Diagram blok sistem kontrol terbuka.....	8
Gambar 2.5 Kurva tanggapan sistem dengan karakteristik <i>transient respon</i>	10
Gambar 2.6 Ilustrasi aksi kontrol <i>on-off</i>	12
Gambar 2.7 Ilustrasi aksi kontrol <i>on-off</i> dengan histerisis.....	13
Gambar 2.8 Diagram blok sistem kontrol <i>proportional</i>	13
Gambar 2.9 Diagram blok sistem kontrol <i>Integral</i>	14
Gambar 2.10 Kurva sinyal kesalahan $e(t)$ terhadap t dan kurva $u(t)$ terhadap t pada pembangkit kesalahan nol.....	15
Gambar 2.11 Hubungan antara <i>error</i> dengan sinyal kontrol <i>Integral</i>	16
Gambar 2.12 Diagram blok sistem kontrol <i>Derivative</i>	16
Gambar 2.13 Kurva waktu hubungan kontroler <i>input-output differential</i>	17
Gambar 2.14 Hubungan antara <i>error</i> dengan sinyal kontrol <i>Derivative</i>	18
Gambar 2.15 Diagram blok PID <i>parallel</i>	19
Gambar 2.16 Hubungan dalam fungsi waktu antara sinyal keluaran dengan masukan untuk kontroler PID.....	20
Gambar 2.17 Hubungan antara <i>error</i> dengan sinyal kontrol PID.....	20

Gambar 2.18 PID <i>parallel</i> dengan hubungan Kp diseri Kd dan Ki.....	21
Gambar 2.19 PID <i>parallel</i> dengan Kp terpisah dengan Kd dan Ki.....	22
Gambar 2.20 Kurva respon <i>sustain oscillation</i>	24
Gambar 2.21 Sistem gerak <i>differential drive</i>	26
Gambar 2.22 a.Sistem Gerak <i>Tricycle Drive</i> dan b. Kendaraan dengan Sistem Gerak <i>Tricycle Drive</i>	26
Gambar 2.23 Sistem gerak <i>synchronous drive</i>	27
Gambar 2.24 Robot dengan 3 roda <i>omni-directional</i>	28
Gambar 2.25 Sistem gerak <i>Holonomic Drive</i>	28
Gambar 2.26a Koneksi Pin SRF05 <i>mode 1</i>	30
Gambar 2.26b Koneksi Pin SRF05 <i>mode 2</i>	30
Gambar 2.27a Diagram waktu sensor SRF05 <i>mode 1</i>	31
Gambar 2.27b Diagram waktu sensor SRF05 <i>mode 2</i>	31
Gambar 2.28 Sensor Api (a. UVTron R2868 dan b. Rangkaian Pengaktif)	32
Gambar 2.29 <i>Spektrum</i> respon UVTron.....	33
Gambar 2.30 Derajat sensitivitas Hamamatsu R2868.....	33
Gambar 2.31 Sensor Warna (a. Bentuk Sensor TCRT5000 dan b. Koneksi Pin ZX-03)	35
Gambar 2.32 Konfigurasi pin ATmega 128.....	38
Gambar 2.33 Level tegangan pada TTL dan RS232.....	42
Gambar 2.34 Skematik rangkaian IC MAX232.....	43
Gambar 2.35 Skematik rangkaian USB to RS232 <i>converter</i>	44
Gambar 2.36 Pin RS232.....	44

Gambar 2.37	<i>Driver motor DC VNH3SP30 MD01B.....</i>	47
Gambar 3.1	Alokasi pin sensor SRF05.....	49
Gambar 3.2	Diagram alir penggunaan sensor SRF05.....	50
Gambar 3.3	Alokasi pin UVTron Hamamatsu R2868.....	50
Gambar 3.4	Alokasi pin sensor warna.....	51
Gambar 3.5	<i>Driver motor DC VNH3SP30 MD01B.....</i>	52
Gambar 3.6	Rangkaian dalam motor <i>driver</i>	52
Gambar 3.7	Diagram blok penghubung Matlab pada laptop dengan mikrokontroler.....	53
Gambar 3.8	Penghubung Matlab pada laptop dengan mikrokontroler	54
Gambar 3.9a	<i>Mode non-arbitrary start.....</i>	55
Gambar 3.9b	<i>Mode arbitrary start.....</i>	55
Gambar 3.10	Diagram blok sistem gerak robot.....	56
Gambar 3.11	Diagram blok sistem pemadam menggunakan sensor warna.....	57
Gambar 3.12	Diagram blok sistem pemadam api robot beroda.....	58
Gambar 3.13	Diagram blok sistem robot beroda.....	59
Gambar 3.14	Dimensi robot beroda pemadam api dan penempatan sensor.....	60
Gambar 3.15	Penempatan sensor pada robot	61
Gambar 3.16	Diagram blok pemutar kipas.....	63
Gambar 3.17	Diagram blok pengontrol mikro ATmega128A.....	64
Gambar 3.18	Bagian <i>main board</i> ATmega128A.....	65
Gambar 3.19	Bagian <i>downloader</i> dari <i>main board</i>	66

Gambar 3.20 <i>Board ATmega128A</i>	66
Gambar 3.21 <i>Peletakan sensor-sensor SRF05</i>	67
Gambar 3.22 <i>Model baru pada Matlab</i>	73
Gambar 3.23a <i>Search Query Instrument</i>	74
Gambar 3.23b <i>Drag Query Instrument</i>	74
Gambar 3.24 <i>Hubungkan Query dengan Scope, To Workspace dan Display</i>	75
Gambar 3.25 <i>Setting Query Instrument</i>	75
Gambar 3.26a <i>Setting Pada AVR bagian pertama</i>	77
Gambar 3.26b <i>Setting Pada AVR bagian kedua</i>	78
Gambar 3.27 <i>Flowchart robot menggunakan system control PID</i>	80
Gambar 3.28a <i>Flowchart main program bagian pertama</i>	82
Gambar 3.28b <i>Flowchart main program bagian kedua</i>	83
Gambar 3.29a <i>Flowchart set nilai Kp, Ki, Kd bagian pertama</i>	85
Gambar 3.29b <i>Flowchart set nilai Kp, Ki, Kd bagian kedua</i>	86
Gambar 3.30a <i>Flowchart wall follower kanan menggunakan PID bagian pertama</i>	88
Gambar 3.30b <i>Flowchart wall follower kanan menggunakan PID bagian kedua</i>	89
Gambar 3.30c <i>Flowchart wall follower kanan menggunakan PID bagian ketiga</i>	90
Gambar 3.31a <i>Flowchart wall follower kiri menggunakan PID bagian pertama</i>	91

Gambar 3.31b <i>Flowchart wall follower kiri menggunakan</i>	
PID bagian kedua.....	92
Gambar 4.1a <i>Output proses variabel untuk kontroler Proportional</i>	
dengan <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i>	
jarak (8 cm)	97
Gambar 4.1b <i>Output proses variabel untuk kontroler Proportional</i>	
dengan <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i>	
jarak (8 cm) (diperbesar/zoom)	98
Gambar 4.2 <i>Sinyal error untuk kontroler Proportional</i>	
dengan <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i>	
jarak (8 cm)	98
Gambar 4.3 <i>Sinyal kontrol dari kontroler Proportional</i>	
untuk <i>reference</i> PWM 25 dengan	
<i>set point</i> jarak (8 cm)	99
Gambar 4.4 <i>Sinyal PWM motor DC kiri dari kontroler</i>	
<i>Proportional</i> untuk <i>reference</i> PWM 25	
dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	100
Gambar 4.5a <i>Output proses variabel untuk kontroler</i>	
<i>Proportional Integral</i> dengan <i>reference</i> PWM 25	
dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	101
Gambar 4.5b <i>Output proses variabel untuk kontroler Proportional</i>	
<i>Integral</i> dengan <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i>	
jarak (8 cm) (diperbesar/zoom)	102

Gambar 4.6	Sinyal <i>error</i> untuk kontroler <i>Proportional Integral</i> dengan <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	103
Gambar 4.7	Sinyal kontrol untuk kontroler <i>Proportional Integral</i> dengan <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	104
Gambar 4.8	Sinyal PWM motor DC kiri untuk kontroler <i>Proportional Integral</i> dengan <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	105
Gambar 4.9a	<i>Output</i> proses variabel untuk kontroler <i>Proportional Integral Derivative</i> dengan <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	107
Gambar 4.9b	<i>Output</i> proses variabel untuk kontroler <i>Proportional</i> <i>Integral Derivative</i> dengan <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm) (diperbesar/zoom)	107
Gambar 4.10	Sinyal <i>error</i> untuk kontroler <i>Proportional Integral</i> <i>Derivative</i> dengan <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	108
Gambar 4.11a	Sinyal kontrol untuk kontroler <i>Proportional Integral</i> <i>Derivative</i> dengan <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	109
Gambar 4.11b	Sinyal kontrol untuk kontroler <i>Proportional Integral</i> <i>Derivative</i> dengan <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm) (diperbesar/zoom)	109

Gambar 4.12 Sinyal PWM motor DC kiri untuk kontroler <i>Proportional</i> <i>Integral Derivative</i> dengan <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	110
Gambar 4.13a Output proses variabel P (biru), PI (ungu) dan PID (hijau) untuk <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	111
Gambar 4.13b Output proses variabel P (biru), PI (ungu) dan PID (hijau) untuk <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm) (diperbesar/zoom)	112
Gambar 4.14a Sinyal <i>error</i> untuk kontroler P (biru), PI (ungu) dan PID (hijau) untuk <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	113
Gambar 4.14b Sinyal <i>error</i> untuk kontroler P (biru), PI (ungu) dan PID (hijau) untuk <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm) (diperbesar/zoom)	113
Gambar 4.15a Sinyal kontrol untuk kontroler P (biru), PI (merah) dan PID (hijau) dengan <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	114
Gambar 4.15b Sinyal kontrol untuk kontroler P (biru), PI (merah) dan PID (hijau) dengan <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm) (diperbesar/zoom)	115
Gambar 4.16 Sinyal PWM motor DC kiri untuk kontroler P (ungu), PI (orange) dan PID (biru) dengan <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	116

Gambar 4.17 <i>Output proses variabel (nilai bacaan sensor jarak)</i> untuk kontroler PID pada uji arena KRCI tanpa <i>uneven floor</i> dan <i>furniture</i> untuk <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	117
Gambar 4.18 <i>Output proses variabel (nilai bacaan sensor jarak)</i> untuk kontroler PID pada uji arena KRCI dengan <i>uneven floor</i> dan <i>furniture</i> untuk <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	118
Gambar 4.19 <i>Sinyal error</i> untuk kontroler PID ada uji arena KRCI tanpa <i>uneven floor</i> dan <i>furniture</i> untuk <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	119
Gambar 4.20 <i>Sinyal error</i> untuk kontroler PID pada uji arena KRCI dengan <i>uneven floor</i> dan <i>furniture</i> untuk <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	119
Gambar 4.21 <i>Sinyal kontrol</i> untuk kontroler PID pada uji arena KRCI tanpa <i>uneven floor</i> dan <i>furniture</i> untuk <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	120
Gambar 4.22 <i>Sinyal kontrol</i> untuk kontroler PID pada uji arena KRCI dengan <i>uneven floor</i> dan <i>furniture</i> untuk <i>reference</i> PWM 25 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	121
Gambar 4.23a <i>Output proses variabel atau nilai bacaan sensor</i> <i>ultrasonic</i> kontroler <i>Proportional</i> untuk <i>reference</i> PWM 50 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	123

Gambar 4.23b	<i>Output proses variabel atau nilai bacaan sensor ultrasonic kontroler Proportional untuk reference PWM 50 dan set point jarak (8 cm) (diperbesar/zoom) ...</i>	123
Gambar 4.24	<i>Sinyal error untuk kontroler Proportional pada reference PWM 50 dan set point jarak (8 cm)</i>	124
Gambar 4.25	<i>Sinyal kontrol untuk kontroler Proportional pada reference PWM 50 dan set point jarak (8 cm)</i>	125
Gambar 4.26	<i>Sinyal PWM motor DC kiri untuk kontroler Proportional pada reference PWM 50 dan set point jarak (8 cm)</i>	126
Gambar 4.27a	<i>Output proses variable/nilai bacaan sensor ultrasonic kontroler Proportional Integral untuk reference PWM 50 dan set point jarak (8 cm)</i>	127
Gambar 4.27b	<i>Output proses variable/nilai bacaan sensor ultrasonic kontroler Proportional Integral untuk reference PWM 50 dan set point jarak (8 cm) (diperbesar/zoom) ...</i>	127
Gambar 4.28	<i>Sinyal error untuk kontroler Proportional Integral pada reference PWM 50 dan set point jarak (8 cm)</i>	128
Gambar 4.29	<i>Sinyal kontrol untuk kontroler Proportional Integral pada reference PWM 50 dan set point jarak (8 cm)</i>	129
Gambar 4.30	<i>Sinyal PWM motor DC kiri untuk kontroler Proportional Integral pada reference PWM 50 dan set point jarak (8 cm)</i>	130

Gambar 4.31a	<i>Output proses variabel atau nilai bacaan sensor ultrasonic kontroler Proportional Integral Derivative untuk reference PWM 50 dan set point jarak (8 cm)</i>	131
Gambar 4.31b	<i>Output proses variabel atau nilai bacaan sensor ultrasonic kontroler Proportional Integral Derivative untuk reference PWM 50 dan set point jarak (8 cm) (perbesar/zoom)</i>	131
Gambar 4.32	<i>Sinyal error untuk kontroler Proportional Integral Derivative untuk reference PWM 50 dan set point jarak (8 cm)</i>	132
Gambar 4.33	<i>Sinyal kontrol untuk kontroler Proportional Integral Derivative dengan reference PWM 50 dan set point jarak (8 cm)</i>	133
Gambar 4.34	<i>Sinyal PWM motor DC kiri untuk kontroler PID dengan reference PWM 50 dan set point jarak (8 cm)</i>	134
Gambar 4.35	<i>Output proses variabel atau nilai bacaan sensor ultrasonic kontroler P (ungu), PI (biru) dan PID (hijau) untuk reference PWM 50 dan set point jarak (8 cm)</i>	135
Gambar 4.36	<i>Sinyal error untuk kontroler P (biru), PI (merah) dan PID (hijau) dengan reference PWM 50 dan set point jarak (8 cm)</i>	136
Gambar 4.37	<i>Sinyal kontrol untuk kontroler P (orange), PI (ungu) dan PID (biru) dengan reference PWM 50 dan set point jarak (8 cm)</i>	137

Gambar 4.38 Sinyal PWM motor DC kiri untuk kontrol P (hijau), PI (ungu) dan PID (merah) pada <i>reference</i> PWM 50 dan <i>set point</i> jarak (8)	138
Gambar 4.39 <i>Output</i> proses variabel untuk kontroler PID pada uji arena KRCI tanpa <i>uneven floor</i> dan <i>furniture</i> pada <i>reference</i> PWM 50 dan <i>set point</i> jarak (8cm)	139
Gambar 4.40 <i>Output</i> proses variabel untuk kontroler PID pada uji arena KRCI menggunakan <i>uneven floor</i> dan <i>furniture</i> pada <i>reference</i> PWM 50 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	140
Gambar 4.41 <i>Output error</i> untuk kontroler PID pada uji arena KRCI tanpa <i>uneven floor</i> dan <i>furniture</i> dengan <i>reference</i> PWM 50 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	141
Gambar 4.42 <i>Output error</i> untuk kontroler PID pada uji arena KRCI dengan <i>uneven floor</i> dan <i>furniture</i> dengan <i>reference</i> PWM 50 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	141
Gambar 4.43 Sinyal kontrol untuk kontroler PID pada uji arena KRCI tanpa <i>uneven floor</i> dan <i>furniture</i> dengan <i>reference</i> PWM 50 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	142
Gambar 4.44 Sinyal kontrol untuk kontroler PID pada uji arena KRCI menggunakan <i>uneven floor</i> dan <i>furniture</i> dengan <i>reference</i> PWM 50 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	143
Gambar 4.45a <i>Output</i> proses variabel untuk kontroler <i>Proportional</i> dengan <i>reference</i> PWM 75 <i>set point</i> jarak (8 cm)	144

Gambar 4.45b <i>Output proses variabel untuk kontroler Proportional</i> dengan <i>reference PWM 75 set point</i> jarak (8 cm) (diperbesar/zoom)	145
Gambar 4.46 <i>Sinyal error untuk kontroler Proportional</i> dengan <i>reference PWM 75 set point jarak (8 cm)</i>	146
Gambar 4.47 <i>Sinyal kontrol untuk kontroler Proportional</i> dengan <i>reference PWM 75 set point jarak (8 cm)</i>	147
Gambar 4.48 <i>Sinyal PWM motor DC kiri untuk kontroler Proportional</i> dengan <i>reference PWM 75 set point jarak (8 cm)</i>	148
Gambar 4.49a <i>Output proses variabel untuk kontroler Proportional</i> <i>Integral</i> dengan <i>reference PWM 75 dan</i> <i>set point jarak (8 cm)</i>	149
Gambar 4.49b <i>Output proses variabel untuk kontroler Proportional</i> <i>Integral</i> dengan <i>reference PWM 75 dan</i> <i>set point jarak (8 cm) (diperbesar/zoom)</i>	150
Gambar 4.50 <i>Sinyal error untuk kontroler Proportional Integral</i> dengan <i>reference PWM 75 dan set point jarak (8 cm)</i>	151
Gambar 4.51 <i>Sinyal kontrol untuk kontroler Proportional Integral</i> dengan <i>reference PWM 75 dan set point jarak (8cm)</i>	152
Gambar 4.52 <i>Sinyal PWM motor DC kiri untuk kontroler Proportional</i> <i>Integral</i> dengan <i>reference PWM 75</i> dan <i>set point jarak (8cm)</i>	153

Gambar 4.53a	<i>Output proses variabel untuk kontroler Proportional</i>	
	<i>Integral Derivative untuk reference PWM 75</i>	
	dan <i>set point</i> jarak (8cm)	154
Gambar 4.53b	<i>Output proses variabel untuk kontroler Proportional</i>	
	<i>Integral Derivative untuk reference PWM 75</i>	
	dan <i>set point</i> jarak (8cm) (diperbesar/zoom)	155
Gambar 4.54	<i>Sinyal error untuk kontroler Proportional Integral</i>	
	<i>Derivative untuk reference PWM 75</i>	
	dan <i>set point</i> jarak (8cm)	156
Gambar 4.55	<i>Sinyal kontrol untuk kontroler Proportional Integral</i>	
	<i>Derivative dengan reference PWM 75 dan</i>	
	<i>set point</i> jarak (8cm)	157
Gambar 4.56	<i>Sinyal PWM motor DC kiri untuk kontroler Proportional</i>	
	<i>Integral Derivative dengan reference PWM 75</i>	
	dan <i>set point</i> jarak (8cm)	158
Gambar 4.57	<i>Output proses variabel kontroler P (hitam) hijau PI (hitam)</i>	
	dan PID (merah) untuk <i>reference PWM 75</i>	
	dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	159
Gambar 4.58	<i>Sinyal error untuk kontroler P (hitam), PI (merah) dan</i>	
	<i>PID (biru) dengan reference PWM 75 untuk</i>	
	<i>set point</i> jarak (8cm)	160
Gambar 4.59	<i>Sinyal kontrol untuk kontroler P (hijau), PI (orange) dan</i>	
	<i>PID (ungu) reference PWM 75 dan</i>	
	<i>set point</i> jarak (8 cm)	161

Gambar 4.60	Sinyal PWM motor DC kontroler untuk P (hitam), PI (hijau) dan PID (biru) dengan <i>reference</i> PWM 75 <i>set point</i> jarak (8 cm)	162
Gambar 4.61	<i>Output</i> proses variabel pada uji arena KRCI tanpa <i>uneven floor</i> dan <i>furniture</i> untuk <i>reference</i> PWM 75 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	163
Gambar 4.62	<i>Output</i> proses variabel pada uji arena KRCI dengan <i>uneven floor</i> dan <i>furniture</i> untuk <i>reference</i> PWM 75 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	163
Gambar 4.63	Sinyal <i>error</i> pada uji arena KRCI tanpa <i>uneven floor</i> dan <i>furniture</i> untuk <i>reference</i> PWM 75 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	164
Gambar 4.64	Sinyal <i>error</i> pada uji arena KRCI tanpa <i>uneven floor</i> dan <i>furniture</i> untuk <i>reference</i> PWM 75 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	165
Gambar 4.65	Sinyal kontrol untuk kontroler PID pada uji arena KRCI tanpa <i>uneven floor</i> dan <i>furniture</i> untuk <i>reference</i> PWM 75 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	166
Gambar 4.66	Sinyal kontrol untuk kontroler PID pada uji arena KRCI dengan <i>uneven floor</i> dan <i>furniture</i> untuk <i>reference</i> PWM 75 dan <i>set point</i> jarak (8 cm)	167