

Pengaturan Gerak Dan Keseimbangan Robot *Line Tracer* Dua Roda Menggunakan PID Controller

Sonie Ruswanto¹⁾, Endah Suryawati Ningrum²⁾, Irwan Ramli³⁾

¹⁾ Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

²⁾ Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

³⁾ Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

Email: ¹⁾sonie_jmf@yahoo.com.sg, ²⁾endah@eeepis-its.edu, ³⁾irwan@polman-timah.ac.id

Abstrak

Pengaturan gerak dan keseimbangan robot *line tracer* dua roda sebenarnya merupakan gabungan antara konsep keseimbangan robot beroda dua dan konsep robot pengikut garis. Tujuan utama dari penelitian ini adalah menjaga robot dalam keadaan tegak lurus dan dapat bergerak mengikuti garis pandu dengan tetap mempertahankan keseimbangannya. Dalam penelitian ini digunakan *accelerometer sensor* yang mempresentasikan sudut elevasi terhadap bumi dan sensor garis menggunakan pasangan LED dan foto dioda. Permasalahan mempertahankan keseimbangan telah dapat diselesaikan dengan menerapkan algoritma pengontrol PID dengan tuning nilai konstanta, dan permasalahan bergerak mengikuti garis telah dapat diselesaikan dengan metode *lookup table*. Permasalahan yang timbul adalah pada saat penggabungan kedua konsep, berjalan mengikuti garis dengan tetap mempertahankan keseimbangannya belum dapat tercapai dengan sempurna. Robot hanya dapat mengikuti garis sekitar 5 detik. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pengaturan keseimbangan robot roda dua dapat dengan cepat tercapai selama mekanik robotnya stabil. Keseimbangan akan sulit terpenuhi jika bagian atas robot dibebani benda berat.

Kata kunci: dua roda, seimbang, *accelerometer*, PID.

1. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi telah membuat berbagai bangsa didunia ini berlomba menciptakan alat yang mampu bersaing dengan bangsa lain. Demikian halnya dalam perkembangan teknologi robotika. Sekarang ini bukan hanya negara-negara maju saja yang mampu membuat robot yang memiliki teknologi tinggi, tetapi negara-negara berkembang pun sudah mulai menggarap industri robot mereka.

Pada umumnya robot *line tracer* dibuat dengan menggunakan tiga atau empat buah roda, dua buah roda belakang yang terhubung dengan motor DC berfungsi sebagai penggerak dan satu atau dua buah roda depan yang berfungsi sebagai pengarah, namun pada penelitian ini akan dibuat robot *line tracer* yang hanya menggunakan dua buah roda.

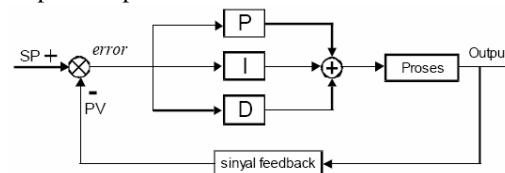
Pada penelitian ini membahas aplikasi sensor *accelerometer* MMA7260 yang menghasilkan keluaran berupa tegangan analog yang merepresentasikan sudut elevasi terhadap bumi. Pembacaan garis pandu menggunakan pasangan LED dan foto dioda sebanyak empat pasang. Mikrokontroler digunakan sebagai otak pada robot ini, dimana keseluruhan algoritma PID controller dibuat dengan program bahasa C kemudian dikompilasi agar bisa disimpan ke dalam Mikrokontroler. Tanpa suatu kendali yang aktif maka robot akan jatuh, oleh karena itu pengontrol PID mempunyai peran penting dalam penelitian ini.

2. TEORI PENUNJANG

Ide dasar untuk membuat robot beroda dua dapat setimbang adalah sangat mudah yaitu dengan cara mengendalikan roda searah dengan arah jatuhnya *body* robot. Apabila proses tersebut dapat terlaksana maka robot tersebut dapat setimbang. Untuk mengendalikan pergerakan robot diperlukan suatu pengendali (*controller*). Pada penelitian ini pengendali yang digunakan adalah PID *controller*.

PID Controller

Karakteristik PID *controller* sangat dipengaruhi oleh kontribusi besar dari ketiga parameter P, I dan D. Penyetelan konstanta K_p , T_i , dan T_d akan mengakibatkan penonjolan sifat dari masing-masing elemen. Satu atau dua dari ketiga konstanta tersebut dapat diset lebih menonjol dibanding yang lain. Konstanta yang menonjol itulah akan memberikan kontribusi pengaruh pada respon sistem secara keseluruhan. Setiap kekurangan dan kelebihan dari masing-masing kontroler P, I dan D dapat saling menutupi dengan menggabungkan ketiganya secara paralel menjadi kontroler PID. Gambar 1 menunjukkan blok diagram pengontrol PID loop tertutup.



Gambar 1 Blok Diagram PID *controller* Loop Tertutup

Sumber: (Bachri M, 2004)

Dari blok diagram diatas dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. $SP = Set Point$, secara simple maksudnya ialah suatu prameter nilai acuan atau nilai yang kita inginkan.
2. $PV = Present Value$, maksudnya ialah nilai bobot pembacaan sensor saat itu atau variabel terukur yang diumpanbalikkan oleh sensor (sinyal *feedback* dari sensor).
3. Error = nilai kesalahan, yakni deviasi atau simpangan antar variabel terukur atau bobot sensor (PV) dengan nilai acuan (SP).

$$error = SP - PV \quad \dots\dots(1)$$

Proporsional *controler* (K_p) akan memberikan efek mengurangi waktu naik, tetapi tidak menghapus kesalahan keadaan tunak, Integral *controler* (K_i) akan memberikan efek menghapus keadaan tunak, tetapi berakibat memburuknya respon transien, Diferensial *controler* (K_d) akan memberikan efek meningkatnya stabilitas sistem, mengurangi over-shoot, dan menaikkan respon transfer. Efek dari setiap kontroler (K_p, K_i, K_d) dalam sistem loop tertutup diperlihatkan pada tabel 1.

Tabel 1 Efek dari setiap kontroler (K_p, K_i, K_d) dalam loop tertutup.

Respon Loop tertutup	Waktu naik	Over-shoot	Waktu turun	Kesalahan keadaan tunak
K_p	Menurun	Meningkat	Perubahan kecil	Menurun
K_i	Menurun	Meningkat	Meningkat	Hilang
K_d	Perubahan Kecil	Menurun	Menurun	Perubahan kecil

Sumber: (Fachri, 2010)

Kombinasi beberapa jenis kontroler diperbolehkan adalah PI, PD, PID.

Persamaan untuk kontroler PID paralel adalah sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad \dots\dots(3)$$

$$U(s) = K_p E(s) + \frac{1}{T_i s} E(s) + T_d s E(s) \quad \dots\dots(4)$$

$$U(s) = K_p E(s) + \frac{K_i}{s} E(s) + K_d s E(s) \quad \dots\dots(5)$$

Penalaan parameter PID didasarkan terhadap kedua konstanta hasil eksperimen, K_{cr} dan P_{cr} . Ziegler dan Nichols menyarankan penyetelan nilai parameter K_p, T_i , dan T_d berdasarkan rumus yang diperlihatkan pada tabel 2.

Tabel 2a Penalaan parameter PID dengan metode osilasi.

Tipe Pengontrol	K_p	T_i	T_d
P	0.5 K_{cr}		

PI	0.45 K_{cr}	1/1.2 P_{cr}	
PID	0.6 K_{cr}	0.5 P_{cr}	0.125 P_{cr}

Sumber: Maeda, 1993

Tabel 2b Penalaan parameter PID dengan metode kurva reaksi (Maeda, 1993)

Tipe Pengontrol	K_p	T_i	T_d
P	T/L		
PI	0.9 T/L	L/0.3	
PID	1.2 T/L	2L	0.5L

Sumber: Maeda, 1993

Accelerometer

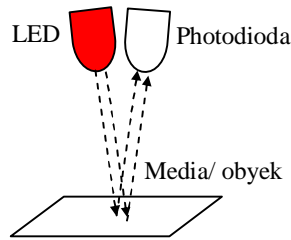
Accelerometer adalah sebuah transduser yang berfungsi untuk mengukur percepatan, mendeteksi dan mengukur getaran, ataupun untuk mengukur percepatan akibat gravitasi bumi. *Accelerometer* juga dapat digunakan untuk mengukur getaran yang terjadi pada kendaraan, bangunan, mesin, dan juga bisa digunakan untuk mengukur getaran yang terjadi di dalam bumi, getaran mesin, jarak yang dinamis, dan kecepatan dengan ataupun tanpa pengaruh gravitasi bumi.

Prinsip kerja dari transduser ini berdasarkan hukum fisika bahwa apabila suatu konduktor digerakkan melalui suatu medan magnet, atau jika suatu medan magnet digerakkan melalui suatu konduktor, maka akan timbul suatu tegangan induksi pada konduktor tersebut. *Accelerometer* yang diletakan di permukaan bumi dapat mendeteksi percepatan $1g$ (ukuran gravitasi bumi) pada titik vertikalnya, untuk percepatan yang dikarenakan oleh pergerakan horizontal maka *accelerometer* akan mengukur percepatannya secara langsung ketika bergerak secara horizontal. Hal ini sesuai dengan tipe dan jenis sensor *Accelerometer* yang digunakan karena setiap jenis sensor berbeda-beda sesuai dengan spesifikasi yang dikeluarkan oleh perusahaan pembuatnya.

Foto dioda

Foto dioda (*photodiode*) disini digunakan sebagai komponen pendeteksi ada tidaknya cahaya maupun dapat digunakan untuk membentuk sebuah alat ukur akurat yang dapat mendeteksi intensitas cahaya dibawah $1pW/cm^2$ sampai intensitas di atas $10mW/cm^2$.

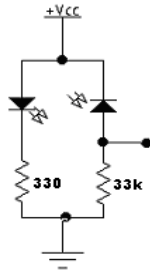
Photodiode mempunyai resistansi yang rendah pada kondisi forward bias, kita dapat memanfaatkan photodiode ini pada kondisi reverse bias di mana resistansi dari photodiode akan turun seiring dengan intensitas cahaya yang masuk, seperti halnya yang ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2 Pemanfaatan Photodiode sebagai Sensor
 Sumber: (Modul Line Tracer - MC Teknik Elektro ITS, 2004)

Jika photodiode tidak terkena cahaya, maka tidak ada arus yang mengalir ke rangkaian pembanding, jika photodiode terkena cahaya maka photodiode akan bersifat sebagai tegangan, sehingga Vcc dan photodiode tersusun seri, akibatnya terdapat arus yang mengalir ke rangkaian pembanding.

Rangkaian sensor garis dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3 Rangkaian Sensor Garis
 Sumber: (Modul Line Tracer - MC Teknik Elektro ITS, 2004)

3. PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI

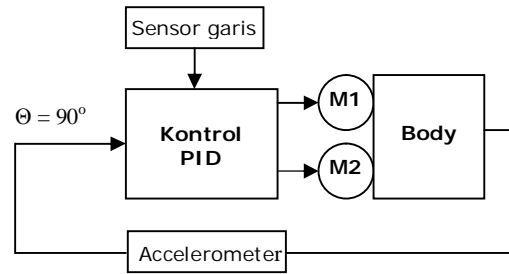
Konfigurasi Sistem

Secara umum, perancangan dan pembuatan yang terdapat pada penelitian ini terdiri dari dua bagian dasar, yaitu bagian perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*). Sistem sensor menyediakan data bagi mikrokontroler untuk mengatur jalannya robot. Berikut adalah beberapa jenis dari sensor yang digunakan pada robot ini yaitu: accelerometer dan sensor garis.

Dari segi mekanik, robot ini hanya memiliki dua roda yang berfungsi sebagai penggerak.

Piranti pengolah yang digunakan sebagai sistem pengendali adalah sistem minimum yang menggunakan mikrokontroler AVR ATmega16, dimana sistem ini dapat diprogram langsung dengan menggunakan bahasa C.

Gambaran sistem yang kami rancang pada penelitian ini adalah seperti yang tampak pada gambar 4.



Gambar 4 Diagram Sistem Pengaturan Gerak dan Keseimbangan Robot *Line Tracer* Dua Roda

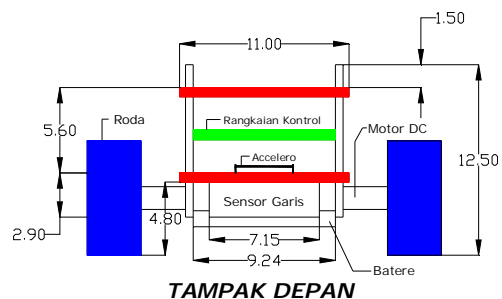
Accelerometer berfungsi memberikan informasi kepada pengontrol posisi kemiringan *body* robot, dan sensor garis berfungsi sebagai pemberi informasi apakah robot berada dalam garis panduan atau tidak. Informasi yang diterima, diolah oleh pengontrol untuk melakukan aksi dengan menggerakkan motor.

Perancangan dan Pembuatan Konstruksi Mekanik Robot

Konstruksi mekanik robot ini terdiri dari *body* robot beserta motor DC dan roda. *Body* robot terdiri atas landasan, penyangga dan penutup. Landasan dan penutup dibuat dari bahan berjenis *acrylic* dengan ketebalan 5mm, penyangga menggunakan *spicer* besi.

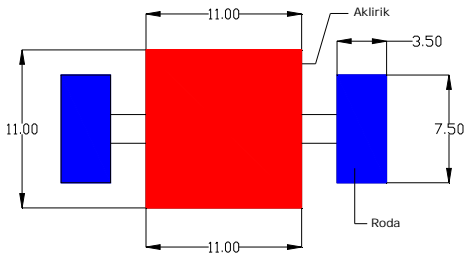
Bagian penggerak menggunakan motor DC 12 volt yang di-*couple* dengan *gear box*. Roda terbuat dari bahan plastik dan karet. Baterai dipasang di bawah *body* pada bagian tengah.

Dimensi dan penempatan komponen mekanik dapat dilihat pada gambar 5. Satuan penunjukan ukuran yang dipakai pada gambar dimensi adalah senti meter (cm).



Gambar 5 Dimensi Robot Tampak Depan

Untuk gambar dimensi robot tampak atas dapat dilihat pada gambar 6.

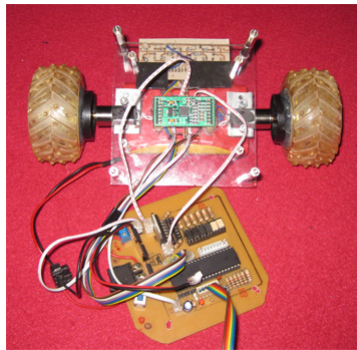


TAMPAK ATAS

Gambar 6 Dimensi Robot Tampak Atas

Pemasangan motor DC beserta roda diletakkan ditengah-tengah landasan bertujuan agar beban yang diterima motor dan roda seimbang. Begitu juga halnya dengan peletakan batere dibawah as roda, bertujuan agar beban yang diterima roda seimbang.

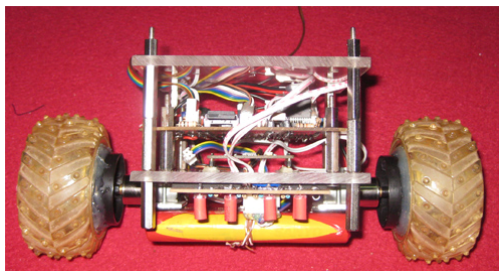
Peletakan batere, motor DC beserta roda, dan landasan robot dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7 Body Robot

Gambar 7 adalah bentuk asli landasan *body* robot beserta komponen yang belum dirakit ke *body* robot. Bentuk asli dari robot setelah dirakit dapat dilihat pada gambar 8.

Robot ini ini dirancang sedemikian rupa agar titik tumpunya benar-benar berada di tengah. Massa dari robot setelah jadi adalah 0,775kg.



Gambar 8 Robot Tampak dari Depan

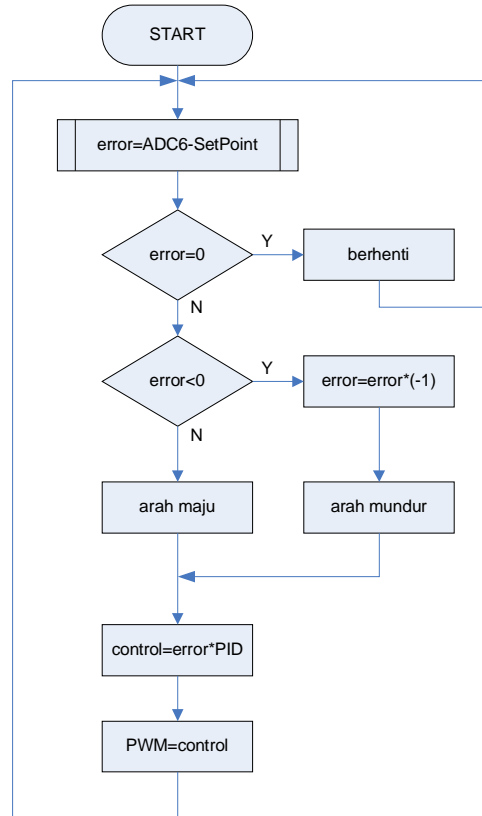
Perancangan Kontrol

Perancangan kontrol pada penelitian ini adalah suatu tahapan dalam rangka mengontrol pergerakan

robot agar tetap seimbang dan dapat berjalan mengikuti garis panduan.

Sebelum merancang kontrol pergerakan robot berjalan mengikuti garis, terlebih dahulu mengupayakan agar robot dapat mempertahankan keseimbangannya.

Proses pengontrolan keseimbangan menggunakan kontrol PID dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 9 Flowchart Kontrol PID

ADC6 adalah nilai dari sensor *accelerometer* yang mengukur kemiringan *body* robot. SetPoint adalah nilai saat *body* robot seimbang, sehingga saat $error = 0$, artinya robot dalam keadaan seimbang sehingga robot berhenti, tidak maju dan tidak mundur. Saat $error < 0$ robot condong ke belakang sehingga robot harus maju untuk mempertahankan keseimbangannya. Saat $error > 0$ robot condong ke depan sehingga robot harus maju agar seimbang.

Semakin besar nilai error semakin besar pula nilai PWM yang dihasilkan, artinya semakin besar kecondongan *body* robot, putaran roda semakin cepat.

Untuk memperoleh besarnya nilai K_p , K_i , dan K_d adalah dengan melakukan tuning sesuai dengan metode *Ziegler-Nichols*. Namun untuk mempermudah penentuan awal besarnya nilai K_p , K_i , dan K_d tersebut adalah dengan melakukan perhitungan sebagai berikut:

open-loop transfer function dari motor DC adalah:

$$\frac{\theta}{V} = \frac{Kt}{(Js + b)(Ls + R) + Kt^2} \quad \dots\dots(6)$$

Dimana:

Resistansi motor (R) = 2,63 ohm

Induktansi motor (L) = 1,35 H

Konstanta *electromotive force* (Kt) = 1,86 Nm/Amp
moment of inertia of the rotor (J) = 2,2 x 10⁻⁴ kg.m²/s²
damping ratio of the mechanical system (b) = 1 Nms

Nilai-nilai yang dimasukkan ke persamaan 2 diperoleh dari data motor yang dapat dilihat pada gambar 10.

Item	Parameter	Symbol	Units	
46	Reference Voltage	E	V	12.0
47	Torque Constant	K _T	oz-in/A	1.86
48	Back-EMF Constant	K _E	V/krpm	1.38
49	Resistance	R _T	Ω	2.63
50	Inductance	L	mH	1.35
51	No-Load Current	I ₀	A	0.26
52	Peak Current (Stall)	I _p	A	4.56
35	Armature/Rotor Inertia	J _M	oz-in-s ²	2.2 X 10 ⁻⁴
36	Electrical Time Constant	τ _E	ms	0.53
37	Mechanical Time Constant	τ _M	ms	22.8
38	Viscous Damping- Infinite Source Impedance	D	oz-in/krpm	0.0086
39	Viscous Damping- Zero Source Impedance	K _D	oz-in/krpm	1.00

Gambar 10 Data Motor

Sumber: (Data Sheet Motor DC GM9000 Series)

Hasil dari perhitungan setelah nilai dari data motor dimasukkan ke persamaan 2 adalah sebagai berikut:

$$\frac{\theta}{V} = \frac{1,86}{(0,0022s + 1)(1,35s + 2,63) + 1,86^2}$$

$$\frac{\theta}{V} = \frac{1,86}{0,000293s^2 + 1,3505786s + 60896}$$

Dalam aplikasinya, peran pengontrol ini dapat diterapkan dalam program dengan formulasi sebagai berikut:

$$pwm_motor = SetPoint + Kp \cdot error + Ki \cdot i_error + Kd \cdot d_error$$

4. PENGUJIAN

Pada bagian pengujian, telah dilakukan pengujian terhadap sensor, motor, kontroler dan algoritma untuk mengetahui karakteristik, kestabilan dan kesesuaian target yang diinginkan. Hasil

pengujian *accelerometer* terhadap posisi *body* robot dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3 Hasil pengukuran *accelerometer* MMA7260 pada robot.

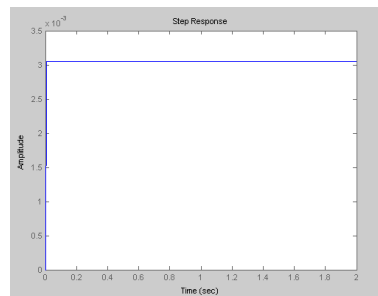
Posisi Body Robot	Nilai ADC
Maksimal condong ke belakang	78
Tegak lurus	84
Maksimal condong ke depan	89

Dari tabel 3 diketahui bahwa yang menjadi set point adalah 84, namun posisi seimbang robot yang sebenarnya tidaklah tegak lurus tapi agak condong sedikit ke belakang dengan nilai pembacaan ADC *accelerometer* 83 sehingga nilai 83 inilah yang dijadikan set point.

Untuk memperoleh nilai konstanta PID salah satunya menggunakan aplikasi Matlab dengan menggunakan persamaan fungsi alih motor DC yang telah dihitung pada perancangan kontrol. Bentuk fungsi alih *close loop* dengan penambahan Kp, Ki, dan Kd adalah sebagai berikut:

$$\frac{\theta}{V} = \frac{1,86x(Kp + Ki + Kd)}{0,000293s^3 + (1,3505786 + Kd)s^2 + (60896 + Kp)s + Ki}$$

Setelah melakukan beberapa kali uji coba pada Matlab, didapatkan nilai Kp, Ki, dan Kd yang terbaik, yakni Kp=10, Ki=0, dan Kd=1. Hasil step respon dengan menggunakan konstanta tersebut dapat dilihat pada gambar 11.

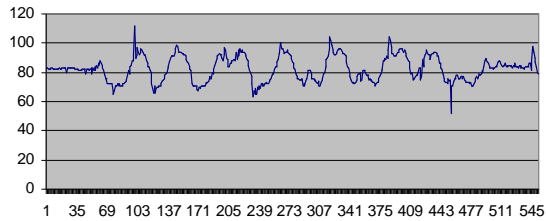


Gambar 11 Grafik Step Respon Motor DC dengan pengontrol PID

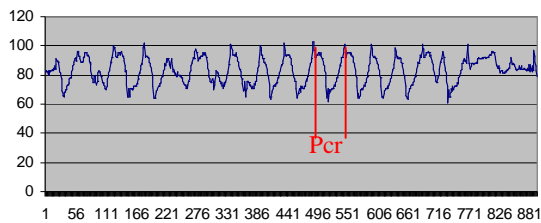
Dengan menggunakan nilai konstanta tersebut, robot sudah dapat menjaga keseimbangannya namun sulit mendapatkan posisi berhenti sehingga perlu ditambah range error untuk posisi berhenti. Kondisi berhenti yang tadinya saat error = 0 diubah menjadi antara -1 sampai 1. Setelah diterapkan robot dengan mudah dapat mencapai posisi seimbang.

Berikunya adalah hasil pengujian pada kontroler dengan mengikuti metode *Ziegler – Nichols* untuk penalaannya hanya dilakukan pada kontroler P saja. Gain kontrol dinaikkan perlahan sampai sistem mulai mengalami osilasi.

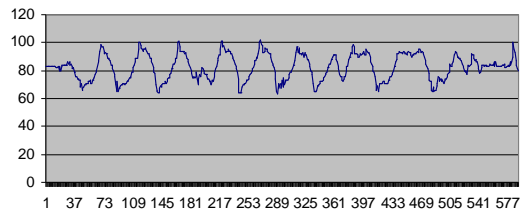
Grafik hasil perubahan nilai ADC *accelerometer* terhadap besarnya nilai K_p yang diberikan dapat dilihat pada gambar 12.



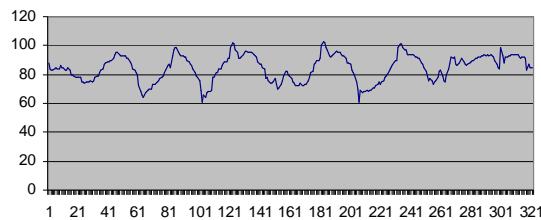
Gambar 12a Nilai ADC *Accelerometer* dengan $K_p=5$



Gambar 12b Nilai ADC *Accelerometer* dengan $K_p=10$



Gambar 12c Nilai ADC *Accelerometer* dengan $K_p=15$



Gambar 12d Nilai ADC *Accelerometer* dengan $K_p=20$

Berdasarkan data yang diperoleh dari gambar 12, maka nilai konstanta K_p yang diinginkan saat robot beresilasi adalah 10. Nilai ini disebut penguatan kritis (K_{cr}). Periode saat itu disebut periode kritis (P_{cr}), nilainya adalah 50,5. Selanjutnya untuk menentukan nilai konstanta kontrolernya sesuai dengan metode *Ziegler – Nichols* seperti yang tertera pada tabel 2a. Setelah diperoleh nilai sesuai tabel 2a, selanjutnya nilai K_i dan K_d dihitung sesuai persamaan 4 dan 5, sehingga diperoleh $K_p = 6$, $K_i = 0,0396039603960396$, $K_d = 6,3125$. Nilai-nilai

tersebut dibulatkan menjadi $K_p = 6$, $K_i = 0$, dan $K_d = 6$.

Setelah nilai konstanta PID hasil pengujian tersebut diterapkan dalam aplikasi robot, hasilnya lebih baik daripada menggunakan konstanta yang diperoleh dari simulasi menggunakan matlab.

5. KESIMPULAN

Setelah melakukan tahap perancangan dan pembuatan sistem yang kemudian dilanjutkan dengan pengujian dan analisa maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Pengaturan keseimbangan robot roda dua lebih mudah dilakukan jika mekanik robotnya stabil, bagian bawah robot lebih berat daripada bagian atas. Pengaturan keseimbangan akan sulit terpenuhi jika bagian atas robot ada benda berat. Penerapan kontrol yang baik tentunya memegang peranan penting dalam hal ini.
- Penggabungan antara keseimbangan dan mengikuti garis belum dapat terpenuhi dengan baik, masih perlu penelitian yang lebih mendalam mengenai hal ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bachri M, Samsul, "Sistem Kendali Hybrid PID - Logika Fuzzy Pada Pengaturan Kecepatan Motor DC", *Makara-Teknologi*, Vol. 8, No. 1, hal. 25-34, 2004.
- [2] Fachri, Zoel, *Perencanaan Balancing Robot dengan Dua Roda*, Proyek Akhir D4 Jurusan Teknik Elektronika, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Surabaya, 2010.
- [3] Maeda, Y. Kuswadi, Son. M, Nuh. Sulistyio MB. *Kontrol Automatik*. Politeknik Elektronika Surabaya, 1993.
- [4] Pitowarno, Endra, *Robotika Desain, Control, Dan Kecerdasan Buatan*, Penerbit Andi, Yogyakarta, 2006.
- [5] Sigit, Riyanto, *Robotika, Sensor & Aktuator*, Graha Ilmu, Yogyakarta, 2007.
- [6] Sumardi, Setiawan, I., Donnel, H., "Rancang Bangun Robot Pengikut Garis Dan Pendeteksi Halangan Menggunakan Mikrokontroler At89s51", *Transmisi-Jurnal Teknik Elektro*, Jilid 10, Nomor 3, hal. 126-130, 2008.
- [7] Modul Line Tracer - MC Teknik Elektro ITS, 2004, <http://www.findtoyou.com/document>, diakses tanggal 7 Nopember 2010.
- [8] Data Sheet Motor DC GM9000 Series.
- [9] Data sheet Sure Board MMA7260.
- [10] Data sheet AT Mega 16.
- [11] *BaliBot, An Inverted Pendulum Robot*, website: <http://home.comcast.net/~botronics/balibot.html> diakses pada tanggal 19 juni 2011.
- [12] *Equibot the Balancing Robot*, website: <http://homepage.mac.com/sigfpe/Robotics/equibot.html> diakses pada tanggal 19 juni 2011.

- [13] *nBot Balancing Robot*, website:
<http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/> diakses pada tanggal 19 juni 2011.
- [14] *Segway*, <http://www.segwayindonesia.com/> diakses pada tanggal 19 juni 2011.