

# SISTEM KONTROL *INVERTED PENDULUM* PADA *BALANCING MOBILE ROBOT*

Mochamad Mobed Bachtiar<sup>#1</sup>, Bima Sena Bayu D<sup>#2</sup>, A.R. Anom Besari<sup>#3</sup>  
#Jurusan Teknik Komputer, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya  
Jl. Raya ITS Sukolilo, Surabaya  
[1mobed@student.eepis-its.edu](mailto:mobed@student.eepis-its.edu)  
[2bima@eepis-its.edu](mailto:bima@eepis-its.edu)  
[3anom@eepis-its.edu](mailto:anom@eepis-its.edu)

## Abstrak

*Sistem kontrol merupakan suatu sistem yang menjadi pusat perhatian di bidang robotika. Dengan adanya sistem kontrol ini, robot bisa menjadi lebih cerdas dan canggih. Robot berpendulum ini akan berusaha menyetimbangkan sistemnya agar pendulum tetap tegak 90°. Sebagai deteksi kemiringan antara robot dengan lantai digunakan sensor Sharp GP2D12 yang menghasilkan output tegangan analog. Data dari sensor ini akan diolah oleh Mikrokontroler ATmega 16, karena data yang dibawa oleh Sharp GP2D12 ini mempunyai noise, maka data harus difilter. Filter yang dipakai adalah Single Exponential Filtering yang bisa mereduksi noise secara optimal disamping juga mempunyai respon waktu yang cepat. Setelah selesai pemrosesan, hasil filter akan diolah dengan kontrol PID. Dengan sistem kontrol ini, robot mempunyai respon yang cepat untuk bergerak maju mundur searah dengan arah gerak jatuhnya pendulum. Prosentasi sistem keberhasilan PID ini adalah 90%.*

Keywords : Inverted Pendulum, Sharp GP2D12, Single Exponential Filtering, PID, Balancing Robot.

## 1. Pendahuluan

Penerapan inverted pendulum pada balancing mobile robot adalah bagaimana suatu robot dapat menyeimbangkan pendulum yang ada di atasnya. Pendulum ini labil dan selalu bergerak di atas titik tumpunya. Nantinya pendulum yang dipakai pada mobile robot ini adalah berupa body robot itu sendiri.

Teknik kontrol untuk permasalahan pendulum ini sedikit berbeda dengan permasalahan kontrol standar. Karena dalam mencoba untuk mengontrol posisi pendulum untuk kembali ke posisi vertikal setelah adanya gangguan, sinyal referensi yang kita tracking berharga nol. Gaya yang diaplikasikan pada pendulum dapat ditambahkan sebagai gangguan dalam bentuk impulse.

Kontroler PID merupakan kontrol yang baik untuk menyelesaikan sistem seperti ini, disamping tidak membutuhkan model matematika yang rumit, kontroler ini juga mempunyai respon yang cepat.

## 2. Perancangan Sistem

### 2.1 Filter Single Exponent

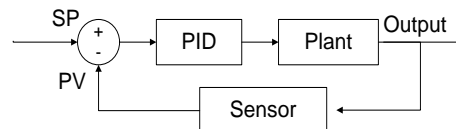
Untuk menghasilkan sinyal yang linear dari sebuah analog sensor, sebuah eliminasi data sangat diperlukan. Noise data dapat direduksi menggunakan filter *single exponent*.

$$y_{(n)} = (1 - a)x_{(n)} + ay_{n-1} [1]$$

Output sinyal filter adalah  $y_{(n)}$  dengan  $a$  adalah nilai random dengan  $0 < a < 1$ . Jika noise input terlalu dominan maka  $a$  mendekati 1, jika tidak maka nilai  $a$  mendekati 0.

### 2.2 PID Kontrol

Kontroler PID adalah kontroler umpan balik yang mampu meminimalisasi sinyal kesalahan. Setiap konstanta parameter Proporsional(P), Integral(I) dan Derivatif(D) mempunyai karakteristik yang sangat berpengaruh terhadap respon output sistem.

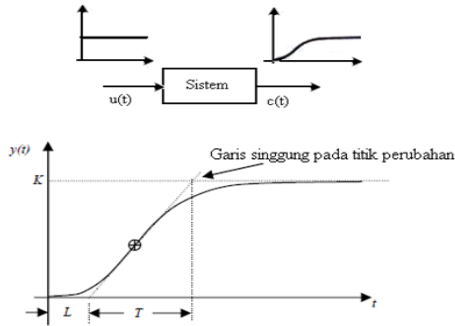


Gambar 2.1 Umpan Balik Kontroler PID

### 2.3 Tuning PID

Permasalahan terbesar dalam desain kontroler PID adalah menentukan nilai  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ . Metode-metode tuning dilakukan berdasarkan model matematika *system / plant*. Jika model matematika tidak diketahui maka dilakukan dengan eksperimen terhadap sistem.

Cara menentukan tuning PID juga bisa berdasarkan metode tuning Ziegler-Nichol. Metode tuning Ziegler-Nichols dilakukan secara eksperimen (asumsi model belum diketahui). Metode ini bertujuan untuk pencapaian *maximum overshoot* (MO) : 25 % terhadap masukan *step*. Bentuk kurva dari kontrol PID dengan menggunakan metode Ziegler Nichols 1 :



Gambar 2.2 : Kurva Tuning PID Ziegler Nichols orde 1

Dimana :

$L = \text{Delay time}$

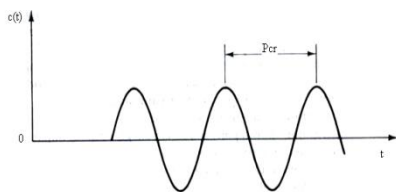
$T = \text{Konstanta waktu tunda}$

Tabel perhitungan nilai PID :

Tabel 2.1 : Ziegler Nichols orde1

Tipe Kontrol	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$T/L$	$\sim$	0
PI	$0.9 T/L$	$L/0.3$	0
PID	$1.2 T/L$	$2L$	$0.5L$

Jika output osilasi dari plant system terlalu besar, maka kurva diatas tidak berlaku. Cara kedua yang digunakan adalah dengan eksperimen memberikan nilai  $K_p$  sampai ditemukan osilasi system tiap periodenya.



Gambar 2.3 : Kurva Tuning PID Ziegler Nichols orde 2

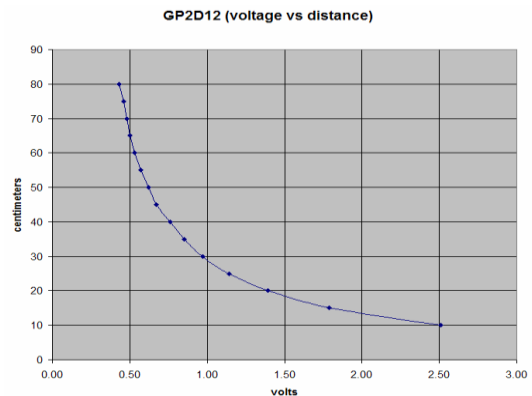
Dimana nilai  $K_p$  tersebut akan menjadi nilai  $K_{cr}$  sedangkan nilai  $P_{cr}$  didapat dari periode system berosilasi satu gelombang penuh. Tabel perhitungan nilai PID :

Tabel 2.1 : Ziegler Nichols orde1

Tipe Kontrol	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5 K_{cr}$	$\sim$	0
PI	$0.45 K_{cr}$	$1/1.2 P_{cr}$	0
PID	$0.6 K_{cr}$	$0.5 P_{cr}$	$0.125 P_{cr}$

## 2.4 Sensor Sharp GP2D12

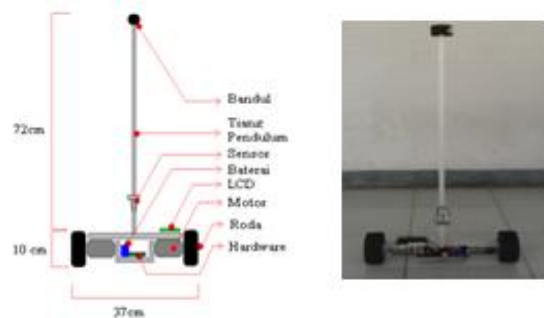
Sharp GP2D12 adalah sebuah sensor analog yang memberikan output tegangan yang besar nilai tegangannya berdasarkan jarak kedekatannya terhadap benda. Sinyal analog output dari sensor ini tidak memberikan range yang sama setiap perbedaan jarak.



Gambar 2.4 : Kurva Tuning PID Ziegler Nichols orde 2

## 2.5. Desain Mekanik

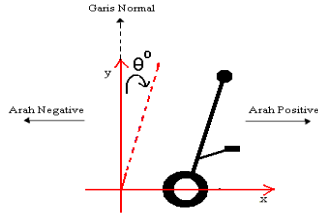
Bentuk robot ini seperti huruf "T" terbalik.dengan letak beban ada di bawah.



Gambar 2.5 : Desain Mekanik

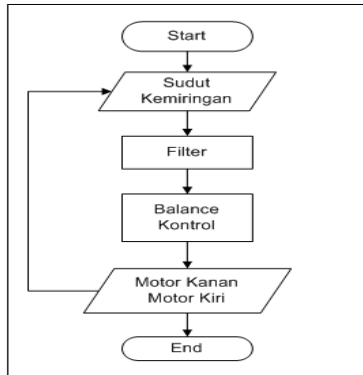
## 3. Cara Kerja Sistem

Tujuannya adalah bagaimana perancangan sistem dapat menggerakkan robot agar selalu seimbang meskipun diberikan gangguan dari luar. Input kendali robot berasal dari jarak kemiringan pendulum robot dengan lantai.



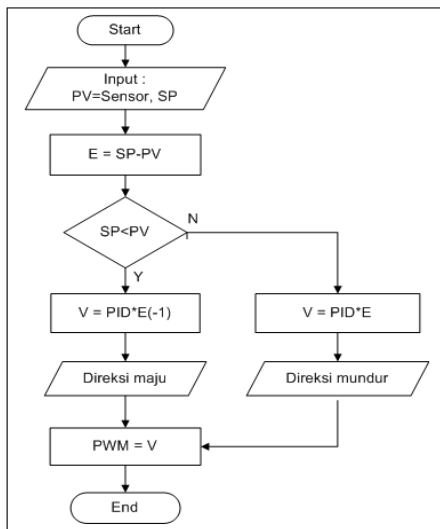
Gambar 3.1 : Ilustrasi arah gerak kemiringan robot

Pada gambar di atas garis normal menunjukkan titik keseimbangan robot yang pada posisi ini robot akan berdiri tegak. Garis normal yang menjadi titik referensi keseimbangan dinamakan sebagai Set Point (SP), dan kemiringan sudut terhadap garis normal sebagai nilai Present Value (PV).



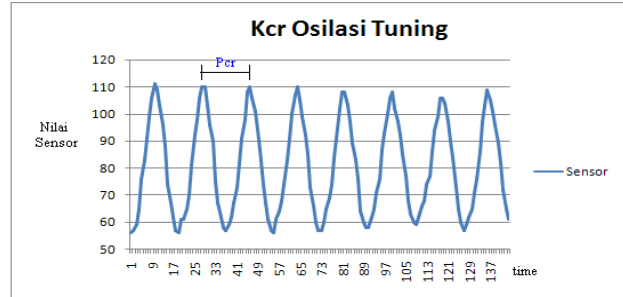
Gambar 3.2 : Cara Kerja Robot

Gerakan maju mundur motor diperoleh dari pengurangan nilai SP terhadap PV.



Gambar 3.3 : Direksi Gerakan Robot

Dari tabel Ziegler Nichols orde 2, didapatkan sinyal osilasi dengan nilai  $K_{cr} = 12$  dan  $P_{cr} = 900$  :



Gambar 3.4 : Sinyal Osilasi (50ms/sampling)

Sehingga diperoleh :

$$K_p = 0.6 * K_{cr}$$

$$K_p = 0.6 * 12$$

$$K_p = 7.2$$

$$T_i = 0.5 * P_{cr}$$

$$T_i = 0.5 * 90$$

$$T_i = 450$$

$$K_i = K_p / T_i$$

$$K_i = 33 / 450$$

$$K_i = 0.016$$

$$T_d = 0.125 * P_{cr}$$

$$T_d = 0.125 * 450$$

$$T_d = 112.5$$

$$K_d = K_p * T_d$$

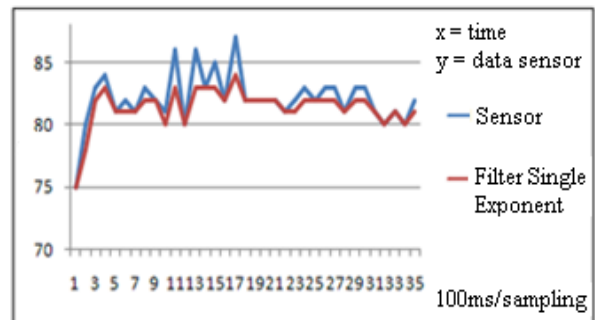
$$K_d = 7.2 * 112.5$$

$$K_d = 810$$

#### 4. Hasil Pengujian

##### 4.1 Pengujian Sensor

Hasil Linearisasi filter input ADC dari sensor ditunjukkan sebagai :

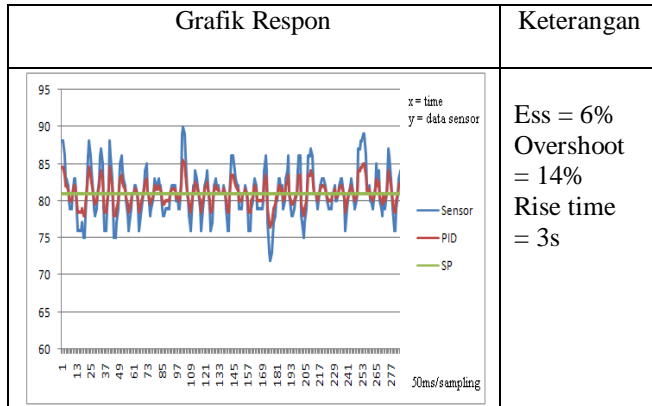


Gambar 4.1 : Filter Single Exponent

Gambar tersebut dengan pendekatan konstanta  $a$  adalah 0.47 karena noise yang dihasilkan tidak terlalu besar.

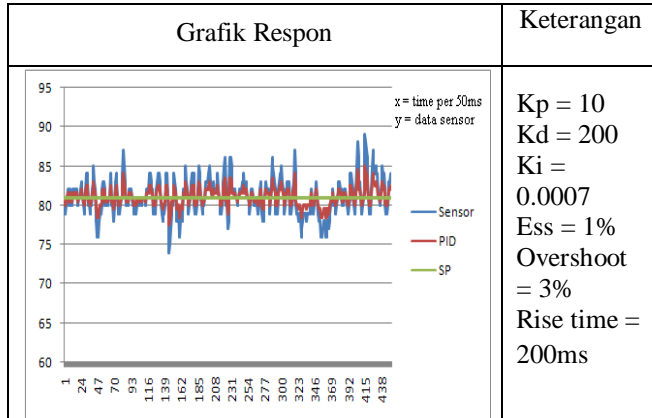
#### 4.2 Pengujian PID

Plot sinyal PID hasil dari respon system robot sesuai teori Ziegler Nichols, dengan  $K_P = 7.2$ ,  $K_I = 810$ , dan  $K_D = 0.016$  didapatkan :



Gambar 4.2 : Hasil Sinyal  $K_p=5, K_d=810, K_i=0.007$

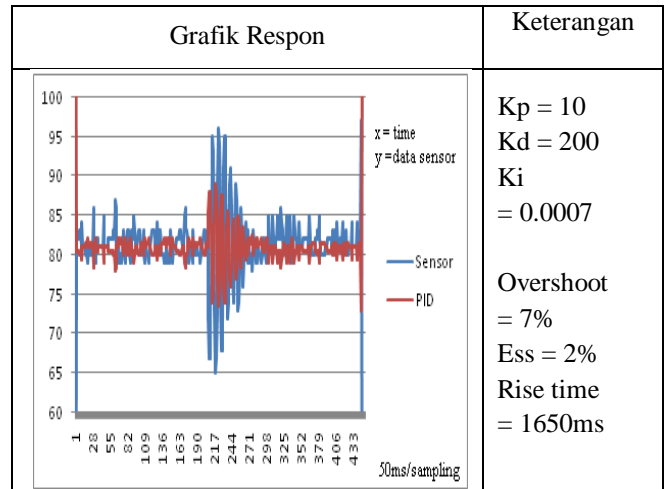
Sedangkan jika nilai PID dicari dengan eksperimen *trial and error* maka didapat  $K_p$  yang baik adalah 10,  $K_d = 200$  dan  $K_i = 0.0007$ . Berikut plotnya :



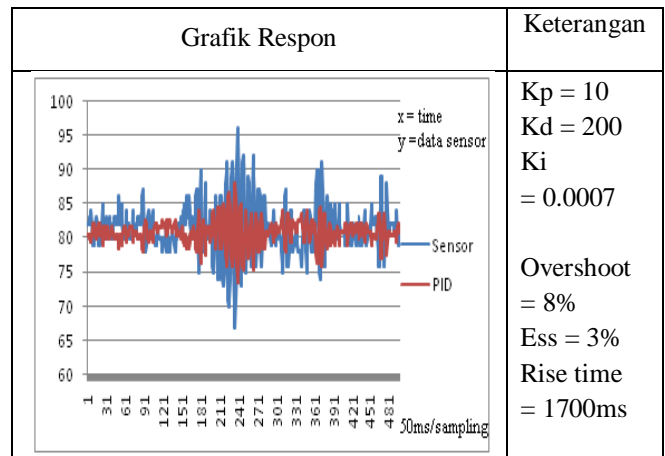
Gambar 4.3 : Hasil Plot Sinyal PID *trial and error*

#### 4.3 Pengujian Kestabilan Robot

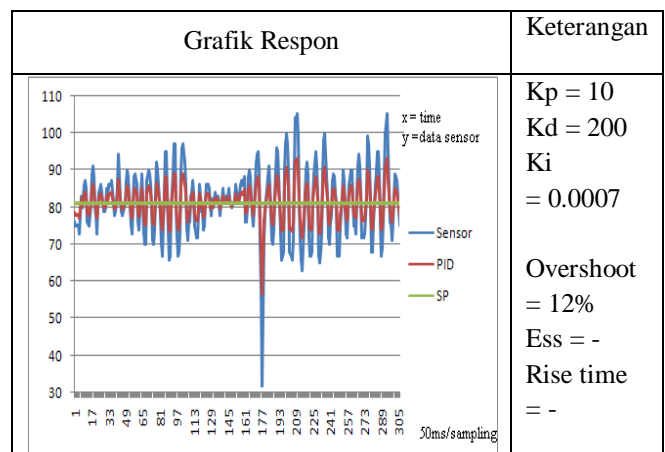
Berikut adalah pengujian robot di beberapa lantai yang berbeda :



Gambar 4.4 : Robot di lapangan Spon



Gambar 4.5 : Robot di Lapangan keramik



Gambar 4.6 : Robot di Lapangan kaca

## 5. Kesimpulan

Dari hasil analisa pengujian di atas dapat diambil beberapa kesimpulan :

1. Kontroler PID mempunyai respon yang berbeda terhadap ketinggian robot yang berbeda.
2. Dalam merancang sebuah mekanik robot *inverted pendulum* perlu diperhatikan penggunaan kecepatan motor yang dipakai. Karena motor harus bisa mengejar dengan cepat jatuhnya *pendulum*.
3. Sebuah motor dengan percepatan  $1.54 \text{ m/s}^2$  bisa optimal jika digunakan untuk mengontrol sebuah *inverted pendulum* dengan tinggi 20cm dan sudut gangguan terbesar  $12^\circ$ .
4. Dari hasil respon PID robot, didapatkan bahwa *overshoot* maksimal adalah  $< 20\%$ , *error steady state*  $< 8\%$ , dan *rise time* untuk kembali ke titik stabil adalah  $< 3\text{s}$ . Hal ini menandakan bahwa kontroler PID bekerja dengan baik pada sistem yang berosilasi.
5. Penempatan titik berat beban harus mengarah ke bawah, sehingga secara mekanik akan membantu robot untuk berdiri seimbang.

## References

- [1] Charais.,John, Ruan Lourens, “*Software PID Control of an Inverted Pendulum Using the PIC16F684*”. Microchip Technology Inc. 2004
- [2] LaViola Jr., Joseph J., ” *Double Exponential Smoothing: An Alternative to Kalman Filter-Based Predictive Tracking*, Brown University Technology Center. 2003.
- [3] Baik, Kyungjae” *BoRam: Balancing Robot using Arduino and Lego* “,2008
- [4] Miller, Peter.”*Building a Two Wheeled Balancing Robot*”. University of Southern Queensland. 2008
- [5] Miranda, José Luis Corona, ” *Application of Kalman Filtering and PID Control for Direct Inverted Pendulum Control* “,California State University, 2009.
- [6] Chi Ooi, Rich, ”*Balancing a Two-Wheeled Autonomous Robot*“, School of Mechanical Engineering Final Year Thesis, 2003.
- [7] Chang, Po-Kuang, Jium-Ming Lin Member, IAENG, and Kun-Tai Cho,” *Ziegler-Nichols-Based Intelligent Fuzzy PID Controller Design for Antenna Tracking System* “, International Multiconference of Engineers and Computer Scientists, 2011.
- [8] Copeland, Brian R,” *The Design of PID Controllers using Ziegler Nichols Tuning*“,2008.
- [9] Ogata, Katsuhiko, ” *Modern Control Engineering Thrid Edition* “,University of Minnesota, 1997.
- [10] H Yu, Y Liu and T Yang, ” *Closed-loop tracking control of a pendulum-driven cart-pole underactuated system* “, *Journal of Systems and Control Engineering*. 2008.
- [11] Hafis, Mohamad Hadi bin Mohamad Jamil, ”*Two wheeled balancing robot*”. Universiti Teknologi Malaysia.2010-2011.
- [12] Widada, Wahyu, ” *Aplikasi digital exponential filtering untuk embedded sensor payload roket* “, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional, 2005.
- [13] <http://www.scienceprog.com/ease-h-bridge-on-mosfet-irf7105-transistors/>
- [14] Sharp GP2D12 Analog Distance Sensor, Parallax datasheet.