

Makalah Seminar Tugas Akhir

BALANCING ROBOT BERODA DUA MENGGUNAKAN METODE KENDALI PROPORSIONAL INTEGRAL

Andra Laksana¹, Iwan Setiawan², Sumardi²
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, Tembalang, Semarang, Indonesia

Abstrak

Balancing robot (robot penyeimbang) beroda dua merupakan suatu robot mobile yang memiliki dua buah roda disisi kanan dan kirinya yang tidak akan seimbang apabila tanpa adanya kontroler. Balancing robot ini merupakan pengembangan dari model pendulum terbalik (inverted pendulum) yang diletakkan di atas kereta beroda. Menyeimbangkan balancing robot beroda dua memerlukan suatu metode kontrol yang baik dan handal untuk mempertahankan posisi robot dalam posisi tegak lurus terhadap permukaan bumi, tanpa memerlukan pengendali lain dari luar.

Tujuan utama dari Tugas Akhir ini adalah menggunakan metode kontrol yang baik untuk menjaga badan robot seimbang dalam posisi tegak lurus terhadap permukaan bumi. Balancing robot beroda dua ini menggunakan sensor MMA7260 3-Axis Accelerometer Prototype Board untuk mendeteksi kemiringan serta sensor LISY300 Gyroscope Module untuk mendeteksi kecepatan sudut badan robot ketika akan terjatuh. Sedangkan untuk penggeraknya digunakan dua buah motor DC. Untuk menyelesaikan permasalahan tersebut digunakan sebuah metode kontrol Proporsional Integral (PI) untuk mengatur kecepatan dan arah putar motor DC. Penentuan nilai (tuning) parameter kontrol Proporsional dan Integral dilakukan dengan cara trial and error.

Kata kunci: *accelerometer, gyroscope, complementary filter, balancing robot, kontrol Proporsional Integral*

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi robotika telah membuat kualitas kehidupan manusia semakin tinggi. Saat ini perkembangan teknologi robotika telah mampu meningkatkan kualitas maupun kuantitas berbagai industri. Teknologi robotika juga telah menjangkau sisi hiburan dan pendidikan bagi manusia. Salah satu cara menambah tingkat kecerdasan sebuah robot adalah dengan menambah sensor, metode kontrol bahkan memberikan kecerdasan buatan pada robot tersebut. Salah satunya adalah *balancing* robot beroda dua.

Balancing robot (robot penyeimbang) beroda dua merupakan suatu robot *mobile* yang memiliki dua buah roda disisi kanan dan kirinya yang tidak akan seimbang apabila tanpa adanya kontroler. *Balancing* robot ini merupakan pengembangan dari model pendulum terbalik (*inverted pendulum*) yang diletakkan di atas kereta beroda. Menyeimbangkan robot beroda dua memerlukan suatu metode kontrol yang baik dan handal untuk mempertahankan posisi robot dalam keadaan tegak lurus terhadap permukaan bumi tanpa memerlukan pengendali lain dari luar. Bahkan sekarang ini konsep *balancing* robot beroda dua telah digunakan sebagai alat transportasi yang bernama *segway*.

Tugas Akhir ini adalah untuk mendesain dan membangun *balancing* robot beroda dua yang mampu menyeimbangkan dirinya yang tegak lurus terhadap permukaan bumi di daerah bidang datar. Pada Tugas Akhir ini digunakan mikrokontroler AVR ATmega8535, sensor *accelerometer* dan *gyroscope* serta kontrol Proporsional Integral (PI) sebagai metode pengendali. Kontrol Proporsional Integral digunakan untuk menentukan besarnya kecepatan dan arah putar motor DC sebagai penggerak, berdasarkan sudut kemiringan badan robot terhadap permukaan bidang datar. Sehingga *balancing* robot ini dapat mempertahankan posisinya tegak lurus dengan seimbang terhadap permukaan bumi pada bidang datar.

1.2 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini adalah mempertahankan posisi robot beroda dua pada kondisi seimbang dan tegak lurus terhadap permukaan bumi di bidang datar dengan menggunakan metode kontrol Proporsional Integral.

1.3 Pembatasan Masalah

Agar permasalahan yang dibahas terfokus dan tidak melebar, maka Tugas Akhir ini mengambil batasan masalah sebagai berikut :

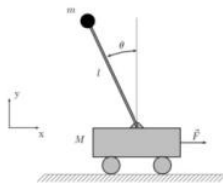
1) Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro
2) Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro

1. Menggunakan sensor MMA7260 3-Axis Accelerometer Prototype Board yang mendeteksi sudut kemiringan robot.
2. Menggunakan LISY300 Gyroscope Module untuk mendeteksi kecepatan sudut.
3. Penggabungan sensor accelerometer dan gyroscope menggunakan algoritma complementary filter.
4. Mempertahankan posisi robot pada kondisi seimbang atau tegak lurus terhadap permukaan bumi pada bidang datar.
5. Balancing robot menggunakan dua buah roda disisi kanan dan kiri dengan penggerak motor DC.
6. Menggunakan kontrol Proporsional Integral (PI) sebagai pengendalian.
7. Tuning parameter kontrol Proporsional dan Integral dilakukan dengan cara trial and error.
8. Bahasa pemrograman yang digunakan pada mikrokontroler menggunakan bahasa C dengan perangkat lunak kompilasi CodeVisionAVR.

II. DASAR TEORI

2.1 Balancing Robot Beroda Dua dan Pendulum Terbalik

Balancing robot beroda dua merupakan suatu robot *mobile* yang memiliki dua buah roda disisi kanan dan kirinya yang tidak akan seimbang apabila tanpa adanya kontroler. Balancing robot beroda dua ini merupakan pengembangan dari model pendulum terbalik yang diletakkan di atas kereta beroda.



Gambar 2.1 Pendulum terbalik di atas kereta beroda

Saat *balancing* robot beroda dua condong ke depan atau miring ke kanan pada Gambar 2.2, maka tindakan yang perlu dilakukan adalah motor akan memutar roda searah jarum jam sehingga *balancing* robot beroda dua berjalan ke arah depan. Gaya yang digunakan untuk menyeimbangkan dihasilkan dari putaran roda. Putaran roda ini berasal dari torsi yang dihasilkan oleh motor.



Gambar 2.2 Balancing robot beroda dua menyeimbangkan diri

2.2 Pengendali PID

Pengendali PID adalah suatu sistem pengendali yang merupakan gabungan antara pengendali proporsional, integral, dan turunan (derivative). Dalam waktu kontinyu, sinyal keluaran pengendali PID dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

atau

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

dengan:

$u(t)$ = sinyal keluaran pengendali PID

K_p = konstanta proporsional

T_i = waktu integral

T_d = waktu turunan

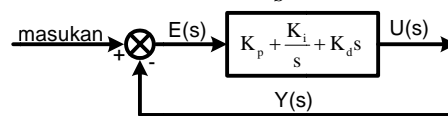
K_i = konstanta integral

K_d = konstanta turunan

$e(t)$ = sinyal kesalahan = referensi – output

Jadi, fungsi alih pengendali PID (dalam domain s) dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$



Gambar 2.3 Diagram blok pengendali PID.

2.3 Sensor MMA7260 3-Axis Accelerometer Prototype Board

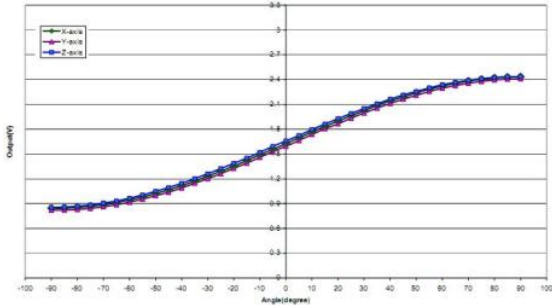
MMA7260 3-Axis Accelerometer Prototype Board merupakan modul sensor accelerometer terintegrasi yang pasarkan oleh Sure Electronics. Sedangkan sensor accelerometer yang digunakan adalah MMA7260Q buatan Freescale Semiconductor.



Gambar 2.4 Bentuk fisik MMA7260 3-Axis Accelerometer Prototype Board

Accelerometer MMA7260Q adalah *low cost capacitive micromachined accelerometer* dengan 3 sumbu (X, Y dan Z), *1-pole low pass*

filter, kompensasi suhu dan fitur g-Select untuk menentukan 4 jenis sensitivitas. Sensor ini juga mempunyai *mode sleep* untuk menghemat penggunaan baterai dan sudah dilengkapi dengan regulator tegangan 3,3V. Tegangan keluaran *accelerometer* MMA7260Q berupa tegangan analog.



Gambar 2.5 Grafik tegangan keluaran *accelerometer* MMA7260Q terhadap sudut kemiringan

Persamaan matematis dari grafik diatas:

$$V_{OUT} = V_{OFF} + \left(\frac{\Delta V}{\Delta g} \cdot 1g \cdot \sin \theta\right)$$

dimana:

V_{OUT} = Tegangan keluaran *accelerometer*

V_{OFF} = Tegangan *offset accelerometer*

$\frac{\Delta V}{\Delta g}$ = Sensitivitas

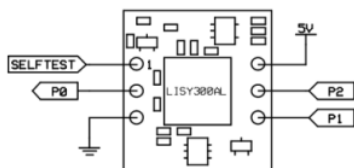
1g = Gravitasi bumi

θ = Sudut kemiringan

2.4 Sensor LISY300 Gyroscope Module

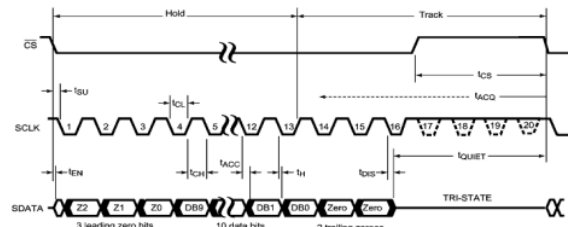
LISY300 *Gyroscope Module* merupakan sensor kecepatan sudut satu sumbu (sumbu Z) yang dapat menyediakan rotasi skala penuh 300°/s dan dapat mendeteksi hingga 88 Hz.

Ketika *gyroscope* berotasi searah jarum jam pada sumbu Z, maka keluaran tegangannya akan mengecil. Sedangkan jika berotasi berlawanan arah jarum jam, maka keluaran tegangannya akan membesar. Perubahan nilai tegangan tersebut tergantung kepada kecepatan rotasi *gyroscope*.



Gambar 2.6 Konfigurasi pin LISY300 *Gyroscope Module*

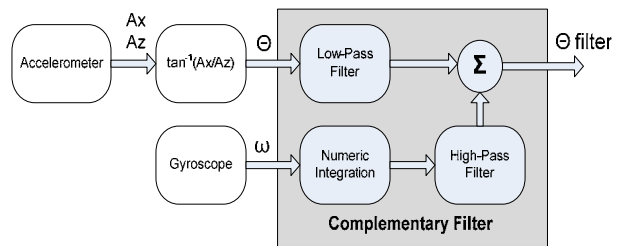
Dikarenakan modul ini menggunakan ADC101S021 10-bit ADC, maka cara mengakses modul ini menggunakan komunikasi SPI (*Serial peripheral interface*).



Gambar 2.7 Diagram pewaktu komunikasi sensor LISY300 *Gyroscope Module*

2.5 Complementary Filter

Accelerometer dapat memberikan pengukuran sudut kemiringan yang akurat ketika sistem sedang diam (statis). Bila sistem sedang bergerak, *accelerometer* tidak hanya dipengaruhi oleh gravitasi bumi tetapi dipengaruhi juga oleh pergerakan badan robot, sehingga dapat mengganggu pembacaan kemiringan sudut dan memiliki *noise*. *Gyroscope* dapat membaca data dari kecepatan sudut yang dinamis. Setelah integrasi data dari waktu ke waktu, perpindahan sudut atau sudut kemiringan dapat dihitung. Tetapi sudut ini akan menjadi tidak akurat dalam jangka panjang karena efek bias yang dihasilkan oleh *gyroscope*.



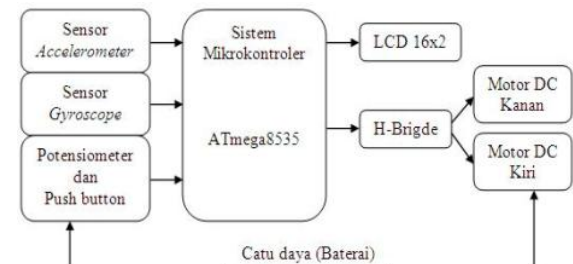
Gambar 2.8 Diagram blok *complementary filter*

Oleh karena itu dibutuhkan sebuah filter digital yang dapat menghilangkan efek dari kekurangan sensor-sensor tersebut. Salah satunya adalah dengan menggunakan *complementary filter*.

III. PERANCANGAN ALAT

3.1 Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras pada *balancing robot* beroda dua dapat dilihat pada Gambar 3.1.



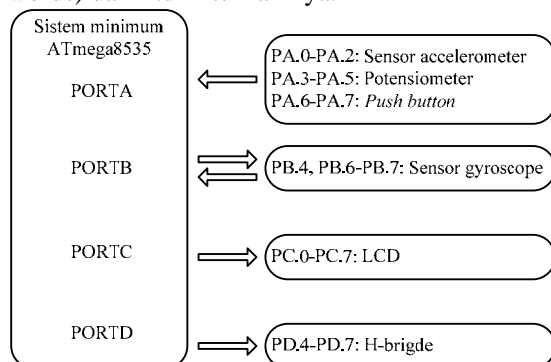
Gambar 3.1 Diagram blok perancangan perangkat keras.

Tiap-tiap bagian dari diagram blok sistem di atas dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Sensor MMA7260 3-Axis Accelerometer Prototype Board digunakan untuk mendeteksi sudut kemiringan robot terhadap permukaan bumi.
2. Sensor LISY300 Gyroscope Module digunakan untuk mendeteksi kecepatan sudut.
3. Potensiometer dan *push button* digunakan sebagai masukan untuk melakukan *tuning* terhadap nilai parameter kontrol.
4. LCD (*Liquid Crystal Display*) digunakan sebagai media penampil.
5. H-Bridge sebagai *driver* motor DC, yang terdiri dari dua buah.
6. Motor DC berfungsi sebagai sistem penggerak *balancing* robot beroda dua.
7. Baterai berfungsi sebagai catu daya sistem.
8. Mikrokontroler ATmega8535 berfungsi sebagai pusat pengendalian pada *balancing* robot beroda dua.

3.1.1 Sistem Minimum AVR ATmega8535

Mikrokontroler ATmega8535 berfungsi sebagai pengendali utama dimana algoritma kontrol Proporsional Integral ditanamkan ke dalam mikrokontroler. Mikrokontroler ini dipilih karena fitur-fiturnya yang lebih lengkap seperti ADC internal 10 bit, *timer* dengan kemampuan menghasilkan gelombang PWM, pemrograman ISP, EEPROM internal, *flash* memori 8 Kb (4 Kb words) dan fitur-fitur lainnya.



Gambar 3.2 Alokasi port mikrokontroler

3.1.2 Sensor MMA7260Q 3-Axis Accelerometer Prototype Board

Sensor ini mempunyai tiga buah keluaran yang berupa tegangan analog yang dihubungkan langsung ke ADC mikrokontroler. Dengan tegangan referensi ADC pada mikrokontroler adalah 5V. Tegangan keluaran sumbu X, Y dan Z masing-masing dihubungkan ke PA.0, PA.1 dan PA.3. Pin *SLEEP* pada modul *accelerometer*

dihubungkan ke pin VDD (bernilai 3,3V) yang berfungsi untuk menonaktifkan mode *sleep*.

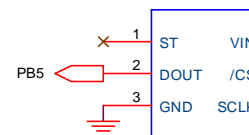
Pin SEL1 dan SEL2 tidak dihubungkan, yang berarti secara *default* kedua pin ini berlogika *low*, sehingga sensor *accelerometer* memiliki sensitivitas 800mV/g dengan jangkauan 1,5g.



Gambar 3.8 Konfigurasi Sensor MMA7260 3-Axis Accelerometer Prototype Board

3.1.3 Sensor LISY300 Gyroscope Module

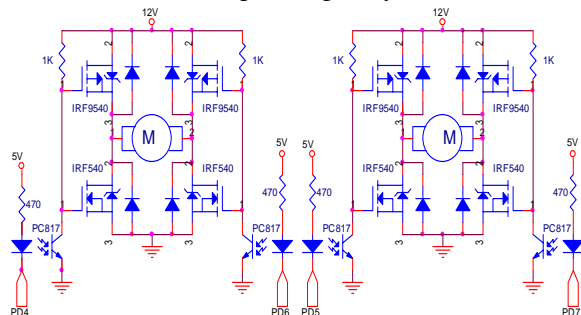
Hanya membutuhkan 3 *wire* untuk dapat melakukan komunikasi dengan mikrokontroler, terdiri dari pin /CS, SCLK dan DOUT. Untuk dapat mengakses modul sensor ini pin /CS harus diberi logika *low*. Pin SCLK berfungsi sebagai serial *clock*, dengan kecepatan maksimal 4MHz. Sedangkan pin DOUT merupakan jalur keluaran data dari modul sensor ini.



Gambar 3.3 Konfigurasi Sensor LISY300 Gyroscope Module

3.1.4 H-Bridge

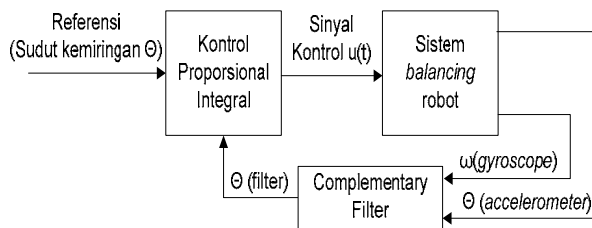
Driver motor DC yang digunakan adalah 2 buah rangkaian H-Bridge, yang digunakan untuk mengontrol kecepatan dan arah putar motor DC. Rangkaian ini terdiri dari dua buah mosfet kanal P (IRF9540N) dan dua buah mosfet kanal N (IRF540N) untuk tiap H-bridge-nya.



Gambar 3.4 Konfigurasi H-Bridge

3.2 Perancangan Perangkat Lunak

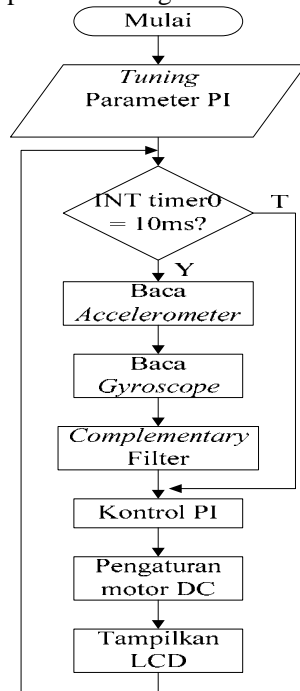
Metode kontrol yang digunakan untuk aplikasi ini adalah kontrol Proporsional Integral, dengan referensi berasal dari kemiringan sudut.



Gambar 3.5 Diagram blok sistem kontrol *balancing* robot beroda dua

3.2.1 Program Utama

Gambar 3.6 adalah *flowchart* program utama *balancing* robot beroda dua menggunakan metode proporsional integral.



Gambar 3.6 *Flowchart* program utama

Program utama dari perancangan perangkat lunak, terdiri dari beberapa subrutin, yaitu:

1. *Tuning* parameter Proporsional Integral
Merupakan subrutin program yang digunakan untuk memasukan nilai dari parameter PI
2. Interupsi *timer 0*
Merupakan subrutin program yang digunakan sebagai waktu *sampling* nilai sensor dan *complementary filter*.
3. *Baca Accelerometer*
Merupakan subrutin program yang digunakan untuk membaca data sensor *accelerometer*.
4. *Baca gyroscope*
Merupakan subrutin program yang digunakan untuk membaca data sensor *gyroscope*.
5. *Complementary filter*
Merupakan subrutin program yang digunakan untuk menggabungkan data sensor *accelerometer* dan *gyroscope*.

6. *Kontrol PI*
Merupakan subrutin program yang digunakan sebagai algoritma pengontrolan *balancing* robot.
7. *Pengaturan motor DC*
Merupakan subrutin program yang digunakan untuk mengatur kecepatan dan arah putar motor DC.
8. *Tampilkan LCD*
Merupakan subrutin program yang digunakan untuk menampilkan beberapa parameter pada LCD.

IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

4.1 Pengujian Perangkat Keras

4.1.1 Pengujian Sensor *Accelerometer*

Balancing robot beroda dua hanya membutuhkan pembacaan sudut kemiringan sekitar 40° sampai -40° , maka pengujian hanya dilakukan pada jangkauan 90° sampai -90° dengan kelipatan 10.

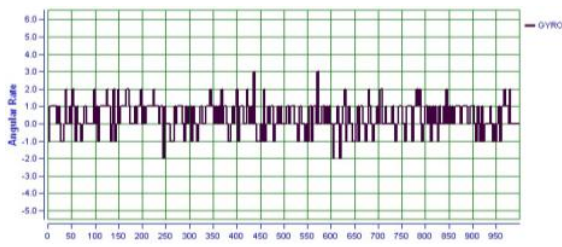
Tabel 4.1 Hasil pengukuran sudut kemiringan sensor *accelerometer*

No.	Sudut aktual (busur derajat)	Sudut keluaran sensor <i>accelerometer</i>
1	-90°	$-89,4^{\circ}$
2	-80°	$-79,3^{\circ}$
3	-70°	$-69,2^{\circ}$
4	-60°	$-59,7^{\circ}$
5	-50°	$-48,9^{\circ}$
6	-40°	$-40,1^{\circ}$
7	-30	$-29,6^{\circ}$
8	-20	$-19,0^{\circ}$
9	-10	$-8,9^{\circ}$
10	0°	$-1,1^{\circ}$
11	10°	$9,6^{\circ}$
12	20°	$20,7^{\circ}$
13	30°	$29,2^{\circ}$
14	40°	$39,4^{\circ}$
15	50°	$50,9^{\circ}$
16	60°	$60,3^{\circ}$
17	70°	$69,2^{\circ}$
18	80°	$79,8^{\circ}$
19	90°	$89,3^{\circ}$

Dari Tabel 4.1, terlihat bahwa sensor *accelerometer* masih terdapat kesalahan (*error*), hal ini dapat disebabkan karena pengukuran yang kurang tepat, pembulatan pecahan dalam pemrograman dan *noise* yang dihasilkan sensor itu sendiri.

4.1.2 Pengujian Sensor *Gyroscope*

Pengujian dilakukan dengan melihat keluaran dari sensor *gyroscope* melalui grafik.



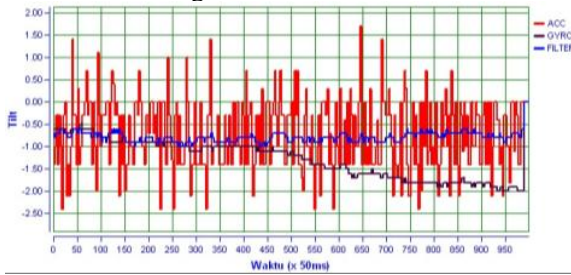
Gambar 4.1 Grafik sensor *gyroscope* ketika diam

Sinyal yang dihasilkan mempunyai nilai dan berubah-ubah. Seharusnya jika sensor *gyroscope* dalam keadaan diam, keluarannya akan sama dengan nilai *offset*-nya, yaitu 0. Hal ini dikarenakan sensor *gyroscope* mempunyai nilai bias.

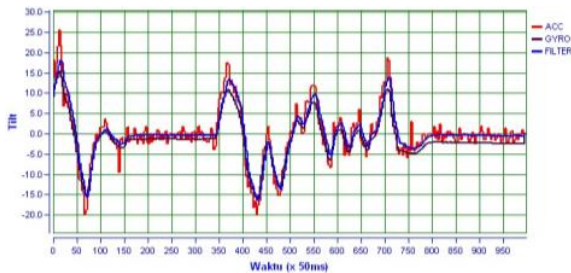
4.2 Pengujian Perangkat Lunak

4.2.1 Pengujian *Complementary Filter*

Pengujian dilakukan dengan memberikan nilai koefisien filter sebesar 0,97 dan waktu *sampling* 10 ms. Pengujian dilakukan dengan melihat sinyal keluaran dari *complementary filter* saat sistem sedang diam dan saat berotasi.



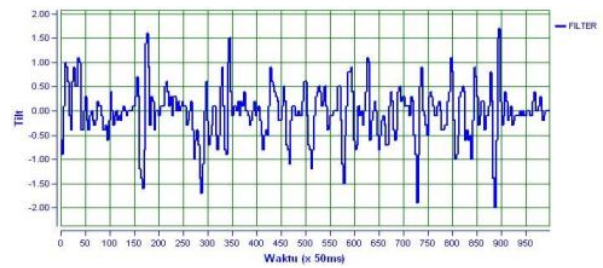
Gambar 4.2 Grafik *complementary filter* saat diam



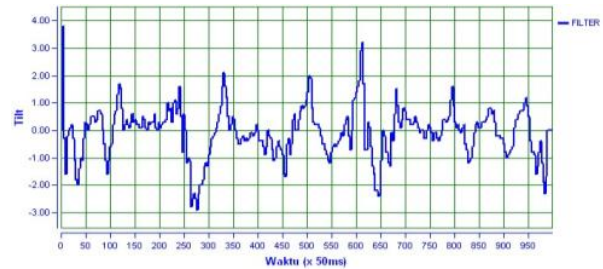
Gambar 4.3 Grafik *complementary filter* saat berotasi

4.2.2 *Tuning* Parameter Kontrol Proporsional Integral

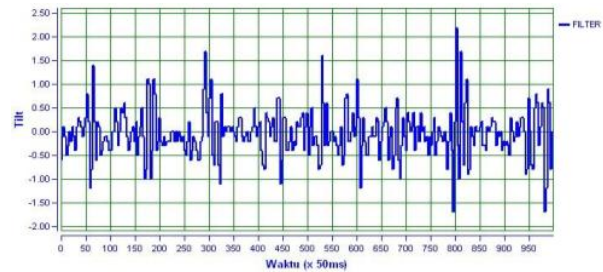
Penentuan nilai parameter (*tuning*) kontrol Proporsional (K_p) dan Integral (T_i) dilakukan dengan cara *trial and error* dengan nilai *set point* 0^0 . Pengujian algoritma kontrol Proporsional Integral ini adalah mencari nilai optimal (*tuning*) parameter kontrol Proporsional dan Integral (K_p dan T_i) terhadap respon sistem *balancing* robot beroda dua.



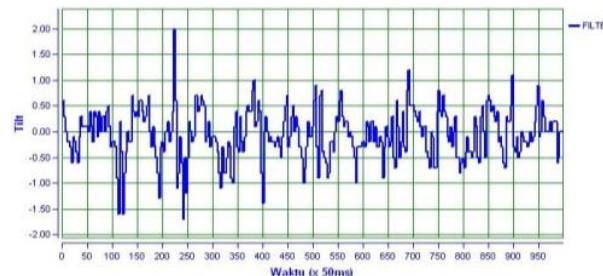
Gambar 4.4 Respon *balancing* robot beroda dua dengan nilai $K_p=30$ dan $T_i=0,2$



Gambar 4.5 Respon *balancing* robot beroda dua dengan nilai $K_p=30$ dan $T_i=0,5$



Gambar 4.6 Respon *balancing* robot beroda dua dengan nilai $K_p=50$ dan $T_i=0,2$

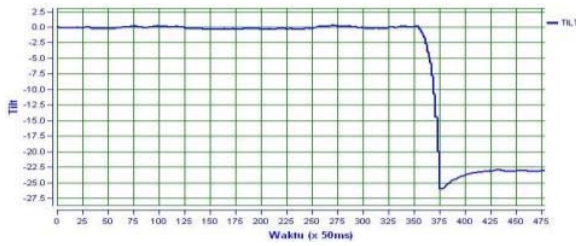


Gambar 4.7 Respon *balancing* robot beroda dua dengan nilai $K_p=50$ dan $T_i=0,5$

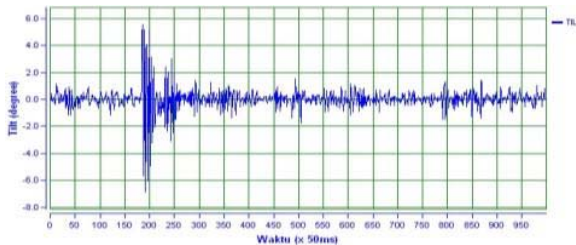
Respon yang terbaik atau optimal ditunjukkan pada Gambar 4.4 dengan nilai $K_p=30$ dan $T_i=0,2$.

4.2.3 Pengujian Kontrol *Open Loop* dan *Close Loop* terhadap Gangguan

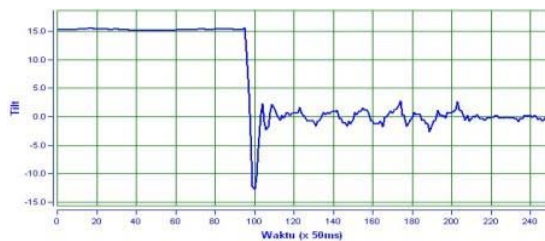
Gangguan yang diberikan adalah dengan memberikan dorongan kearah depan atau belakang badan robot serta peletakan posisi awal sudut yang tidak sesuai dengan *set point*. Jika menggunakan kontrol *open loop*, *balancing* robot beroda dua tidak dapat menyeimbangkan diri walaupun tanpa adanya gangguan.



Gambar 4.8 Grafik respon kontrol *open loop*



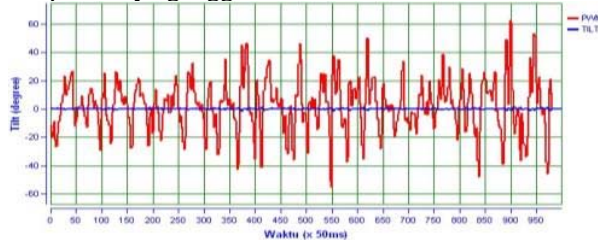
Gambar 4.9 Grafik respon kontrol *close loop*



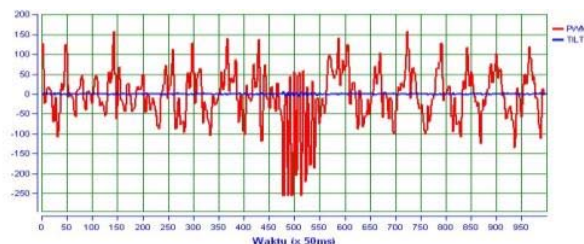
Gambar 4.10 Peletakan posisi sudut awal saat 15°

4.2.4 Pengujian Sinyal PWM

Pengujian dilakukan dengan melihat keluaran sinyal PWM dengan gangguan dan tanpa adanya gangguan.



Gambar 4.11 Grafik respon PWM tanpa gangguan



Gambar 4.12 Grafik respon sinyal PWM akibat gangguan

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Keluaran sensor *accelerometer* masih memiliki *noise*, sedangkan sensor *gyroscope* mempunyai bias, sehingga diperlukan sebuah algoritma *complementary filter* untuk menggabungkan kedua data dari keluaran sensor tersebut.
2. Nilai koefisien filter dan waktu *sampling* yang digunakan pada algoritma *complementary filter* adalah $a=0,97$ dan $dt=100\text{Hz}$.
3. Semakin kecil nilai koefisien filter ($a<0,97$) dan dipercepatnya waktu *sampling* ($dt>100\text{Hz}$) maka akan mempercepat waktu *constant* pada algoritma *complementary filter* dan *noise* yang dihasilkan semakin besar.
4. Nilai parameter kontrol Proporsional dan Integral yang optimal adalah saat $K_p=30$ dan $T_i=0,2$.
5. Jika nilai parameter K_p diperbesar dari nilai optimalnya ($K_p>30$) maka respon robot akan semakin berosilasi, sedangkan jika nilai parameter T_i diperkecil ($T_i<0,2$) maka respon robot akan semakin cepat dalam mengikuti perubahan *set point*.
6. Sudut peletakan posisi awal badan robot saat 15° mempunyai respon waktu 0,35 detik untuk menuju nilai *set point*. Sedangkan sudut peletakan posisi awal badan robot saat -5° mempunyai respon waktu 1 detik.

5.2 Saran

Untuk pengembangan sistem lebih lanjut, maka ada beberapa saran yang dapat dilakukan yaitu sebagai berikut:

1. Dapat digunakan metode kontrol lain, seperti kontrol fuzzy, Jaringan Saraf Tiruan (JST), algoritma genetik atau *Linear Quadratic Regulator* (LQR) untuk mengontrol keseimbangan badan robot terhadap permukaan bumi di bidang datar.
2. *Balancing* robot beroda dua ini dapat dikembangkan sehingga dapat melakukan *tracking* (berjalan) dengan menggunakan *remote control* atau *wireless*.
3. Dapat ditambahkan sensor *encoder quadrature* pada penggeraknya, dalam hal ini motor DC, agar dapat mengetahui posisi robot saat sedang menyeimbangkan diri atau saat *tracking*.
4. Pengembangan *balancing* robot beroda dua dapat digunakan untuk aplikasi *line follower* (penjejak garis) atau *wall follower* (penjejak dinding).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bejo, Agus, *C&AVR Rahasia Kemudahan Bahasa C dalam Mikrokontroler ATmega8535*. Graha Ilmu, Yogyakarta, 2008.
- [2] Budiharto, Widodo, *Membuat Robot Cerdas*, Elex Media Komputindo, Jakarta, 2006.
- [3] Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik Jilid 1*, Diterjemahkan Oleh Ir. Edi Leksono, Erlangga, Jakarta, 1994.
- [4] Kurniawan, Dayat, *Aplikasi Elektronika dengan Visual C# 2008 Express Edition*, Elex Media Komputindo, Jakarta, 2010.
- [5] Herdawatie, *Modelling and Control of a Balancing Robot using Digital State Space Approach*, Tesis S-2, Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia, 2005.
- [6] Setiawan, Iwan, *Kontrol PID untuk Proses Industri*, Elex Media Komputindo, Jakarta, 2008.
- [7] Colton, Shane, *The Balance Filter: A Simple Solution for Integrating Accelerometer and Gyroscope Measurements for a Balancing Platform*, <http://web.mit.edu/scolton/www/filter.pdf>, September 2011.
- [8] Camacho, Oscar, *AC317: Solutions Based in Accelerometers*, Freescale Semiconductor Inc., USA, 2007.
- [9] Clifford, Michelle and Leticia Gomez, *AN3107: Measuring Tilt with Low-g Accelerometers Rev. 0*, Freescale Semiconductor Inc., USA, 2005.
- [10] Tuck, Kimberly, *AN3461: Tilt Sensing Using Linear Accelerometers Rev. 2*, Freescale Semiconductor Inc., USA, 2007.
- [11] Tuck, Kimberly, *AN3447: Implementing Auto-Zero Calibration Technique for Accelerometers Rev. 0*, Freescale Semiconductor Inc., USA, 2007.
- [12] -----, *Liquid Crystal Display Module M1632 : User Manual*, Seiko Instrument Inc., Japan, 1987.
- [13] -----, *ATmega8535 Data Sheet*, <http://www.atmel.com>, Januari 2011.
- [14] -----, *LISY300 Gyroscope Module Data Sheet*, <http://www.parallax.com>, Juli 2011.
- [15] -----, *Mosfet*, <http://id.wikipedia.org/wiki/Mosfet>, Oktober 2011.
- [16] -----, *Opto isolator*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Opto-isolator>, Oktober 2011.

BIODATA MAHASISWA



Andra Laksana (L2F 309 009).
Saat ini sedang melanjutkan studi pendidikan strata I di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Konsentrasi Kontrol.

Mengetahui dan mengesahkan,
Dosen Pembimbing I Dosen Pembimbing II

Iwan Setiawan, S.T.,M.T. Sumardi, S.T.,M.T.
NIP.197309262000121001 NIP.196811111994121001
Tanggal: _____ Tanggal: _____