

# IMPLEMENTASI KONTROL PID PADA PENDULUM TERBALIK MENGGUNAKAN PENGONTROL MIKRO AVR ATMEGA 16

Disusun Oleh:

**Nama : Earline Ignacia Sutanto**

**NRP : 0622012**

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

**email : juve\_linear@yahoo.com**

## ABSTRAK

Sistem kontrol merupakan sebuah sistem yang terdiri atas satu atau beberapa peralatan yang berfungsi untuk mengontrol sistem lain yang berhubungan dengan sebuah proses. Salah satu contoh pengontrol adalah PID. Pengontrol PID memiliki algoritma yang sederhana, persamaan tunggal tetapi dapat menyediakan hasil kontrol yang baik untuk beberapa proses yang berbeda.

Dalam Tugas Akhir ini telah dirancang dan direalisasikan Pengontrol PID pada sebuah pendulum terbalik menggunakan pengontrol mikro AVR ATMega16. Sistem pendulum terbalik mensimulasikan sebuah mekanisme kontrol untuk mengatasi permasalahan kestabilan. Pendulum terbalik sendiri merupakan salah satu *plant* yang dinamis sehingga proses pengaturannya menjadi lebih rumit apabila menggunakan teknik kontrol *on/off* saja.

*Input* sistem berupa sudut referensi dan diberi pengontrol PID ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) yang berbasis pengontrol mikro AVR ATMega 16. Metoda *Trial and Error* agar  $error \pm 3^\circ$  maka didapat  $K_p = 9.8$ ,  $K_i = 0$ , dan  $K_d = 0.27$ . Pengontrol mikro AVR ATMega 16 memberikan sinyal kepada motor DC yang ada pada sistem pendulum terbalik untuk bergerak. Sensor sudut akan mengukur sudut aktual (*output*) dari sistem pendulum terbalik tersebut. Jika sensor sudut mendeteksi adanya  $error \pm 3^\circ$  dari sudut referensi yang berarti  $error \neq 0$ , maka pengontrol mikro AVR ATMega 16 akan memberi sinyal kepada motor DC agar terus bergerak sehingga pendulum terbalik dapat berdiri.

Dari semua percobaan yang dilakukan, pengontrolan pendulum terbalik dengan menggunakan pengontrol PID di setiap sudut awal yang berbeda pada batang pendulum menghasilkan rata-rata *error* yang lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan pengontrol Proporsional dan pengontrol *on/off*, perbandingan waktu bertahan pendulum PID=6.4s, P=4.2s, dan *on / off* =3.5s dan perbandingan rata – rata *error* PID=3.8°, P=4.7°, dan *on / off* =8.9°. Pengontrol PID menggunakan pengontrol mikro AVR ATMega 16 dapat dikembangkan untuk *plant* pendulum terbalik yang lintasannya berbentuk lingkaran.

**Kata Kunci** : Sistem Kontrol, Pendulum Terbalik, ATMEGA16, pengontrol PID, *Motor Driver*.

# PID CONTROL IMPLEMENTATION OF AN INVERTED PENDULUM USING AVR ATMEGA 16 MICROCONTROLLER

Composed by:

**Name : Earline Ignacia Sutanto**

**NRP : 0622012**

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

**email : juve\_linear@yahoo.com**

## ABSTRACT

*Control system is a system consisting of one or more devices that function to other systems associated with a process. One example is the PID controller. PID controller has a simple algorithm, single equation but can provide good control result for several different processes.*

*In this Final Project has been designed and realized PID controller on an inverted pendulum using AVR ATmega16 microcontrollers. An inverted pendulum system simulates control mechanism to overcome the stability problems. Inverted pendulum is one of the dynamic plant so that the process becomes more complicated settings when using the technique of control on / off only.*

*Input to the system is a reference angle and given a PID controller ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) based of AVR ATmega 16 microcontroller. By using the method of Trial and Error for error is  $\pm 3^\circ$  so  $K_p = 9.8$ ,  $K_i = 0$ , and  $K_d = 0.27$ . AVR ATmega 16 microcontroller provides signals to DC motor on an inverted pendulum system to move. Angle sensor will measure the actual angle (output) of an inverted pendulum system. If the sensor detects an error  $\pm 3^\circ$  from the angle reference, which means error  $\neq 0$ , then the AVR ATmega 16 microcontroller will give a signal to a DC motor to keep moving so that an inverted pendulum can stand.*

*Of all the experiments, inverted pendulum control using PID controller in every different angle of the beginning in a pendulum rod produces an average error smaller than by using proportional controller and on / off controller, the survival time of the pendulum PID=6.4s, P=4.2s, and on / off =3.5s and the average error ratio PID=3.8°, P=4.7°, and on / off =8.9°. PID controller using AVR ATmega 16 microcontroller can be developed for inverted pendulum plant a circular path.*

**Key Word :** Control System, inverted pendulum, ATMEGA 16, PID Controller, Motor Driver.

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	iii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	v
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	ix
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	x
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
I.1 Latar Belakang .....	1
I.2 Identifikasi Masalah .....	2
I.3 Perumusan Masalah .....	2
I.4 Tujuan.....	2
I.5 Pembatasan Masalah .....	2
I.6 Sistematika Pembahasan .....	3
<b>BAB II LANDASAN TEORI</b>	
II.1 Dasar Sistem Kontrol .....	5
II.2 Sistem Kontrol <i>Closed loop</i> .....	6
II.3 Pengontrol Proporsional – Integral – Derivatif .....	6
II.3.1 Aksi Pengontrol Proporsional .....	8
II.3.2 Aksi Pengontrol Integral .....	8
II.3.3 Aksi Pengontrol Derivatif .....	9
II.3.4 Rangkuman Aksi Pengontrol Proporsional, Integral, dan Derivatif.....	10
II.5 Plant Pendulum Terbalik .....	11
II.6 <i>Motor Driver</i> .....	12
II.7 Pengontrol Mikro .....	13
II.7.1 Pengontrol Mikro ATMEGA16 .....	13
II.7.1.1 Fitur ATMEGA16 .....	14
II.7.1.2 Konfigurasi <i>Pin</i> ATMEA16.....	15
II.7.1.3 Diagram Blok ATMEGA16.....	17

II.7.1.4	Peta Memori ATMEGA16.....	18
II.7.1.5	PWM ( <i>Pulse Width Modulation</i> ) ATmega16 .....	20
II.7.1.6	<i>Pin Input/Output</i> ATMEGA16 .....	22
<b>BAB III PERANCANGAN DAN REALISASI</b>		
III.1	Perancangan Sistem Pendulum Terbalik .....	23
III.1.1	Diagram Blok Sistem Pendulum Terbalik .....	23
III.2	Perancangan dan Realisasi Rangkaian <i>Motor Driver</i> dan Pengontrol..	24
III.2.1	<i>Motor Driver</i> .....	24
III.2.2	Pengontrol.....	25
III.2.2.1	ADC .....	25
III.2.2.2	Skematik Pengontrol Berbasis Pengontrol Mikro ATMEGA 16 .....	26
III.2.2.3	Algoritma Pemograman pada Pengontrol Mikro AVR ATmega 16.....	28
III.2.2.4	Pengontrol Motor DC.....	31
III.2.2.5	Pengontrol PID .....	33
<b>BAB IV DATA PENGAMATAN DAN ANALISA</b>		
IV.1	Pengujian Pendulum Terbalik dengan Menggunakan Pengontrol <i>On/Off</i> .....	42
IV.2	Pengujian Keluaran sinyal kontrol di Pengontrol Mikro AVR ATmega 16 Pada Pendulum Terbalik dengan Menggunakan Pengontrol PID....	50
IV.3	Pengujian Pendulum Terbalik dengan Menggunakan Pengontrol PID.	51
IV.4	Pengujian Pendulum Terbalik dengan Menggunakan Pengontrol Proporsional.....	59
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>		
V.1	Kesimpulan.....	68
V.2	Saran.....	68
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>		
<b>LAMPIRAN – A Program pada Pengontrol Mikro AVR ATMEGA16</b>		
<b>LAMPIRAN – B Foto Alat</b>		
<b>LAMPIRAN – C Datasheet</b>		

## DAFTAR TABEL

	Halaman
1. Tabel 2.1 Tabel Karakteristik Pengontrol PID .....	11
2. Tabel 2.2 Tabel Kebenaran <i>Motor Driver</i> .....	13
3. Tabel 2.3 Fungsi Khusus Port B .....	16
4. Tabel 2.4 Fungsi Khusus Port C .....	16
5. Tabel 2.5 Fungsi Khusus Port D .....	17
6. Tabel 2.6 Konfigurasi <i>Port</i> ATMEGA16.....	22
7. Tabel 4.1 Pengujian Pendulum Terbalik dengan Menggunakan Pengontrol <i>On/Off</i> .....	49
8. Tabel 4.2 Pengujian Pendulum Terbalik dengan Menggunakan Pengontrol PID .....	58
9. Tabel 4.3 Pengujian Pendulum Terbalik dengan Menggunakan Pengontrol Proporsional .....	66

## DAFTAR GAMBAR

		Halaman
1.	Gambar 1.1 Pendulum Terbalik .....	3
2.	Gambar 2.1 Diagram Blok Sistem Kontrol <i>Closed Loop</i> .....	6
3.	Gambar 2.2 Diagram Blok Pengontrol Proporsional – Integral – Derivatif.....	7
4.	Gambar 2.3 Diagram Alir Pengontrol Proporsional .....	8
5.	Gambar 2.4 Diagram Alir Pengontrol Integral .....	9
6.	Gambar 2.5 Diagram Alir Pengontrol Derivatif .....	10
7.	Gambar 2.6 Pendulum Terbalik .....	11
8.	Gambar 2.7 Diagram Blok <i>Motor Driver</i> .....	12
9.	Gambar 2.8 Konfigurasi <i>Pin</i> ATMEGA16.....	15
10.	Gambar 2.9 Diagram Blok ATMEGA16 .....	18
11.	Gambar 2.10 Pemetaan Memori ATMEGA16 .....	19
12.	Gambar 2.11 Pemetaan Memori Data ATMEGA16.....	20
13.	Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem Pendulum Terbalik.....	23
14.	Gambar 3.2 Alokasi <i>Pin Driver</i> Motor (SGS – Thompson).....	25
15.	Gambar 3.3 Skematik Pengontrol Berbasis Pengontrol Mikro AT MEGA 16 .....	27
16.	Gambar 3.4 Diagram Alir Pendulum Terbalik .....	29
17.	Gambar 3.5 Diagram Alir Perhitungan dari PID .....	30
18.	Gambar 3.6 Respon Saat PID = 2. ....	32
19.	Gambar 3.7 Respon Saat PID = 4 .. ....	32
20.	Gambar 3.8 Respon <i>Plant</i> Pendulum Terbalik dengan $K_p = 1$ , $K_i = 0$ , dan $K_d = 0$ .....	34
21.	Gambar 3.9 Respon <i>Plant</i> Pendulum Terbalik dengan $K_p = 10$ , $K_i = 0$ , dan $K_d = 0$ . ....	34
22.	Gambar 3.10 Respon <i>Plant</i> Pendulum Terbalik dengan $K_p = 10.8$ , $K_i = 0$ , dan $K_d = 0$ .....	35

23. Gambar 3.11	Respon <i>Plant</i> Pendulum Terbalik dengan $K_p = 9.9$ , $K_i = 0$ , dan $K_d = 0$ .....	35
24. Gambar 3.12	Respon <i>Plant</i> Pendulum Terbalik dengan $K_p = 9.8$ , $K_i = 0$ , dan $K_d = 0$ .....	36
25. Gambar 3.13	Respon <i>Plant</i> Pendulum Terbalik dengan $K_p = 9$ , $K_i = 0$ , dan $K_d = 0$ .....	36
26. Gambar 3.14	Respon <i>Plant</i> Pendulum Terbalik dengan $K_p = 9.8$ , $K_i = 0$ , dan $K_d = 0.1$ .....	37
27. Gambar 3.15	Respon <i>Plant</i> Pendulum Terbalik dengan $K_p = 9.8$ , $K_i = 0$ , dan $K_d = 0.2$ .....	37
28. Gambar 3.16	Respon <i>Plant</i> Pendulum Terbalik dengan $K_p = 9.8$ , $K_i = 0$ , dan $K_d = 0.3$ .....	38
29. Gambar 3.17	Respon <i>Plant</i> Pendulum Terbalik dengan $K_p = 9.8$ , $K_i = 0$ , dan $K_d = 0.4$ .....	38
30. Gambar 3.18	Respon <i>Plant</i> Pendulum Terbalik dengan $K_p = 9.8$ , $K_i = 0$ , dan $K_d = 0.5$ .....	39
31. Gambar 3.19	Respon <i>Plant</i> Pendulum Terbalik dengan $K_p = 9.8$ , $K_i = 0$ , dan $K_d = 0.17$ .....	40
32. Gambar 3.20	Respon <i>Plant</i> Pendulum Terbalik dengan $K_p = 9.8$ , $K_i = 0$ , dan $K_d = 0.25$ .....	40
33. Gambar 3.21	Respon <i>Plant</i> Pendulum Terbalik dengan $K_p = 9.8$ , $K_i = 0$ , dan $K_d = 0.27$ .....	41
34. Gambar 4.1	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol <i>On/Off</i> dengan sudut awal = $0^\circ$ .....	42
35. Gambar 4.2	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol <i>On/Off</i> sudut awal = $5^\circ$ .....	43
36. Gambar 4.3	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol <i>On/Off</i> dengan sudut awal = $10^\circ$ .....	43
37. Gambar 4.4	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol <i>On/Off</i> dengan sudut awal = $15^\circ$ .....	44

38. Gambar 4.5	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol <i>On/Off</i> dengan sudut awal = 20° .....	44
39. Gambar 4.6	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol <i>On/Off</i> dengan sudut awal = 25° .....	45
40. Gambar 4.7	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol <i>On/Off</i> dengan sudut awal = 30° .....	45
41. Gambar 4.8	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol <i>On/Off</i> dengan sudut awal = -5° .....	46
42. Gambar 4.9	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol <i>On/Off</i> dengan sudut awal = -10° .....	46
43. Gambar 4.10	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol <i>On/Off</i> dengan sudut awal = -15° .....	47
44. Gambar 4.11	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol <i>On/Off</i> dengan sudut awal = -20° .....	47
45. Gambar 4.12	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol <i>On/Off</i> dengan sudut awal = -25° .....	48
46. Gambar 4.13	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol <i>On/Off</i> dengan sudut awal = -30° .....	48
47. Gambar 4.14	Hasil Pengujian Rata – Rata Sinyal Kontrol dengan sudut awal = 0° .....	50
48. Gambar 4.15	Hasil Pengujian Rata – Rata Sinyal Kontrol dengan sudut awal = 10° .....	51
49. Gambar 4.16	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol PID dengan sudut awal = 0° .....	51
50. Gambar 4.17	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol PID dengan sudut awal = 5° .....	52
51. Gambar 4.18	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol PID dengan sudut awal = 10° .....	52
52. Gambar 4.19	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol PID dengan sudut awal = 15° .....	53



53. Gambar 4.20	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol PID dengan sudut awal = $20^\circ$ .....	53
54. Gambar 4.21	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol PID dengan sudut awal = $25^\circ$ .....	54
55. Gambar 4.22	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol PID dengan sudut awal = $30^\circ$ .....	54
56. Gambar 4.23	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol PID dengan sudut awal = $-5^\circ$ .....	55
57. Gambar 4.24	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol PID dengan sudut awal = $-10^\circ$ .....	55
58. Gambar 4.25	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol PID dengan sudut awal = $-15^\circ$ .....	56
59. Gambar 4.26	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol PID dengan sudut awal = $-20^\circ$ .....	56
60. Gambar 4.27	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol PID dengan sudut awal = $-25^\circ$ .....	57
61. Gambar 4.28	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol PID dengan sudut awal = $-30^\circ$ .....	57
62. Gambar 4.29	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol Proporsional dengan sudut awal = $0^\circ$ .....	59
63. Gambar 4.30	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol Proporsional dengan sudut awal = $5^\circ$ .....	60
64. Gambar 4.31	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol Proporsional dengan sudut awal = $10^\circ$ .....	60
65. Gambar 4.32	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol Proporsional dengan sudut awal = $15^\circ$ .....	61
66. Gambar 4.33	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol Proporsional dengan sudut awal = $20^\circ$ .....	61
67. Gambar 4.34	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol Proporsional dengan sudut awal = $25^\circ$ .....	62

68. Gambar 4.35	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol Proporsional dengan sudut awal = $30^\circ$ .....	62
69. Gambar 4.36	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol Proporsional dengan sudut awal = $-5^\circ$ .....	63
70. Gambar 4.37	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol Proporsional dengan sudut awal = $-10^\circ$ .....	63
71. Gambar 4.38	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol Proporsional dengan sudut awal = $-15^\circ$ .....	64
72. Gambar 4.39	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol Proporsional dengan sudut awal = $-20^\circ$ .....	64
73. Gambar 4.40	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol Proporsional dengan sudut awal = $-25^\circ$ .....	65
74. Gambar 4.41	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik Menggunakan Pengontrol Proporsional dengan sudut awal = $-30^\circ$ .....	65