

**PENGENDALIAN
SISTEM PENDULUM TERBALIK
BERDASARKAN ALGORITMA
BACKPROPAGATION**



Oleh :

NAMA : ANTONIUS WIBOWO
NRP : 5103097030
NIRM : 97.7.003.31073.38708

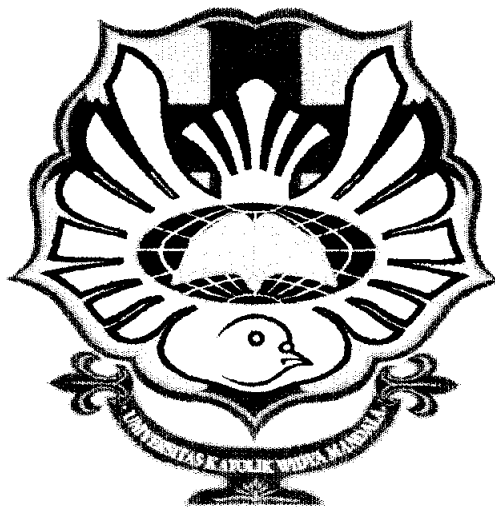
NIM	0366/03
NO. SKRIPSI	16 10 - 02
NO. BUKU	FT - C WIB P-1
ALP. KE	1 (Satu)

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS KATOLIK WIDYA MANDALA
SURABAYA
2001**

**PENGENDALIAN SISTEM PENDULUM
TERBALIK BERDASARKAN ALGORITMA
BACKPROPAGATION**

SKRIPSI

**DIAJUKAN KEPADA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS KATOLIK WIDYA MANDALA**



**UNTUK MEMENUHI SEBAGIAN PERSYARATAN
MEMPEROLEH GELAR SARJANA TEKNIK
BIDANG TEKNIK ELEKTRO
OLEH :**

NAMA : ANTONIUS WIBOWO

NRP : 5103097030

NIRM : 97.7.003.31073.38708

LEMBAR PENGESAHAN

Ujian Skripsi bagi mahasiswa tersebut di bawah ini :

N A M A : **ANTONIUS WIBOWO**
N R P : **5103097030**
N I R M : **97.7.003.31073.38708**

Telah diselenggarakan pada :

Tanggal : **4 OKTOBER 2001**

Karenanya yang bersangkutan dengan Skripsi ini dinyatakan telah memenuhi sebagian persyaratan kurikulum guna memperoleh gelar **SARJANA TEKNIK** di bidang **TEKNIK ELEKTRO**.

Surabaya, 8 Oktober 2001

Drs. Peter R. Angka, M.Komp.

Pembimbing I

Widya Andyardja W., ST, MT.

Pembimbing II

DEWAN PENGUJI

Albert Gunadhi, ST, MT.

Ketua

Ir. Rasional Sitepu, M.Eng.

Anggota

Ir. I. Satyoadi

Anggota

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

Ketua

Albert Gunadhi, ST, MT.

NIK. 511.94.0209

FAKULTAS TEKNIK

Dekan

Ir. Nani Indraswati

NIK. 521.86.0121

ABSTRAK

Sistem pendulum terbalik memiliki banyak aplikasi praktis dan seringkali digunakan untuk menguji desain sistem kontrol yang baru. Sistem pendulum terbalik terdiri dari sebuah pendulum yang terhubung dengan sebuah cart yang digerakkan oleh motor, dimana yang diinginkan yaitu menjaga pendulum tetap pada posisi kesetimbangannya. Selain menjaga pendulum tetap tegak, pengendali mengusahakan posisi cart pada tengah jalur. Pengendali yang dirancang harus dapat mengatasi adanya perubahan parameter maupun gangguan yang mungkin timbul, termasuk gaya dari luar.

Kemampuan jaringan syaraf tiruan (JST) untuk mempelajari sifat-sifat non linier sangat berguna dalam pengidentifikasian dan pengontrolan sistem pendulum terbalik. Dengan menggunakan JST sebagai pengendali yang disusun dengan konfigurasi kontrol adaptif langsung (Direct Adaptive Control). Algoritma belajar yang diterapkan adalah Algoritma propagasi balik (Backpropagation, BP) yang relatif mudah dipahami dan memiliki konsep belajar yang relatif sederhana.

Sistem mekanik pendulum terbalik terdiri dari pendulum terkopel dengan potensiometer. Pendulum tersebut dapat berputar bebas pada sumbu potensiometer yang melekat pada cart. Selanjutnya cart dihubungkan dengan kabel ditempatkan pada lintasan yang dikendalikan oleh motor DC sehingga dapat bergerak secara horisontal pada lintasan. Untuk mengontrol pendulum terbalik memanfaatkan umpan balik dari hasil pengukuran empat state variabel. Pengendali terbuat dari multilayer perceptron yang memiliki 12 input, sebuah hidden layer dan 1 unit output layer. Sinyal output dari pengendali dikirim melalui penguat yang menggerakkan motor DC untuk menghasilkan torsi motor T_m .

Simulasi pada program Matlab dilakukan dengan melatih pengendali dengan sistem pendulum terbalik yang dimodelkan secara matematis untuk memperoleh performansi dari sistem secara keseluruhan. Pengendali mampu mengendalikan sistem yang disimulasikan dengan performa yang baik. Implementasi langsung pengendali secara aktual pada sistem mekanik pendulum dilakukan dengan menggunakan bahasa pemrograman Pascal. Walaupun mengalami kendala sensor dan ketidaklinieran plan yang tidak diperhitungkan, pengendali mampu menyeimbangkan pendulum dengan kondisi awal sudut ± 10 derajat serta menjaga pendulum tetap tegak walaupun ada gangguan gaya dari luar sistem.

KATA PENGANTAR

Penulis mengucapkan puji syukur kepada **Tuhan Yang Maha Esa**, yang telah mencurahkan **rahmat, berkat dan hikmahNya** sehingga Skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Banyak tantangan, hambatan dan rintangan yang dialami penulis dalam pembuatan alat ini, baik secara fisik maupun mental. Namun berkat pertolonganNya lah semuanya dapat berakhir dengan baik.

Skripsi dengan judul:

PENGENDALIAN SISTEM PENDULUM TERBALIK BERDASARKAN ALGORITMA BACKPROPAGATION

dimaksudkan guna melengkapi sebagian dari persyaratan kurikulum Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik Elektro.

Akhirnya, semoga skripsi ini berguna bagi pembaca dan semua pihak yang berkepentingan.

Surabaya, Oktober 2001

Penulis

Ucapan Terima Kasih

Dalam usaha mencapai kesempurnaan, penulis mendapat bantuan dari para pembimbing maupun pihak lain yang secara langsung atau tidak langsung sangat besar peranannya. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Peter R. Angka, M.Komp. selaku Dosen Pembimbing I yang telah menyediakan waktu untuk memberikan nasehat, bimbingan dan pengarahan sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.
2. Bapak Widya Andyardja W., S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang telah membantu, mengarahkan dan memberikan banyak masukan dalam proses pembuatan alat dalam skripsi ini.
3. Bapak Ir. I. Satyoadi selaku Kepala Laboratorium Kontrol Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya yang telah menyediakan laboratorium dan fasilitas penunjang lainnya serta membantu mengarahkan dan memberikan banyak masukan dalam proses pembuatan alat dalam skripsi ini.
4. Ibu Ir. Melani Satyoadi selaku Dosen Wali di Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya yang telah memberikan dorongan dan semangat dalam pembuatan skripsi ini.
5. Bapak Hartono Pranjoto, Ph.D. selaku Dosen di Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya yang telah memberikan dorongan dan semangat dalam pembuatan skripsi ini.

6. Para dosen penguji yang telah meluangkan waktu untuk memberikan penilaian serta masukan-masukan yang berguna bagi penulis.
7. Semua Bapak dan Ibu Dosen yang turut membantu, baik selama kuliah maupun yang telah memberikan bimbingan informal kepada penulis selama penulisan skripsi ini.
8. Segenap staf karyawan Perpustakaan Unika Widya Mandala yang telah membantu dan memberikan fasilitas dalam penyediaan buku literatur.
9. Kedua orang tua dan seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan sepenuhnya dalam penyusunan dan penyelesaian skripsi ini.
10. Teman-teman yang telah banyak membantu dan mendukung penulis untuk menyelesaikan skripsi ini.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	xv

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Permasalahan	2
1.3. Tujuan.	2
1.4. Pembatasan Masalah.	3
1.5. Pendekatan Konsep Dalam Mewujudkan Skripsi .	4
1.6. Sistematika Pembahasan.	4

BAB II. TEORI PENUNJANG

2.1. Pendahuluan	6
2.2. Jaringan Syaraf tiruan.	7

3.5. Penggerak Motor DC dan PWM	46
3.5.1. Penggerak Motor DC	46
3.5.2. PWM	47
3.6. Desain Pengendali dengan Jaringan Syaraf Tiruan	50
3.6.1. Arsitektur Jaringan Syaraf Tiruan	51
3.6.1.1. Jaringan Syaraf Tiruan untuk Model <i>Plan</i>	52
3.6.1.2. Jaringan Syaraf Tiruan untuk Pengendali	53
3.6.2. Proses Pelatihan	53
3.6.2.1. Proses Pelatihan Model <i>Plan</i>	54
3.6.2.2. Proses Pelatihan Pengendali	55
3.7. <i>Cost Function</i>	57
3.8. Algoritma Pembelajaran <i>BTT</i>	59
3.9. Implementasi pada Sistem Mekanik	60
3.9.1. Algoritma Program Utama	60
3.9.2. Algoritma <i>Interrupt Service Routine</i> Proses Pelatihan	61

BAB IV. PENGUKURAN DAN PENGUJIAN ALAT

4.1. Pendahuluan	62
4.2. Pengukuran Sensor, RPS, dan ADC	62
4.3. Pengujian Awal Motor Servo DC	67
4.4. Pengukuran Pembangkit PWM	70
4.5. Proses Pembelajaran	71
4.5.1. Identifikasi Sistem	71

2.3. Proses Pembelajaran Terawasi (<i>Supervised Learning</i>).	15
2.4. Sistem Pengendalian Digital.	19
2.4.1. Konfigurasi Sistem Kontrol Digital.	20
2.4.2. Sistem Waktu Diskrit.	21
2.4.2.1. Sampling.	21
2.4.2.2. Kuantisasi.	23
2.4.2.3. Transformasi Z.	24
2.4.3. Karakteristik Sistem Kontrol.	26
2.4.3.1. Kestabilan.	26
2.5. Prinsip Motor Servo DC	28
2.5.1. Konstruksi dan Rangkaian Ekuivalen	29
2.5.2. Karakteristik Motor Servo DC	31
2.5.3. Karakteristik Mekanik	32
2.6. PWM (Pulse Width Modulation)	34

BAB III. PERENCANAAN DAN PEMBUATAN ALAT

3.1. Blok Diagram	37
3.2. Sistem Mekanik Pendulum Terbalik	37
3.2.1. Model Analitik Sistem Pendulum Terbalik	39
3.2.2. Motor DC	41
3.2.3. Penentuan Parameter	42
3.3. Sensor dan Rangkaian Pengkondisi Sinyal	43
3.4. <i>Digital Signal Processing Card</i>	45

4.5.2. Pembelajaran Pengendali	73
4.6. Implementasi pada Sistem Mekanik Sesungguhnya	77
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1. KESIMPULAN	79
5.2. SARAN	79
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR	HAL
2.1. Blok Diagram Pengendalian Sistem Pendulum Terbalik	6
2.2.2. Fungsi Ambang Batas	8
2.2.3. Fungsi <i>Piecewise – Linier</i>	8
2.2.4. Beberapa Model <i>Neuron</i> Yang Umum Digunakan	9
2.2.5. Fungsi <i>Sigmoid</i>	10
2.2.6. (A) Fungsi <i>Sigmoid</i> Simetri	10
2.2.6. (B) Fungsi <i>Sigmoid</i> Nonsimetri	11
2.2.7. Jaringan Umpan Maju Dengan <i>Neuron</i> Lapis Tunggal	11
2.2.8. Lapisan Umpan Maju Yang Terkoneksi Seluruhnya Dengan 1 Lapisan Tersembunyi	12
2.2.9. Lapisan Umpan Maju Yang Terkoneksi Sebagian Dengan 1 Lapisan Tersembunyi	13
2.2.10. Jaringan Berulang Tanpa <i>Self – Feedback Loop</i> Dan Tanpa <i>Neuron</i> Tersembunyi	13
2.2.11. Jaringan Berulang Dengan Menggunakan <i>Neuron</i> Tersembunyi	14
2.2.12. Kisi – Kisi Satu Dimensi Dengan 3 <i>Neuron</i>	14

2.2.13. Kisi – Kisi 2 Dimensi Dengan Menggunakan 3 <i>Neuron 3x3</i>	14
2.2.14. Taksonomi Proses Pembelajaran	15
2.3.1. Ilustrasi 2 Sinyal Dasar Pada Back – Propagation	16
2.4.1. Blok Diagram Sistem Konfigurasi Kontrol Digital	21
2.4.2. Konverter Sinyal Analog ke Digital	24
2.5. Konstruksi Dasar Motor Servo Dc	29
2.5.1. Rangkaian Pengganti Motor Servo Dc	30
2.5.2. Grafik Korelasi Torsi Dengan Kecepatan	34
2.6. <i>Pulse Width Modulation</i>	35
3.1. Blok Diagram Pengendalian Sistem Pendulum Terbalik	37
3.2.1. Sistem Mekanik Pendulum Terbalik	38
3.2.2. Blok Diagram Gaya – Gaya Pada <i>Cart</i> Dan Pendulum	39
3.2.3. (A) Test Untuk Menentukan Konstanta K_1	42
(B) Test Untuk Menentukan Konstanta K_2 Dan R_a	42
3.3.1. Rangkaian Pengkondisi Sinyal	44
3.4.1. Blok Diagram DSP Card	46
3.5.1. Rangkaian Penggerak Motor Dc	46
3.5.2. Rangkaian Pwm	47
3.5.3. Bentuk Input Dan Output Dari D Flip – Flop	50
3.6.1. Blok Diagram Pengendali Untuk <i>Plant</i> Nonlinier	51

3.6.2. Arsitektur Model <i>Plant</i>	52
3.6.3. Arsitektur Jaringan Pengendali	53
3.6.4. Blok Diagram Pelatihan Model	55
3.6.5. Gambaran Umum Sekuen Kontrol Dan Subsekuen <i>BTT</i>	56
3.6.6. Aliran Data	57
3.7.1. Pendulum Ideal Dengan Pegasnya	58
4.2.1. Grafik Hubungan Sudut Dengan Tegangan Sensor	63
4.2.2. Grafik Hubungan Tegangan Sensor Dengan Tegangan RPS	64
4.2.3. Grafik Hubungan Posisi Dengan Tegangan Sensor	65
4.2.4. Grafik Hubungan Tegangan Sensor Posisi Dengan Tegangan RPS	67
4.3.1. Grafik Hubungan Kecepatan Motor Dengan Tegangan Jangkar	68
4.3.2. Grafik Hubungan Arus Jangkar Motor Dengan Tegangan Jangkar	69
4.4.1. Grafik Hubungan <i>Vcontroller</i> Dengan Nilai PWM	71
4.5.1. Prosedur Identifikasi Sistem	71
4.5.2. (A) Respon Sistem	72
4.5.2. (B) Respon Model <i>Neural</i>	72
4.5.3. Sinyal Kontrol	72
4.5.4. Kesalahan Prediksi	73

4.5.5. Kurva Awal Belajar	74
4.5.6. Hasil Pembelajaran Awal	75
4.5.6. Hasil Simulasi Akhir	76
4.6.1. Respon Posisi	77
4.6.2. Respon Sudut	77
4.6.3. Analisa Respon Sudut	78

DAFTAR TABEL

TABEL	HAL
3.4.1. Alamat Komponen – komponen <i>DSP card</i>	45
3.5.1. Format Control Word	48
4.2.1. Pengukuran Sensor Sudut sebelum RPS	63
4.2.2. Pengukuran Tegangan Sensor Sudut sesudah RPS	64
4.2.3. Pengukuran Sensor Posisi sebelum RPS	65
4.2.4. Pengukuran Sensor Posisi sesudah RPS	66
4.3.1. Pengukuran Awal Karakteristik Motor Servo DC	67
4.3.2. Rata – rata Pengukuran Awal Karakteristik Motor Servo DC	68
4.4.1. Tabel Hubungan PWM dengan $V_{controller}$ dan <i>Dutycyle</i>	70