BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

Pengujian dan analisa sistem merupakan tahap akhir dari realisasi pengendali PID pada pendulum terbalik menggunakan mikrokontroller ATmega8 agar dapat dilinearkan disekitar titik kesetimbangan. Tahap ini merupakan tahap yang paling penting untuk mengetahui tingkat keberhasilan, keunggulan dan kekurangan dari sistem tersebut. Dengan begitu kita dapat mengetahui sistem yang telah direalisasikan menghasilkan keluaran yang diinginkan. Pengujian dan analisa yang dilakukan meliputi sistem secara keseluruhan.

4.1. Model Sistem

Pertama-tama hal yang dilakukan dalam tugas akhir ini adalah mencari model dinamik sistem pendulum terbalik berupa *transfer function*. Pada dasarnya ada dua metode untuk mencari model dinamik, yang pertama adalah dengan menurunkan persamaan sistem pendulum terbalik yaitu melakukan pengukuran fisik pendulum. Yang kedua, dengan cara identifikasi yaitu tidak melakukan pengukuran.

Dalam hal ini, metode identifikasi yang digunakan penulis untuk mencari *transfer function* yaitu mendekati *transfer function* dari contoh kasus untuk memperoleh fungsi transfer baru yang akan digunakan dalam sistem ini, caranya adalah dengan merekam input dan outpunya saja.

This page was created using **NitroPDF** trial software.
To purchase, go to http://www.nitropdf.com/

4.2. Model Sistem *Open Loop*

Pada bagian sebelumnya telah dijelaskan bahwa pendulum terbalik merupakan sistem dinamik yang tidak stabil. Pendulum terbalik yang belum dilengkapi dengan pengendali (*openloop*) akan berperilaku tidak stabil apabila diberikan input.

Tabel *open loop* dibawah ini adalah hasil data akuisisi yang dibaca oleh ADC dengan memberikan gangguan, serta merekam outputnya. Dimana *sampling rate*nya adalah 50Hz.

Tabel 4.1 *Open loop* sistem

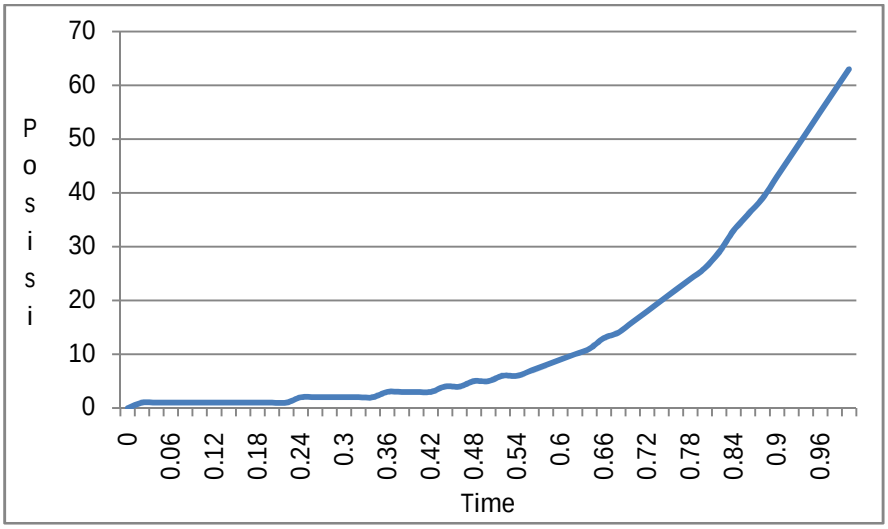
Time	Posisi (bit)
0	0
0.02	1
0.04	1
0.06	1
0.08	1
0.1	1
0.12	1
0.14	1
0.16	1
0.18	1
0.2	1
0.22	1
0.24	2
0.26	2
0.28	2
0.3	2
0.32	2
0.34	2
0.36	3
0.38	3
0.4	3
0.42	3
0.44	4
0.46	4

This page was created using **NitroPDF** trial software.
To purchase, go to http://www.nitropdf.com/

0.48	5
0.5	5
0.52	6
0.54	6
0.56	7
0.58	8
0.6	9
0.62	10
0.64	11
0.66	13
0.68	14
0.7	16
0.72	18
0.74	20
0.76	22
0.78	24
0.8	26
0.82	29
0.84	33
0.86	36
0.88	39
0.9	43
0.92	47
0.94	51
0.96	55
0.98	59
1	63

Dibawah ini adalah hasil data respon sistem pendulum terbalik yang di gambarkan dalam kurva. Dari gambar dapat dilihat bahwa respon pendulum terbalik tidak stabil. Karena respon posisi pendulum terhadap waktu yang dibaca oleh pendulum semakin bertambah.

This page was created using **NitroPDF** trial software.
To purchase, go to http://www.nitropdf.com/

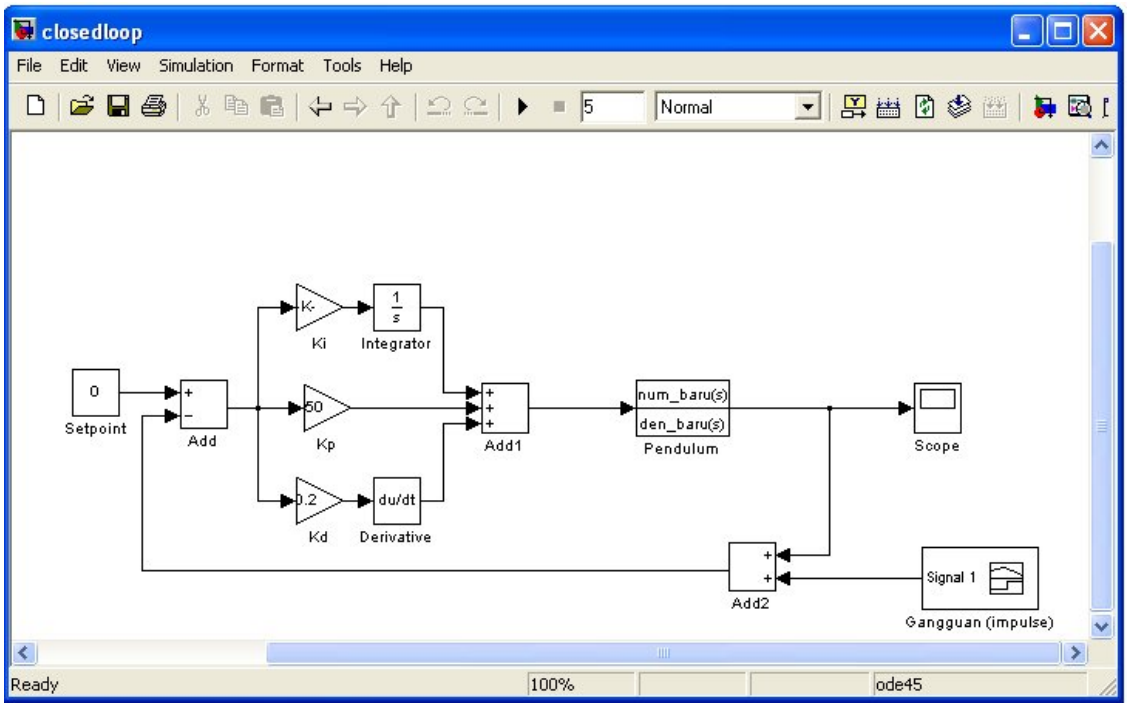


Gambar 4.1 Respon *open loop* sistem pendulum terbalik

4.3. Model Sistem *Closedloop*

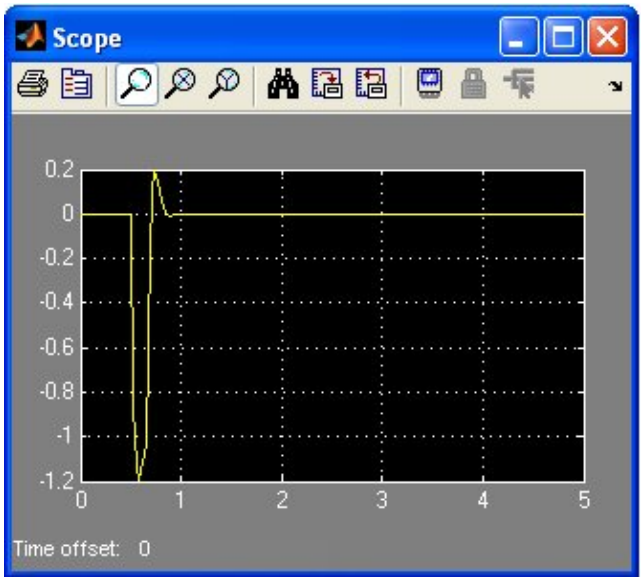
Model sistem *closedloop* adalah model sistem *open loop* yang telah ditambahkan *controller*. Jika pada *open loop* respon pendulum terbalik belum stabil, maka pada *closedloop* ini responnya akan stabil terhadap input yang diberikan. Fungsi transfer yang telah diperoleh, digunakan dalam blok *simulink closedloop system* yang dapat dilihat pada Gambar 4.2. Pada gambar ini terdapat tiga gain *controller* yaitu Kp, Ki, dan Kd. Penentuan nilai dari masing-masing *gain* dilakukan berdasarkan *trial and error*. Nilai dari *gain-gain* yang dipilih pada mode ini adalah Kp = 50 dan Kd = 0,2. Nilai *gain-gain* ini akan diimplementasikan kedalam mikrokontroller.

This page was created using **NitroPDF** trial software.
To purchase, go to http://www.nitropdf.com/



Gambar 4. 2 Blok *simulink closedloop system*

Hasil dari simulasi diagram blok Gambar 4.2 dapat dilihat pada Gambar 4.3. Pada gambar ini menunjukkan bahwa respon pendulum terbalik setelah diberikan *controller* maka sistemnya akan stabil.



Gambar 4.3 Respon pendulum terbalik

This page was created using **NitroPDF** trial software.
To purchase, go to http://www.nitropdf.com/

Walaupun sistem pendulum terbalik telah menghasilkan respon yang stabil, namun pemberian input yang relatif besar atau diberi gangguan akan mempengaruhi kerja dari pendulum tersebut.

4.4. Pengujian Dengan Mengubah-ubah *Gain*

Pada pengujian ini, diambil beberapa *sample* untuk menghasilkan respon sistem pendulum yang stabil. Sebelumnya telah dijelaskan bahwa nilai *gain* Kp dan Kd disini sangat berpengaruh. Dalam hal ini gerakan pendulum terbalik akan dibatasi agar tidak mengalami simpangan melebihi kondisi yang diinginkan.

4.4.1. Mempertahankan *Gain* Kp, Ki Tetap & Kd Diubah-ubah

a. Hasil pengujian simulasi respon pendulum dengan nilai Kp = 50, Ki = 0,01 dan Kd = 0,1.

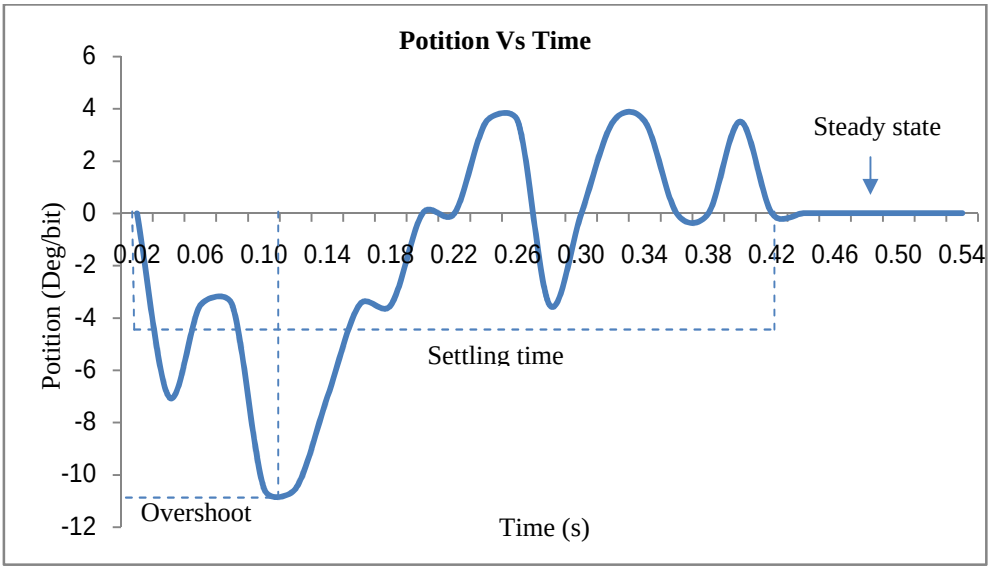
Tabel 4.2 Hasil pengujian pendulum terbalik

Time	Potition (bit)	PWM	Potition (Deg/bit)	ADC
0.02	0	1382	0	1000000100
0.04	-2	1492	-7,02	1000000010
0.06	-1	1537	-3,51	1000000011
0.08	-1	1587	-3,51	1000000011
0.10	-3	1747	-10,53	1000000001
0.12	-3	1843	-10,53	1000000001
0.14	-2	1843	-7,02	1000000000
0.16	-1	1843	-3,51	1000000011
0.18	-1	1843	-3,51	1000000011
0.20	0	1838	0	1000000100
0.22	0	1838	0	1000000100
0.24	1	1783	3,51	1000000101
0.26	1	1733	3,51	1000000101
0.28	-1	1793	-3,51	1000000011
0.30	0	1788	0	1000000100
0.32	1	1733	3,51	1000000101

This page was created using **NitroPDF** trial software.
To purchase, go to http://www.nitropdf.com/

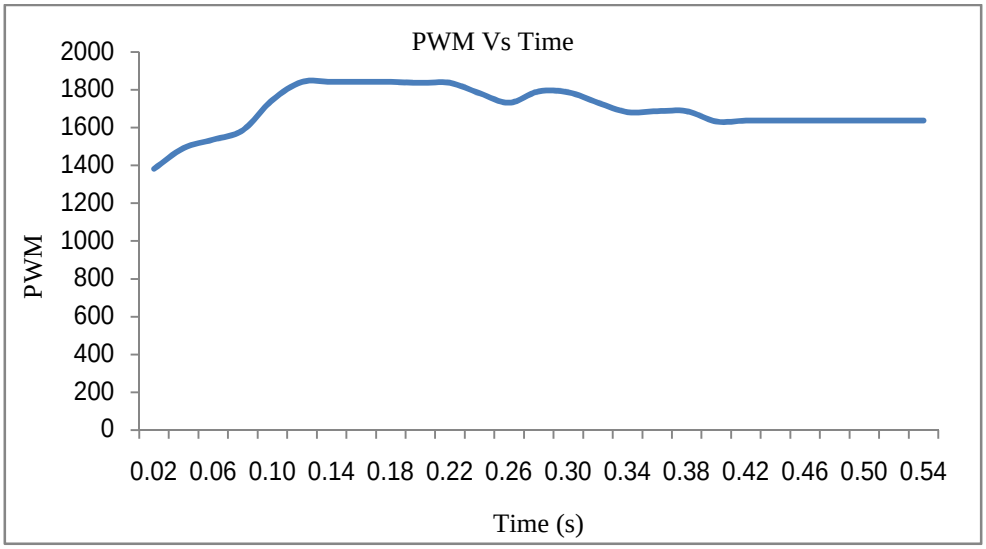
0.34	1	1683	3,51	1000000101
0.36	0	1688	0	1000000100
0.38	0	1688	0	1000000100
0.40	1	1633	3,51	1000000101
0.42	0	1638	0	1000000100
0.44	0	1638	0	1000000100
0.46	0	1638	0	1000000100
0.48	0	1638	0	1000000100
0.50	0	1638	0	1000000100
0.52	0	1638	0	1000000100
0.54	0	1638	0	1000000100

Dibawah ini akan memperlihatkan respon pendulum terbalik dan respon terhadap PWM



Gambar 4.4 Respon posisi pendulum Kp = 50, Ki = 0,01 & Kd = 0.1

This page was created using **NitroPDF** trial software.
To purchase, go to http://www.nitropdf.com/



Gambar 4.5 Respon PWM Kp = 50, Ki = 0,01 & Kd = 0,1

Dari hasil Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 terlihat bahwa pendulum terbalik mudah mencapai titik stabilnya, dimana setpoint yang diberikan adalah 0 (nol). Jelas terlihat pada Gambar 4.4 nilai *overshoot*nya sebesar -10,53 Deg/bit, *settling time*nya pun tidak terlalu besar dan waktu untuk mencapai *steady state*nya di detik 0,42. Dengan *gain* Kp, Ki dan Kd yang diberikan memperlihatkan respon pendulum terbalik sangat baik. Tetapi kita akan membandingkannya dengan *gain* Kp, Ki dan Kd lainnya.

This page was created using **NitroPDF** trial software.
To purchase, go to http://www.nitropdf.com/

4.4.2. Mempertahankan *Gain* Kp, Kd Tetap & Ki Diubah-ubah

a. Hasil pengujian simulasi respon pendulum dengan nilai Kp = 50, Ki = 0,01 dan Kd = 0,2.

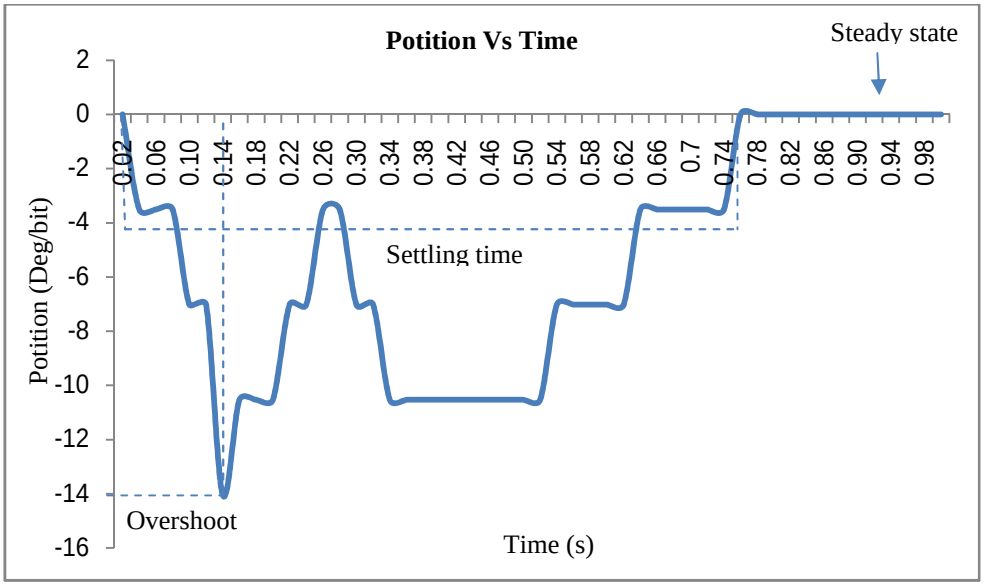
Tabel 4.3 Hasil pengujian pendulum terbalik

Time	Potition (Bit)	PWM	Potition (Deg/bit)	ADC
0.02	0	1382	0	1000000100
0.04	-1	1442	-3,51	1000000011
0.06	-1	1492	-3,51	1000000011
0.08	-1	1542	-3,51	1000000011
0.10	-2	1652	-7,02	1000000010
0.12	-2	1752	-7,02	1000000010
0.14	-4	1843	-14,04	1000000000
0.16	-3	1843	-10,53	1000000001
0.18	-3	1843	-10,53	1000000001
0.20	-3	1843	-10,53	1000000001
0.22	-2	1843	-7,02	1000000010
0.24	-2	1843	-7,02	1000000010
0.26	-1	1843	-3,51	1000000011
0.28	-1	1843	-3,51	1000000011
0.30	-2	1843	-7,02	1000000010
0.32	-2	1843	-7,02	1000000010
0.34	-3	1843	-10,53	1000000001
0.36	-3	1843	-10,53	1000000001
0.38	-3	1843	-10,53	1000000001
0.40	-3	1843	-10,53	1000000001
0.42	-3	1843	-10,53	1000000001
0.44	-3	1843	-10,53	1000000001
0.46	-3	1843	-10,53	1000000001
0.48	-3	1843	-10,53	1000000001
0.50	-3	1843	-10,53	1000000001
0.52	-3	1843	-10,53	1000000001
0.54	-2	1843	-7,02	1000000010
0.56	-2	1843	-7,02	1000000010
0.58	-2	1843	-7,02	1000000010
0.60	-2	1843	-7,02	1000000010
0.62	-2	1843	-7,02	1000000010
0.64	-1	1843	-3,51	1000000011
0.66	-1	1843	-3,51	1000000011

This page was created using **NitroPDF** trial software.
To purchase, go to http://www.nitropdf.com/

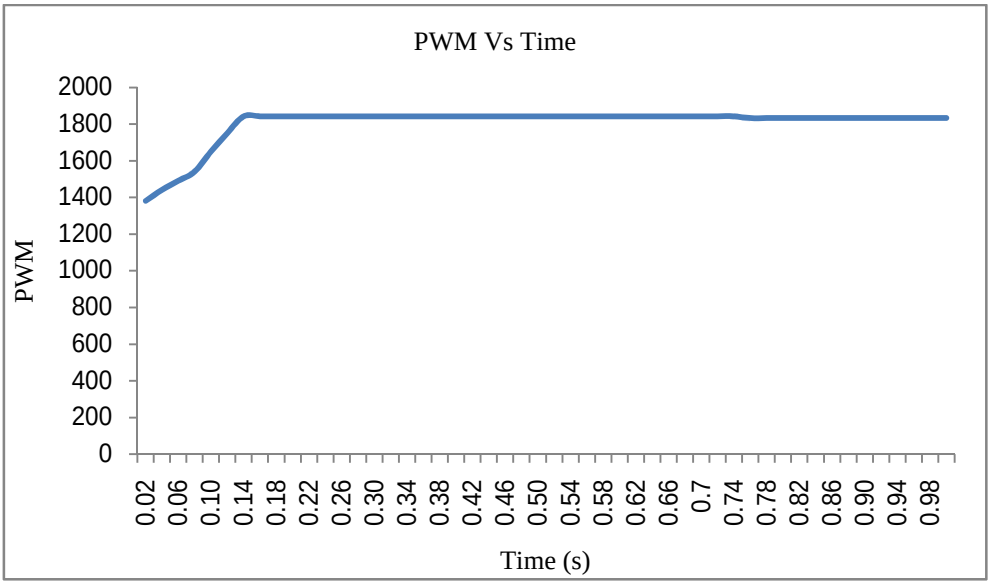
0.68	-1	1843	-3,51	1000000011
0.7	-1	1843	-3,51	1000000011
0.72	-1	1843	-3,51	1000000011
0.74	-1	1843	-3,51	1000000011
0.76	0	1833	0	1000000100
0.78	0	1833	0	1000000100
0.80	0	1833	0	1000000100
0.82	0	1833	0	1000000100
0.84	0	1833	0	1000000100
0.86	0	1833	0	1000000100
0.88	0	1833	0	1000000100
0.90	0	1833	0	1000000100
0.92	0	1833	0	1000000100
0.94	0	1833	0	1000000100
0.96	0	1833	0	1000000100
0.98	0	1833	0	1000000100
1.00	0	1833	0	1000000100

Respon posisi pendulum dapat dilihat pada Gambar 4.6 dan respon PWM dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.6 Respon posisi pendulum Kp = 50, Ki = 0,01 & Kd = 0,2

This page was created using **NitroPDF** trial software.
To purchase, go to http://www.nitropdf.com/



Gambar 4.7 Respon PWM Kp = 50, Ki = 0,01 & Kd = 0,2

Dari hasil pengujian diatas menunjukkan bahwa Gambar 4.6 memiliki banyak simpangan dimana *overshoot*nya sangat besar yaitu -14,04 Deg/bit. Dan waktu untuk mencapai *steady state*nya sangat lama yaitu pada 0,76s. Terlihat pendulum sulit mencapai posisi stabilnya. Dengan nilai Kp, Ki dan Kd ini, respon pendulum terbalik tidak terlalu baik dibandingkan dengan Kp = 50, Ki = 0,01 dan Kd = 0,1. Sehingga kita akan membandingkan dengan nilai yang lain.

This page was created using **NitroPDF** trial software.
To purchase, go to http://www.nitropdf.com/

b. Hasil Pengujian simulasi respon pendulum dengan nilai Kp = 50, Ki = 0,02 dan Kd = 0,2.

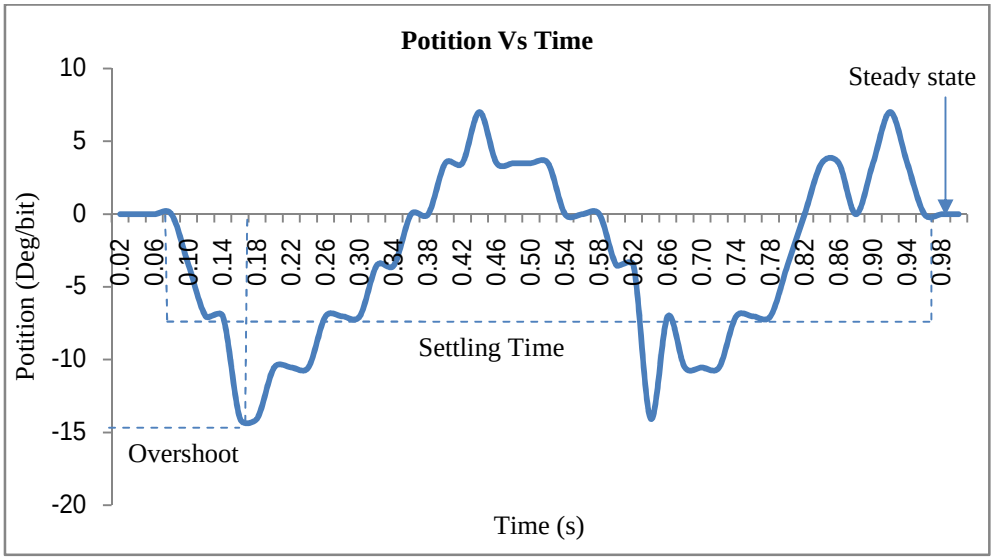
Tabel 4.4 Hasil pengujian pendulum terbalik

Time	Potition (Bit)	PWM	Potition (Deg/bit)	ADC
0.02	0	1633	0	1000000100
0.04	0	1633	0	1000000100
0.06	0	1633	0	1000000100
0.08	0	1633	0	1000000100
0.10	-1	1442	-3,51	1000000011
0.12	-2	1552	-7,02	1000000010
0.14	-2	1652	-7,02	1000000010
0.16	-4	1843	-14,04	1000000000
0.18	-4	1843	-14,04	1000000000
0.20	-3	1843	-10,53	1000000001
0.22	-3	1843	-10,53	1000000001
0.24	-3	1843	-10,53	1000000001
0.26	-2	1843	-7,02	1000000010
0.28	-2	1843	-7,02	1000000010
0.30	-2	1843	-7,02	1000000010
0.32	-1	1843	-3,51	1000000011
0.34	-1	1843	-3,51	1000000011
0.36	0	1833	0	1000000100
0.38	0	1833	0	1000000100
0.40	1	1773	3,51	1000000101
0.42	1	1723	3,51	1000000101
0.44	2	1613	7,02	1000000110
0.46	1	1573	3,51	1000000101
0.48	1	1523	3,51	1000000101
0.50	1	1473	3,51	1000000101
0.52	1	1423	3,51	1000000101
0.54	0	1433	0	1000000100
0.56	0	1433	0	1000000100
0.58	0	1433	0	1000000100
0.60	-1	1493	-3,51	1000000011
0.62	-1	1543	-3,51	1000000011
0.64	-4	1772	-14,04	1000000000
0.66	-2	1843	-7,02	1000000010
0.68	-3	1843	-10,53	1000000001
0.70	-3	1843	-10,53	1000000001

This page was created using **NitroPDF** trial software.
To purchase, go to http://www.nitropdf.com/

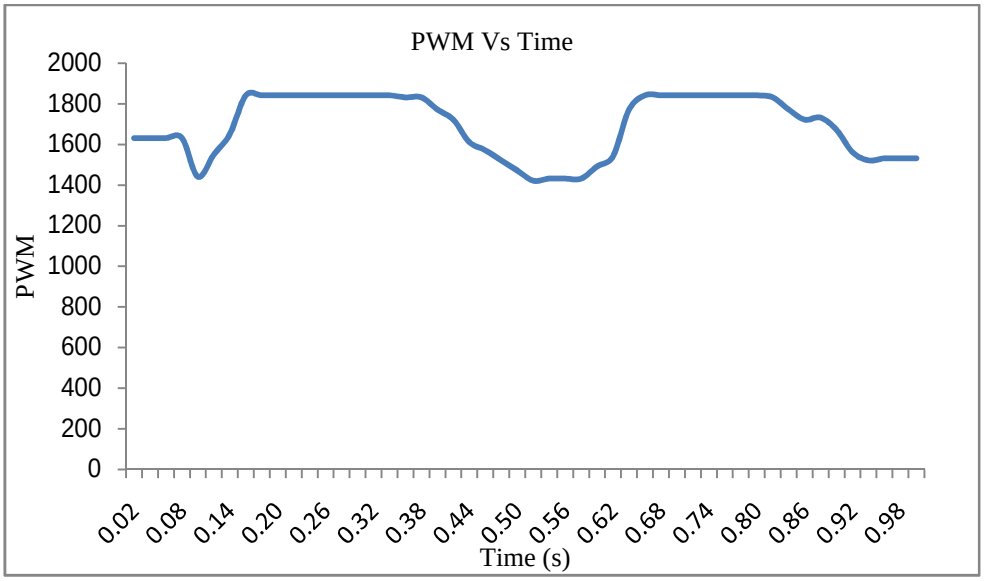
0.72	-3	1843	-10,53	1000000001
0.74	-2	1843	-7,02	1000000010
0.76	-2	1843	-7,02	1000000010
0.78	-2	1843	-7,02	1000000010
0.80	-1	1843	-3,51	1000000011
0.82	0	1833	0	1000000100
0.84	1	1773	3,51	1000000101
0.86	1	1723	3,51	1000000101
0.88	0	1733	0	1000000100
0.90	1	1673	3,51	1000000101
0.92	2	1563	7,02	1000000110
0.94	1	1523	3,51	1000000101
0.96	0	1533	0	1000000100
0.98	0	1533	0	1000000100
1.00	0	1533	0	1000000100

Respon posisi pendulum dapat dilihat pada Gambar 4.8 dan respon PWM dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.8 Respon posisi pendulum Kp = 50, Ki = 0,02 & Kd = 0,2

This page was created using **NitroPDF** trial software.
To purchase, go to http://www.nitropdf.com/



Gambar 4.9 Respon PWM Kp = 50, Ki = 0,02 & Kd = 0,2

Respon pendulum terbalik yang terlihat pada Gambar 4.8, *overshoot* yang terlalu besar, *settling time* yang sangat lama dan waktu untuk mencapai *steady state*nya yaitu pada waktu 0,96s. Sehingga dengan Kp, Ki dan Kd yang diberikan respon pendulum terbalik sulit mencapai posisi stabil yang diinginkan, dibandingkan dengan harga Kp = 50, Ki = 0,01 dan Kd = 0,1. Kita akan membandingkan dengan nilai yang lain untuk melihat respon pendulum terbalik yang lebih baik.

This page was created using **NitroPDF** trial software.
To purchase, go to http://www.nitropdf.com/

4.4.3. Mempertahankan *Gain* Kd, Ki Tetap & Kp Diubah-ubah

a. Hasil pengujian simulasi respon pendulum dengan nilai Kp = 10, Ki = 0,01 dan Kd = 0,2.

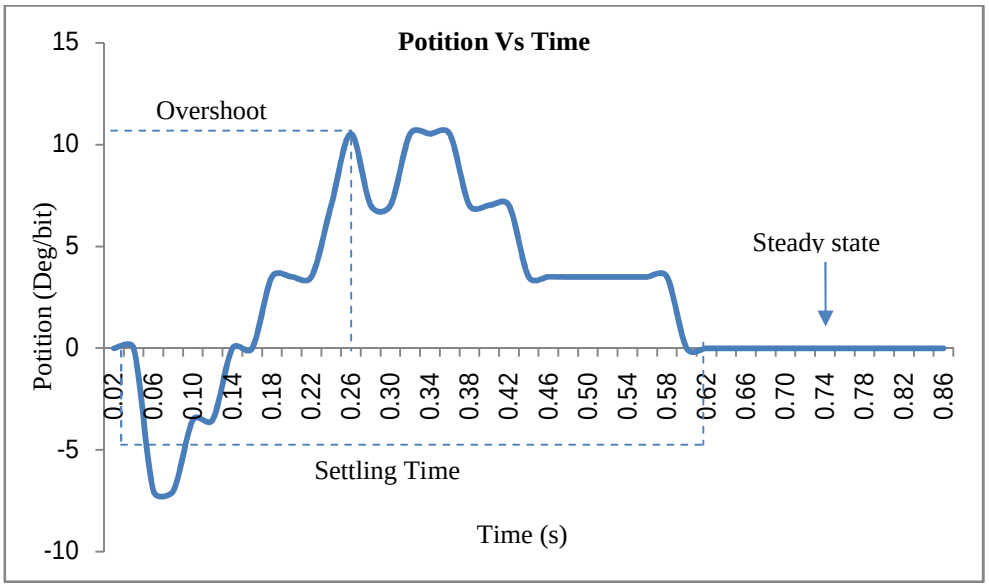
Tabel 4.5 Hasil pengujian pendulum terbalik

Time	Potition ADC (Bit)	PWM	Potition (Deg/bit)	ADC
0.02	0	1382	0	1000000100
0.04	0	1382	0	1000000100
0.06	-2	1422	-7,02	1000000010
0.08	-2	1442	-7,02	1000000010
0.10	-1	1442	-3,51	1000000011
0.12	-1	1452	-3,51	1000000011
0.14	0	1442	0	1000000100
0.16	0	1442	0	1000000100
0.18	1	1422	3,51	1000000101
0.20	1	1412	3,51	1000000101
0.22	1	1402	3,51	1000000101
0.24	2	1372	7,02	1000000110
0.26	3	1332	10,53	1000000111
0.28	2	1322	7,02	1000000110
0.30	2	1302	7,02	1000000110
0.32	3	1262	10,53	1000000111
0.34	3	1232	10,53	1000000111
0.36	3	1202	10,53	1000000111
0.38	2	1192	7,02	1000000110
0.40	2	1172	7,02	1000000110
0.42	2	1152	7,02	1000000110
0.44	1	1152	3,51	1000000101
0.46	1	1142	3,51	1000000101
0.48	1	1132	3,51	1000000101
0.50	1	1122	3,51	1000000101
0.52	1	1112	3,51	1000000101
0.54	1	1102	3,51	1000000101
0.56	1	1092	3,51	1000000101
0.58	1	1082	3,51	1000000101
0.60	0	1092	0	1000000100
0.62	0	1092	0	1000000100
0.64	0	1092	0	1000000100
0.66	0	1092	0	1000000100

This page was created using **NitroPDF** trial software.
To purchase, go to http://www.nitropdf.com/

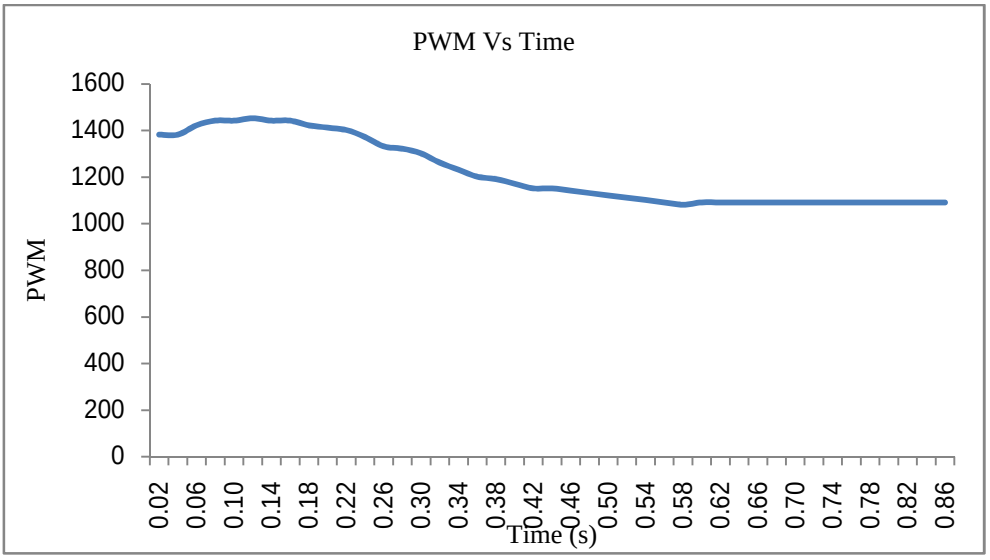
0.68	0	1092	0	1000000100
0.70	0	1092	0	1000000100
0.72	0	1092	0	1000000100
0.74	0	1092	0	1000000100
0.76	0	1092	0	1000000100
0.78	0	1092	0	1000000100
0.80	0	1092	0	1000000100
0.82	0	1092	0	1000000100
0.84	0	1092	0	1000000100
0.86	0	1092	0	1000000100

Pada Gambar 4.10 merupakan respon posisi pendulum dan Gambar 4.11 adalah respon PWM.



Gambar 4.10 Respon posisi pendulum Kp = 10, Ki = 0,01 & Kd = 0,2

This page was created using **NitroPDF** trial software.
To purchase, go to http://www.nitropdf.com/



Gambar 4.11 Respon PWM Kp = 10, Ki = 0,01 & Kd = 0,2

Dari hasil respon diatas yang diperlihatkan pada Gambar 4.10 menunjukkan *overshoot* yang turun menjadi -7,02 Deg/bit, waktu untuk mencapai *steady state*nya pun semakin berkurang bila dibandingkan dengan harga Kp, Ki dan Kd sebelumnya yaitu pada 0,6 s. Disini kita dapat menganalisa dari gambar bahwa pendulum terbalik dapat mencapai posisi stabilnya dengan cepat. Tetapi, jika dibandingkan dengan harga Kp = 50, Ki = 0,01 dan Kd = 0,1 respon pendulum terbalik untuk mencapai posisi stabilnya masih jauh lebih baik.

b. Hasil Pengujian simulasi respon pendulum dengan nilai Kp = 100, Ki = 0,01 dan Kd = 0,2. Pada Gambar 4.12 menunjukkan respon posisi pendulum dan Gambar 4.13 adalah respon PWM.

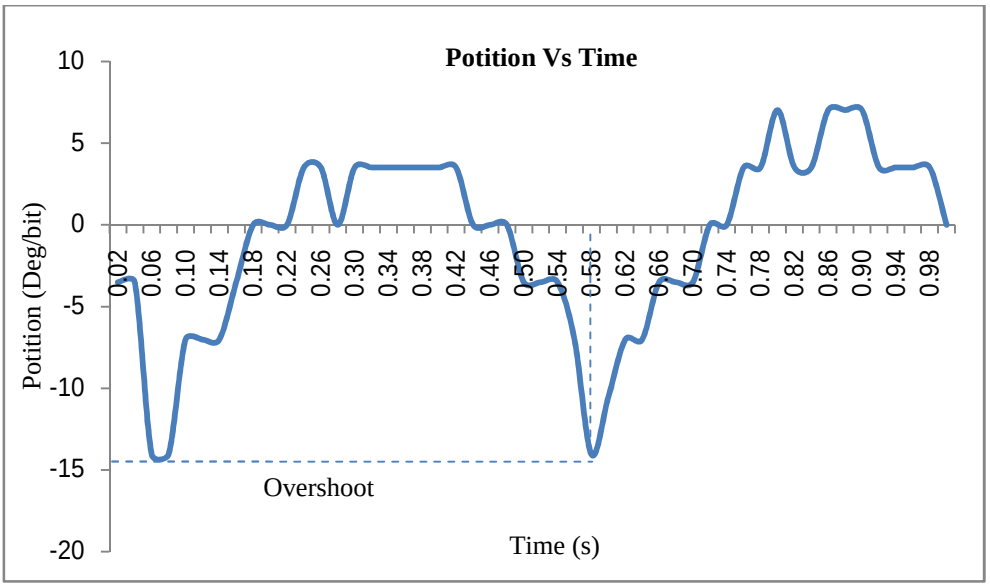
This page was created using **NitroPDF** trial software.
To purchase, go to http://www.nitropdf.com/

Tabel 4.6 Hasil pengujian pendulum terbalik

Time	Potition (Bit)	PWM	Potition (Deg/bit)	ADC
0.02	-1	1492	-3,51	1000000011
0.04	-1	1592	-3,51	1000000011
0.06	-4	1843	-14,04	1000000000
0.08	-4	1843	-14,04	1000000000
0.10	-2	1843	-7,02	1000000010
0.12	-2	1843	-7,02	1000000010
0.14	-2	1843	-7,02	1000000010
0.16	-1	1843	-3,51	1000000011
0.18	0	1833	0	1000000100
0.20	0	1833	0	1000000100
0.22	0	1833	0	1000000100
0.24	1	1723	3,51	1000000101
0.26	1	1623	3,51	1000000101
0.28	0	1633	0	1000000100
0.30	1	1523	3,51	1000000101
0.32	1	1423	3,51	1000000101
0.34	1	1323	3,51	1000000101
0.36	1	1223	3,51	1000000101
0.38	1	1123	3,51	1000000101
0.40	1	1023	3,51	1000000101
0.42	1	923	3,51	1000000101
0.44	0	933	0	1000000100
0.46	0	933	0	1000000100
0.48	0	933	0	1000000100
0.50	-1	1043	-3,51	1000000011
0.52	-1	1143	-3,51	1000000011
0.54	-1	1243	-3,51	1000000011
0.56	-2	1453	-7,02	1000000010
0.58	-4	1843	-14,04	1000000000
0.60	-3	1843	-10,53	1000000001
0.62	-2	1843	-7,02	1000000010
0.64	-2	1843	-7,02	1000000010
0.66	-1	1843	-3,51	1000000011
0.68	-1	1843	-3,51	1000000011
0.70	-1	1843	-3,51	1000000011
0.72	0	1833	0	1000000100
0.74	0	1833	0	1000000100
0.76	1	1723	3,51	1000000101
0.78	1	1623	3,51	1000000101

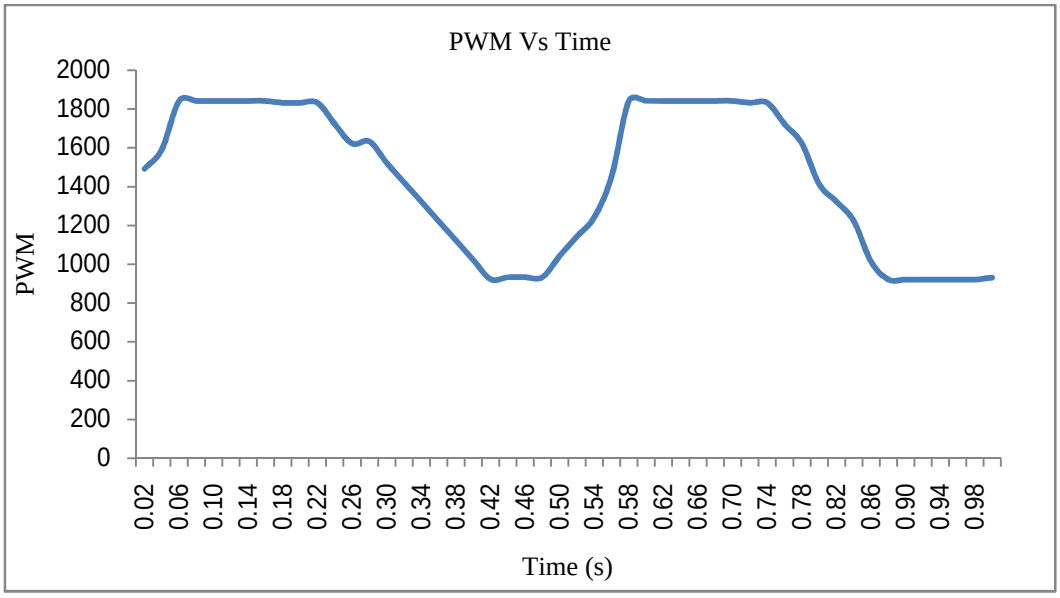
This page was created using **NitroPDF** trial software.
To purchase, go to http://www.nitropdf.com/

0.80	2	1413	7,02	1000000110
0.82	1	1323	3,51	1000000101
0.84	1	1223	3,51	1000000101
0.86	2	1013	7,02	1000000110
0.88	2	921	7,02	1000000110
0.90	2	921	7,02	1000000110
0.92	1	921	3,51	1000000101
0.94	1	921	3,51	1000000101
0.96	1	921	3,51	1000000101
0.98	1	921	3,51	1000000101
1.00	0	931	0	1000000100



Gambar 4.12 Respon posisi pendulum Kp = 100, Ki = 0,01 & Kd = 0,2

This page was created using **NitroPDF** trial software.
To purchase, go to http://www.nitropdf.com/



Gambar 4.13 Respon PWM Kp = 100, Ki = 0,01 & Kd = 0,2

Dari Gambar 4.12 dan Gambar 4.13 terlihat respon pendulum terbalik terus berosilasi dan simpangan yang terlalu besar. Overshootnya makin bertambah sebesar -14,04 Deg/bit. Kita dapat menganalisa dari Gambar 4.12 pendulum terbalik tidak bisa mencapai posisi stabil yang diinginkan. Oleh sebab itu *gain* Kp, Ki dan Kd yang diberikan tidak menunjukkan solusi agar pendulum dapat stabil. Sehingga harga Kp = 50, Ki = 0,01 dan kd = 0,1 masih jauh lebih baik untuk pendulum terbalik mencapai posisi stabilnya.

This page was created using **NitroPDF** trial software.
To purchase, go to http://www.nitropdf.com/