

LOGIKA FUZZY PADA ROBOT *INVERTED* PENDULUM BERODA DUA

Fahmizal¹, Galih Setyawan², Muhammad Arrofiq³, Afrizal Mayub⁴

^{1,2,3}Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada

⁴Pascasarjana S2 Pendidikan IPA FKIP, Universitas Bengkulu

Email: ¹fahmizal@ugm.ac.id, ²galih.setyawan24@mail.ugm.ac.id

³rofiq@ugm.ac.id, ⁴afrizalmayub@unib.ac.id

(Naskah masuk: 14 Oktober 2017, diterima untuk diterbitkan: 30 Desember 2017)

Abstrak

Robot *inverted pendulum* beroda dua (IPBD) merupakan sistem yang tidak stabil dan bersifat *non-linear*. Motor DC sebagai penggerak robot yang terletak pada masing-masing roda kiri dan kanan memberikan variabel gaya untuk mempertahankan kestabilan robot. Oleh karena itu diperlukan suatu kendali yang dapat menjaga keseimbangan dari robot. Makalah ini memaparkan kendali logika *fuzzy* dalam hal pengendali keseimbangan robot. Pada perancangan robot ini, penulis menggunakan sensor *inertia measurement unit* (IMU) versi MPU 6050 sebagai sensor pendeteksi keseimbangan robot. Nilai *setpoint* sudut robot yang diberikan adalah sudut elevasi robot terhadap sumbu horizontal atau pada sumbu *pitch*. Selanjutnya, nilai keluaran sensor IMU dibandingkan dengan *setpoint*. Lebih lanjut, nilai kesalahan (*error*) dan nilai perubahan kesalahan (*delta error*) yang dihasilkan akan digunakan sebagai masukan logika *fuzzy*. Hubungan relasi masukan *fuzzy* diselesaikan dengan aturan Mamdani. Keluaran dari logika *fuzzy* diselesaikan dengan perhitungan *weight average* (WA). Hasil keluaran logika *fuzzy* berupa nilai putaran motor kiri dan kanan yang dikendalikan dengan cara mengatur lebar pulsa sinyal *pulse with modulation* (PWM). Dari hasil pengujian diperoleh bahwa kendali logika *fuzzy* yang diaplikasikan pada robot IPBD dapat menjaga keseimbangan robot dengan osilasi pada sudut -2 hingga 2 derajat.

Kata kunci: Logika Fuzzy, Inverted Pendulum, IMU

Abstract

Inverted robot pendulum two (IPBD) is an unstable system that is naturally and non-linear. The DC motor as a robot drive located on each of the left and right wheels provides a force variable to maintain the robot's stability. Therefore we need a control that can maintain the balance of the robot. This paper presents fuzzy logic control in terms of robot balance control. In designing this robot, the author uses inertia measurement unit sensor (IMU) MPU 6050 version as a robot balance detection sensor. The given set of corner robot values is the robot's elevation angle to the horizontal axis or on the pitch axis. Furthermore, the value of the IMU sensor output is compared with the setpoint. Furthermore, the error value and the resulting error change value (delta error) will be used as fuzzy logic input. The relation of fuzzy input relation is solved with Mamdani rule. The output of fuzzy logic is solved by calculating the weight average (WA). The result of fuzzy logic output is left and right motor rotation controlled by adjusting pulse signal of pulse with modulation (PWM). The experiment results obtained that fuzzy logic control applied to the robot IPBD can maintain the robot balance by having oscillations at an angle of -2 to 2 degrees.

Keywords: Fuzzy Logic, Inverted Pendulum, IMU

1. PENDAHULUAN

Perkembangan robotika tidak terlepas dari kemajuan teknologi mikroprosesor yang dirancang untuk melakukan pengolahan dan perhitungan. Selain itu, bentuk baru perangkat sensor yang terus berkembang telah menjadikan suatu mesin dengan kemampuan untuk mengidentifikasi benda disekitar mereka dalam berbagai cara. Oleh karena itu, penerapan robotika untuk membantu pekerjaan manusia sangatlah luas, mulai dari rumah tangga sampai dunia industri.

Robot *inverted pendulum* beroda dua (IPBD) mengadopsi model sistem dari *inverted pendulum* konvensional yang konfigurasi sistem fisik yang

terdiri dari bandul, pedati dan motor-DC. Bandul merupakan sebuah benda yang menempel pada poros pedati dan dapat bergerak dengan satu derajat kebebasan (searah atau berlawanan arah dengan jarum jam). Pedati merupakan sebuah benda yang dapat bergerak translasi dalam arah horizontal pada suatu lintasan.

Keunikan dan penerapan *inverted pendulum* yang luas telah menarik beberapa peneliti dan kalangan penggemar robotika untuk mengembangkan lebih jauh teknologi *balancing robot*. Dalam beberapa tahun ini, para peneliti telah menerapkan gagasan dari *inersia sensor* pada berbagai kasus seperti rancangan gaya berjalan untuk *humanoid robot* (Kuo, 2016) (Huang, 2005),

Mecanum wheel robot (Fahmizal, 2016), kestabilan Quadrotor (Bhatkhande, 2014), *balancing ball robot* (Kumagai, 2008) bahkan sampai pada alat transportasi alternatif.

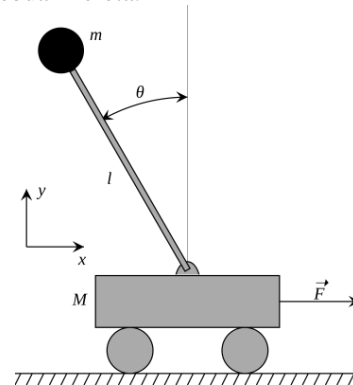
Para peneliti dari *Industrial Electronic Laboratory* di *Swiss Federal Institute of Technology* telah membangun suatu prototipe kendaraan beroda dua yang didasarkan pada prinsip kerja dari *inverted pendulum*. Kendaraan ini dilengkapi dengan pembebanan yang mensimulasikan berat manusia. Berbagai macam penelitian telah dilakukan dalam mengembangkan *balancing robot*, antara lain Nbot (Anderson, 2003) yaitu robot beroda dua mirip seperti robot JOW yang dibuat oleh David P. Anderson. Robot ini memiliki sensor inersia dan enkoder untuk menstabilkan sistem. Steven Hassenplug juga telah berhasil membangun *balancing robot* yang disebut Legway dengan menggunakan LEGO Mindstorms robotic kit (Hassenplug, 2008). Dua buah sensor *Electro-Optical Proximity Detector* digunakan untuk mengukur kemiringan robot. Selain itu, suatu perusahaan yang berasal dari Amerika sebut saja, "Segway HT" telah menciptakan suatu kendaraan beroda yang mengadopsi model *inverted pendulum*. (Nguyen, 2004). Kendaraan ini memiliki kemampuan untuk menyeimbangkan manusia yang berdiri di atas suatu platform, sementara bergerak melintasi suatu medan. Rancangan ini menggunakan lima buah *gyroscope* dan beberapa sensor kemiringan untuk menjaga tetap berdiri tegak.

Dari tinjauan berbagai literatur, ikut mendorong penulis mempelajari dan mengaplikasikan suatu sistem *inverted pendulum* kedalam sebuah robot IPBD. Pada penelitian ini bertujuan untuk menjaga robot IPBD agar tetap seimbang sesuai dengan masukan yang diberikan dan dapat menjaga kestabilan terhadap gangguan. Robot IPBD memiliki titik berat yang berada di atas sumbu putar motor penggeraknya, sehingga menyebabkan sistem ini tidak stabil apabila diberi gangguan. Oleh karena itu diperlukan suatu kendali yang dapat menjaga keseimbangan dari robot. Makalah ini memaparkan kendali logika *fuzzy* dalam hal pengendali keseimbangan robot. Pada perancangan robot ini, penulis menggunakan sensor *inertia measurement unit* (IMU) versi MPU 6050 sebagai sensor pendeteksi keseimbangan robot (Rowberg, 2014). Logika *fuzzy* pada penelitian ini akan ditanam pada *embeded system* Arduino.

2. ROBOT INVERTED PENDULUM BERODA DUA (IPBD)

Robot IPBD adalah suatu jenis robot beroda dua yang dapat menyeimbangkan dirinya saat bergerak. Dalam keadaan diam, robot IPBD sangatlah sukar seimbang. Robot IPBD merupakan pengembangan dari model *inverted pendulum* (pendulum terbalik). Pendulum terbalik terdiri dari

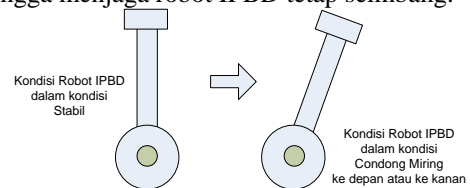
sebuah batang yang diletakkan di atas kereta beroda. Gambar 1 adalah ilustrasi sebuah pendulum terbalik dengan sebuah kereta.



Gambar 1. *Inverted pendulum* dengan sebuah kereta.

Akibat dari gaya gravitasi bumi, sebuah *inverted pendulum* yang pada mulanya tegak lurus maka mulai membentuk sudut kemiringan sebesar theta (θ) dan lama kelamaan akan jatuh. Oleh karena itu, dalam menjaga dan mempertahankan posisi pendulum pada suatu titik maka diperlukan sebuah aksi gaya yang dapat menahan pergerakan pendulum. Cara yang digunakan untuk menghasilkan gaya tersebut adalah dengan cara membuat kereta maju searah sesuai dengan arah kemana pendulum tersebut akan jatuh.

Dengan mengacu pada prinsip kerja *inverted pendulum* dengan sebuah kereta, maka untuk mempertahankan keseimbangan robot IPBD diperlukan gaya yang dapat membuat robot tetap berdiri. Pada saat kondisi robot akan condong ke depan (miring ke kanan) maka aksi tindakan yang perlu dilakukan adalah memutar motor roda searah dengan jarum jam sehingga robot berjalan ke arah depan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. Pergerakan motor pada roda robot IPBD tersebut akan memberi percepatan linear pada pusat putar roda dan akan memberikan gaya dorong kedepan sehingga menjaga robot IPBD tetap seimbang.



Gambar 2. Kondisi *inverted pendulum* beroda.

3. SENSOR IMU DAN COMPLEMENTARY FILTER

Inertial measurement unit (IMU) sensor adalah perangkat MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*) yang mampu mengukur dan melaporkan percepatan, kecepatan, orientasi dan gaya gravitasi. IMU sensor umumnya terdiri atas konfigurasi dan menggunakan kombinasi dari *accelerometer*, *gyroscope* dan *magnetometer*. Pada penelitian ini, robot IPBD menggunakan sensor IMU tipe 6050.

Sensor ini memiliki konfigurasi sebagai berikut; memilik 6 derajat kebebasan, terdiri atas dua konfigurasi *accelerometer* dan *gyroscope* dengan komunikasi protokol data menggunakan I2C (*inter ingrated circuit*). Sensor *accelerometer* dapat digunakan untuk mendeteksi serta mengukur getaran (vibrasi) dan juga mengukur percepatan akibat gravitasi. Sedangkan sensor *gyroscope* adalah untuk mengukur dan menentukan orientasi gerak yang berputar pada poros sumbu. Dari definisi tersebut dapat disimpulkan bahwa pengertian lain dari sensor *gyroscope* untuk menentukan gerakan sesuai dengan gravitasi yang dilakukan oleh pengguna. Sebagai contoh pada sistem pesawat terbang, *gyroscope* memiliki peranan penting dalam hal mempertahankan keseimbangan. Peranan ini berupa keseimbangan kemiringan pada sumbu *x*, *y* dan *z*. Istilah penamaan keluaran sudut yang dihasilkan oleh *accelerometer* dan *gyroscope* berupa percepatan/ kecepatan sudut pada sumbu *x* berupa sudut *phi* (Φ) atau *roll*, sumbu *y* menjadi sudut *theta* (θ) atau *pitch* dan sumbu *z* menjadi sudut *psi* (Ψ) atau *yaw*. Spesifikasi dari IMU 6050 dijelaskan pada Tabel 1 dan Gambar 3 merupakan bentuk fisik dari sensor IMU MPU 6050.

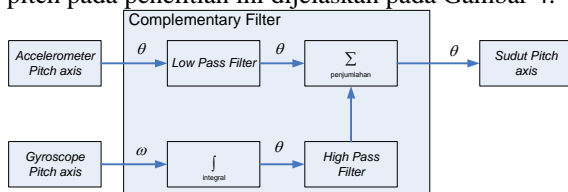
Tabel 1. Spesifikasi dari modul IMU 6050

Spesifikasi	Operasi
Chip	MPU-6050
Vin	3V ~ 5V
Communication	I2C
Gyroscopes ranges	+/- 250 500 1000 2000 degree/sec
Acceleration ranges	+/- 2g, +/- 4g, +/- 8g, +/- 16g
Pin Spacing	2.54mm (0.1in)
Built-in 16bit AD converter	16 bit data output



Gambar 3. Bentuk fisik dari sensor IMU MPU 6050.

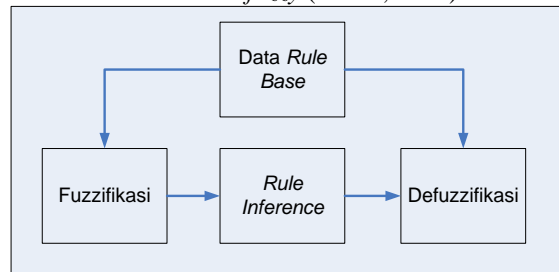
Dalam proses suatu pengukuran, *noise* merupakan gangguan penting yang harus diperhatikan. *Noise* dapat mengganggu jalanya suatu sistem kendali. Oleh karena itu, untuk mendapatkan sinyal sebenarnya yang memisahkan dari sekumpulan *noise*, teknik penyaringan (*filtering*) sangat dibutuhkan. Pada penelitian ini, *complementary filter* digunakan untuk menghilangkan *noise*. Konfigurasi dari *complementary filter* (Tseng, 2011) untuk sudut pitch pada penelitian ini dijelaskan pada Gambar 4.



Gambar 4. Blok diagram *complementary filter*.

4. SISTEM KENDALI FUZZY

Pada tahun 1965, Dr. Lotti A. Zadeh mengembangkan logika *fuzzy* yang didefinisikan sebagai perumusan secara matematika konsep ketidakpastian atau kesamaran, sehingga dapat diproses oleh komputer atau secara *digital*. Selain itu, sistem logika *fuzzy* adalah suatu sistem pengambilan keputusan berbasis aturan (*rule base*) yang bertujuan untuk memecahkan masalah, dimana sistem tersebut sukar untuk dimodelkan atau terdapat ambiguitas dan ketidakjelasan. Sistem logika *fuzzy* dibangun dari himpunan keanggotaan (*membership*) *fuzzy* dan aturan *fuzzy*. Subset *fuzzy* merupakan himpunan bagian yang berbeda dari variabel *input* dan *output*. Himpunan keanggotaan ini dapat dibangun dengan fungsi himpunan segitiga, trapesium, dan atau fungsi Gaussian. Secara umum, paada Gambar 5 menyajikan bagan dasar dari suatu sistem kendali *fuzzy* (Zadeh, 1965).

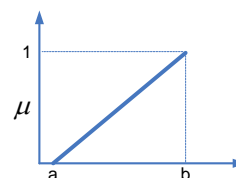


Gambar 5. Skema dasar *fuzzy inference system*.

Pada penelitian ini menggunakan aturan *fuzzy Mamdani* sebagai *inference* aturannya. Metode ini juga dikenal dengan istilah metode *Max-Min*. Metode ini diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975. Untuk memperoleh keluaran dari tahapan logika *fuzzy*, diperlukan 3 tahapan yaitu:

1. Tahap fuzzifikasi, pada tahap ini hal yang dilakukan adalah mengubah variabel *non fuzzy* (variabel numerik) menjadi variabel *fuzzy* (variabel linguistik). Pada penelitian ini menggunakan tiga tipe analisis keanggotaan himpunan *fuzzy* pada proses fuzzifikasi, diantaranya ialah

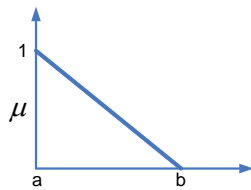
- a. Fungsi keanggotaan *fuzzy* naik yang dijelaskan pada Gambar 6 dan persamaan (1).



Gambar 6. Fungsi keanggotaan subset *fuzzy* naik

$$\mu = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ (x-a)/(b-a) & a < x \leq b \\ 1 & x \geq b \end{cases} \quad (1)$$

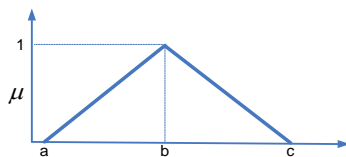
- b. Fungsi keanggotaan subset *fuzzy* turun yang dijelaskan pada Gambar 7 dan persamaan (2).



Gambar 7. Fungsi keanggotaan subset fuzzy turun.

$$\mu = \begin{cases} \frac{(b-x)}{(b-a)} & a \leq x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (2)$$

- c. Fungsi keanggotaan subset fuzzy segitiga yang dijelaskan pada Gambar 8 dan persamaan (3).



Gambar 8. Fungsi keanggotaan subset fuzzy segitiga.

$$\mu = \begin{cases} \frac{(b-x)}{(b-a)} & a \leq x < b \\ \frac{(c-x)}{(c-b)} & b < x \leq c \end{cases} \quad (3)$$

2. Tahap aturan logika fuzzy, secara umum adalah aturan-aturan fuzzy yang dinyatakan dalam bentuk "IF THEN" yang merupakan inti dari relasi logika fuzzy. Selanjutnya tahap implikasi dapat diselesaikan dengan sebuah metode, dan metode yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan menggunakan Mamdani (Mamdani, 1975).
3. Tahap defuzzifikasi, adalah perubahan data-data fuzzy menjadi data-data numerik yang selanjutnya dapat dikirimkan ke peralatan pengendalian. Masukan dari proses defuzzifikasi adalah suatu himpunan fuzzy yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan fuzzy. Proses defuzzifikasi pada penelitian ini menggunakan metode *weight average* (WA) dari Sugeno (Yoneyama, 2000).

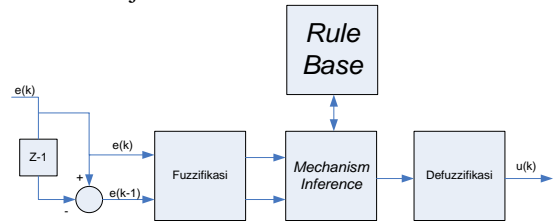
5. PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI

5.1. Spesifikasi Sistem

Sistem robot IPBD yang dirancang pada penelitian ini memiliki spesifikasi sistem sebagai berikut:

1. Logika fuzzy yang dirancang adalah logika fuzzy tipe – PD yang dijelaskan pada Gambar 9.
2. Robot IPBD secara otomatis mampu menyeimbangkan dirinya tanpa bantuan gaya luar.
3. Robot IPBD menggunakan sensor IMU MPU 6050 6-axis sebagai sensor sudut keseimbangan dengan menggunakan *complementary filter* sebagai penghilang dan peredam *noise* yang umum terjadi pada sensor IMU.

4. Kriteria seimbang robot IPBD adalah bergerak secara osilasi pada sudut kecil antara -2 hingga 2 derajat tanpa adanya gangguan, itu artinya robot IPBD mengalami goyangan kecil selama proses menyeimbangkan diri.
5. Robot IPBD dapat menyeimbangkan diri secara otomatis dengan gangguan sebesar sudut 10 derajat.



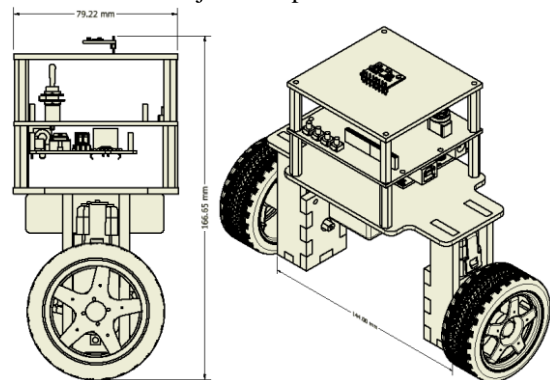
Gambar 9. Logika fuzzy tipe – PD.

5.2. Desain dan Implementasi Perangkat Keras

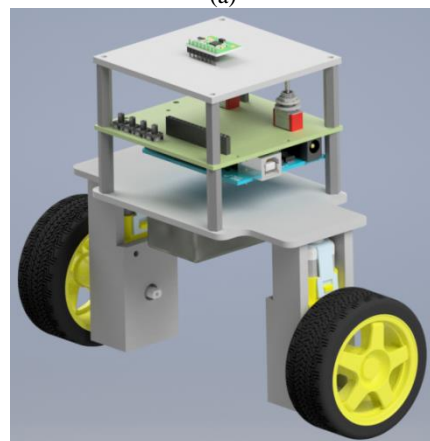
Pada tahapan perancangan perangkat keras robot IPBD ini terdiri dari dua bagian yaitu desain rancang bangun mekanik robot dan desain sistem elektronik.

1. Desain Sistem Mekanik

Sistem mekanik dalam pembuatan robot IPBD ini sangat berpengaruh dalam proses seimbang robot, desain mekanik robot ini diusahakan dapat seimbang pada titik pusat masanya robot IPBD ini menggunakan dua buah roda. Desain mekanik dan bentuk real fisik dari robot IPBD dijelaskan pada Gambar 10.



(a)



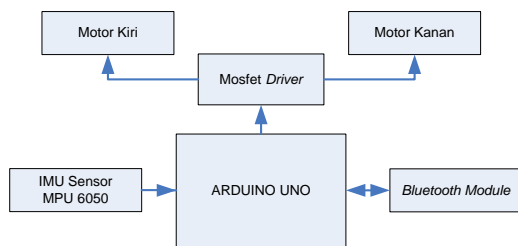
(b)



(c)

Gambar 10. (a) Dimensi desain robot IPBD, (b) desain mekanik CAD tampak keseluruhan dan (c) bentuk nyata fisik dari robot IPBD.

- Desain Sistem Elektronik
Sistem elektronik robot IPBD menggunakan Arduino Uno sebagai kontroler utamanya. Adapun konfigurasi rangkaian elektronis dari robot IPBD ini dijelaskan pada Gambar 11.

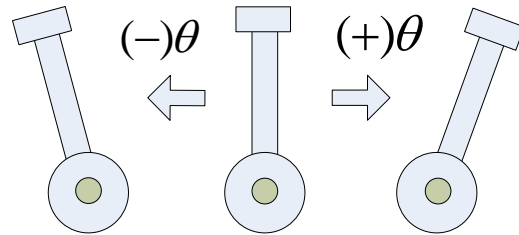


Gambar 11. Diagram blok rangkaian elektronis dari robot IPBD.

5.3. Desain dan Implementasi Perangkat Lunak Logika Fuzzy

Logika *fuzzy* yang diimplementasikan pada sistem robot IPBD dikenal dengan istilah *embeded fuzzy*, artinya semua tahapan *fuzzy* diolah komputasinya pada suatu perangkat *digital* dan tertanam dalam sebuah *chip* seperti pada mikrokontroler. Pada sistem robot IPBD ini variabel masukan untuk fuzzifikasi didapat dari pembacaan sensor *accelerometer* dan *gyroscope* yang berupa sudut kemiringan dari robot IPBD, selisih dari *setpoint* (posisi stabil) dan pembacaan sensor yang disebut *error* dan perubahan *error* setiap waktu disebut *delta error*. Lebih lanjut, *error* dan *delta error* ini yang kemudian menjadi masukan ke dalam fuzzifikasi dan dijadikan himpunan *fuzzy*.

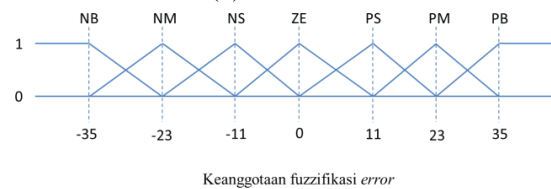
- Fungsi keanggotaan pada proses fuzzifikasi
Untuk pembentukan fungsi keanggotaan dilakukan dengan melihat karakteristik robot IPBD. Robot IPBD pada kondisi stabil atau sudut 0 derajat. Ketika robot condong kekiri maka sudut berubah dari 0 – (+90) derajat dan ketika robot condong kekanan maka sudut berubah dari 0 – (-90). Perubahan ini yang akan menjadi masukan "*crisp*" yang kemudian dijadikan himpunan *fuzzy*. Adapun skenario pergerakan robot seperti pada Gambar 12.



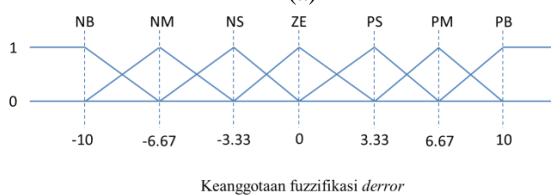
Gambar 12. Kondisi robot IPBD saat condong kekiri dan kekanan.

Dari skenario tersebut maka bisa ditentukan fungsi keanggotaan untuk *error* dan perubahan *derror(delta-error)* yang merupakan fungsi keanggotaan masukan. Untuk fungsi keanggotaan keluaran yang merupakan perubahan PWM terhadap perubahan posisi sudut ditentukan secara eksperimental. Adapun fungsi keanggotaan ini antara lain :

- Fungsi keanggotaan *error* terdiri dari *negative big* (NB), *negative medium* (NM), *negative small* (NS), *zero* (ZE), *positive small* (PS), *positive medium* (PM), *positive big* (PB). Untuk nilai dari masing-masing fungsi keanggotaan *error* seperti pada Gambar 13(a).
- Fungsi keanggotaan *derror* terdiri dari *negative big* (NB), *negative medium* (NM), *negative small* (NS), *zero* (ZE), *positive small* (PS), *positive medium* (PM), *positive big* (PB). Untuk nilai dari masing-masing fungsi keanggotaan *derror* seperti pada Gambar 13(b).



(a)



(b)

Gambar 13. (a) Fungsi keanggotaan *error* dan (b) fungsi keanggotaan *derror*.

2. Rule aturan *fuzzy* yang digunakan pada implementasi robot IPBD menggunakan implikasi (*inference*) dengan metode *Mamdani* seperti yang dijelaskan pada persamaan (4).

$$\mu_y(k) = \max [\min \{\mu_u(k), \mu_r(\text{error}(i), \text{derror}(j))\}] \quad (4)$$

Dari fungsi keanggotaan fuzzifikasi yang terdiri dari 7 anggota maka untuk komponen aturan terdiri dari 49 aturan dimana aturan tersebut antara lain dijelaskan pada Tabel 2 dengan mengacu pada aturan *MacVicar Whelan* (Tang, 1987).

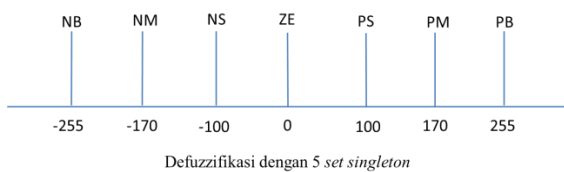
Tabel 2. Tabel aturan *fuzzy* menggunakan konfigurasi dari *MacVicar Whelan*.

		<i>error</i>						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
<i>delta error (derror)</i>	NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZE
	NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZE	PS
	NS	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
	ZE	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
	PS	NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PM
	PM	NS	ZE	PS	PS	PM	PM	PB
	PB	ZE	PS	PS	PM	PM	PB	PB

Berdasarkan daftar aturan tersebut maka dibentuk tabel komposisi aturan yang menjadi acuan implikasi dari masukan himpunan *fuzzy error* dan *derror*.

3. Keluaran *fuzzy* ditentukan oleh proses defuzzifikasi, pada penelitian ini peneliti menggunakan teknik *Weight Average (WA)* dari Sugeno yang dijelaskan pada persamaan (5) untuk mendapatkan *crisp output fuzzy* dengan konfigurasi keluaran yang memiliki 3 buah *singletone*. Pada penelitian ini, menggunakan keluaran *singletone* sebanyak 7. Nilai keluaran dari defuzzifikasi inilah yang digunakan sebagai nilai *Pulse Width Modulation (PWM)* Motor kiri kanan dan kiri pada robot IPBD. Himpunan *crisp output* dari defuzzifikasi ini dijelaskan pada Gambar 14.

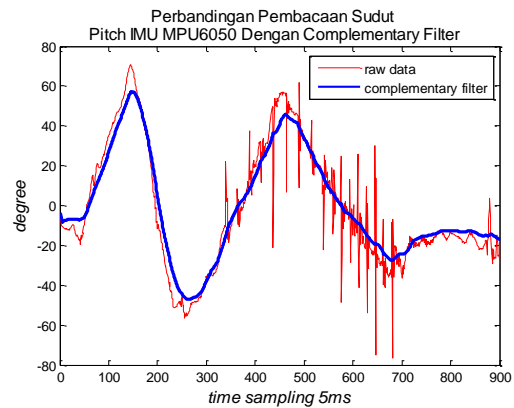
$$WA = \frac{\mu(k1) \times k1 + \mu(k2) \times k2 + \mu(k3) \times k3}{\mu(k1) + \mu(k2) + \mu(k3)} \quad (5)$$



Gambar 14. Himpunan *crisp output* dari defuzzifikasi.

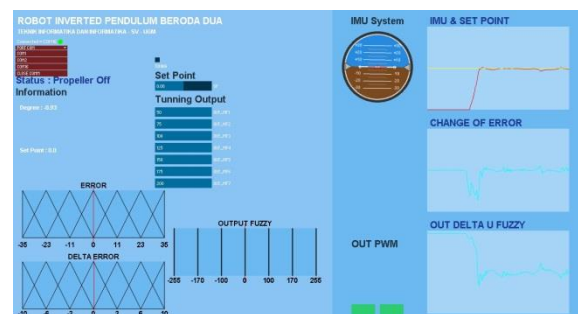
6. PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan perancangan, dilakukan pengujian terhadap sistem yang telah terintegrasi. Pengujian sensor IMU MPU 6050 ialah sebagai fundamental dalam keberhasilan robot IPBD dapat stabil atau seimbang. Artinya teknik *filtering* yang digunakan pada sistem robot IPBD ini menjadi sangat penting. Dengan *complementary filter* hasil pembacaan sudut kemiringan *pitch* diperoleh dengan sangat stabil seperti yang dijelaskan pada Gambar 15.



Gambar 15. Perbandingan pembacaan sudut *pitch* IMU MPU 6050 dengan *complementary filter*.

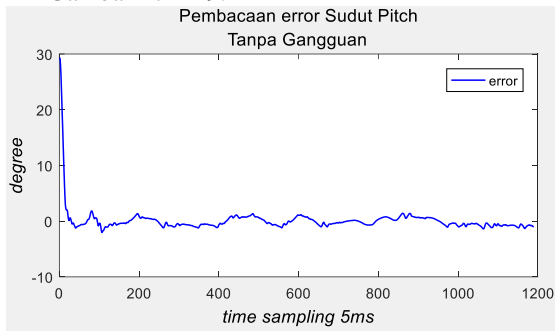
Pada pengujian selanjutnya ialah melihat respon dari kendali logika *fuzzy* apakah mampu membuat robot IPBD seimbang sesuai dengan spesifikasi pada perancangan atau tidak. Pengujian ini dilakukan pada saat keadaan tanpa gangguan maupun dengan diberikan gangguan. Pengujian ini dilakukan dengan menjalankan robot IPBD seimbang dan membiarkannya menyeimbangkan dirinya sendiri. Untuk mempermudah pengamatan, dilakukan pengiriman data berupa sudut kemiringan dan PWM yang dikeluarkan oleh pengendali menggunakan komunikasi serial ke komputer atau dikenal dengan istilah *graphical user interface (GUI)* yang dijelaskan pada Gambar 16.



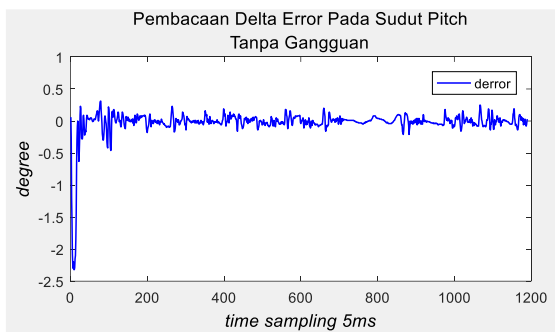
Gambar 16. Rancangan GUI robot IPBD.

Data pengamatan ini kemudian digambarkan dalam grafik hubungan sudut terhadap waktu dan grafik hubungan *out fuzzy* terhadap waktu. Berikut ini adalah hasil pengujian pengendali logika *fuzzy* ketika sudah diimplementasikan pada robot IPBD, dengan rincian sebagai berikut:

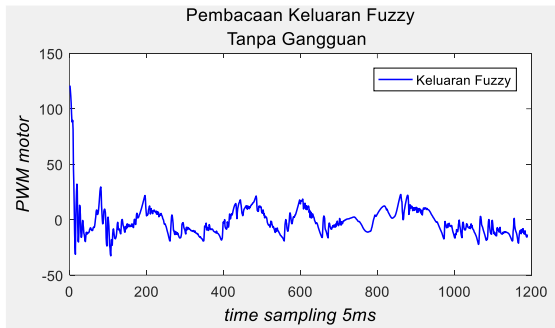
1. Pengujian tanpa ada gangguan, dijelaskan pada Gambar 17 – 19.



Gambar 17. Respons pembacaan *error* sudut *pitch* tanpa gangguan.

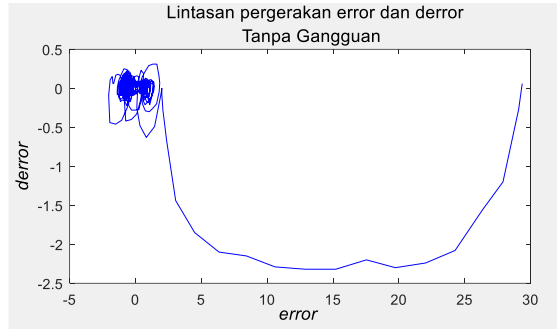


Gambar 18. Respons pembacaan *derror* sudut *pitch* tanpa gangguan.



Gambar 19. Respons keluaran *fuzzy* tanpa gangguan.

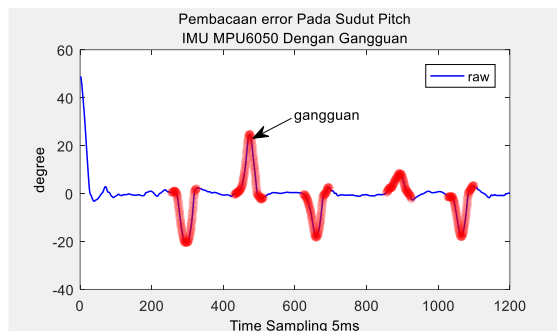
Dari Perbandingan respons *error*, *derror* dan keluaran *fuzzy* terlihat robot IPBD mencoba menyeimbangkan dirinya. Ketika *error* besar maka keluaran *fuzzy* juga besar dan begitu juga sebaliknya. Saat *error* mendekati titik kestabilan 0 derajat maka keluaran *fuzzy* juga mengecil mengikuti perubahan *error*. Karena pengaruh getaran motor maka terdapat *noise* pada pengukuran sudut oleh sensor *accelerometer*. Tapi *noise* ini tidak menjadi masalah bagi kontrol logika *fuzzy* karena robot masih tetap seimbang walaupun berhasil antara sudut 2 hingga -2 derajat. Berikut Gambar 20 menjelaskan *trajectory error* dan *derror* tanpa ada gangguan.



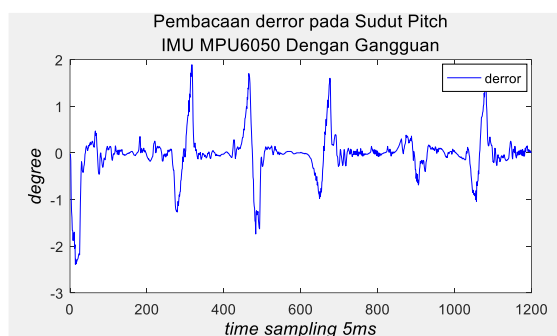
Gambar 20. *Trajectory error* dan *derror* tanpa ada gangguan.

2. Pengujian dengan gangguan

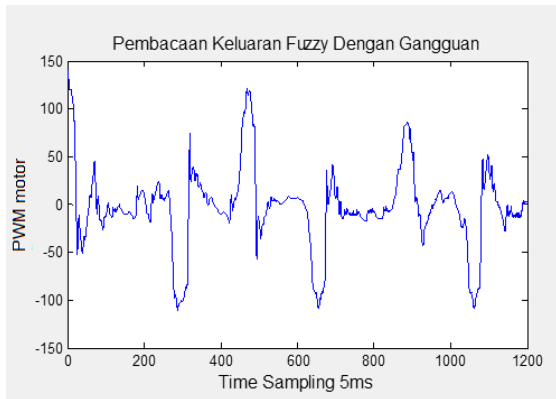
Pada percobaan ini, gangguan dari luar dengan cara memberi dorongan ke depan dan ke belakang sesuai arah pergerakan robot. Setelah diberi gangguan dari luar robot tidak jatuh dan tetap mempertahankan keseimbangannya. Respon pengujian dengan gangguan dijelaskan pada Gambar 21-23 dan Gambar 24 menjelaskan *trajectory error* dan *derror* dengan adanya gangguan.



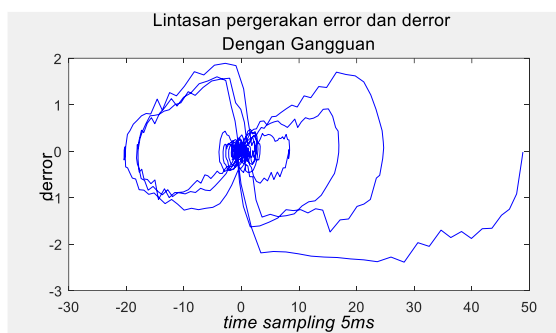
Gambar 21. Respons pembacaan *error* sudut *pitch* dengan gangguan.



Gambar 22. Respons pembacaan *derror* sudut *pitch* dengan gangguan.



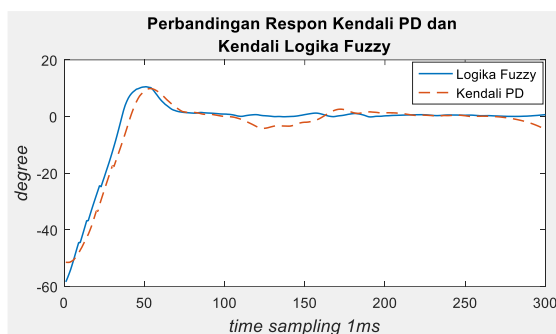
Gambar 23. Respons keluaran fuzzy dengan gangguan.



Gambar 24. Trajectory error dan derror dengan adanya gangguan.

Selanjutnya dilakukan perbandingan respon kontroler antara kendali PD dengan kendali logika fuzzy yang telah diterapkan pada robot IPBD. Kendali PD adalah suatu kontroler yang aksi kontrolernya proposional dan differensial terhadap suatu sinyal kesalahan. Hubungan antara sinyal kesalahan dan sinyal kontrol pada kontroler tipe-PD *dependent* dapat dinyatakan pada persamaan (6).

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \tau_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (6)$$

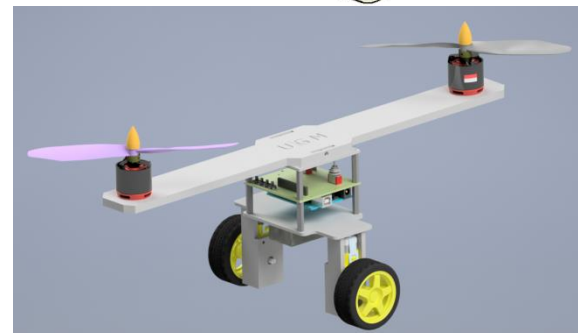
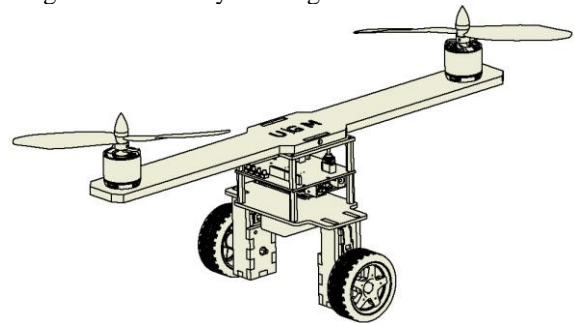


Gambar 25. Perbandingan respon kendali PD dan kendali logika fuzzy pada robot IPBD.

Dari hasil perbandingan respons sistem yang disajikan pada Gambar 25 terlihat bahwa kendali logika fuzzy memiliki *rise time* yang jauh lebih baik dari pada kendali PD, selain itu *error steady state* pada kendali logika fuzzy juga jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan kendali PD.

7. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian penerapan logika fuzzy pada robot IPBD, dapat ditarik beberapa simpulan bahwa sistem logika fuzzy dapat diimplementasikan dengan hasil baik ke dalam sistem kestabilan robot IPBD. Dengan kendali logika fuzzy robot mengalami osilasi pada sudut -2 hingga 2 derajat yang dalam hal ini dianggap sebagai sistem yang sangat stabil. Jika diberikan gaya luar dengan variasi sudut dari kecil sampai sudut besar robot IPBD dapat mempertahankan keseimbangan. Jika robot IPBD dicondongkan kedepan maka robot akan maju begitu juga sebaliknya. Desain mekanik, torsi dan kecepatan motor sangat berpengaruh dalam kestabilan robot IPBD. Selanjutnya pada penelitian ini akan dikembangkan robot IPBD dengan ditambah dua buah propeller seperti yang disajikan pada Gambar 26. Pada sistem ini, dua buah propeller berguna untuk menyeimbangkan robot IPBD.



Gambar 26. Desain mekanik CAD robot IPBD dengan ditambah dua buah propeller sebagai penyeimbang.

8. DAFTAR PUSTAKA

- ANDERSON, D. P. 2003. nBot, a two wheel balancing robot. <http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/> [Diakses pada 20 - 08 - 2017].
- BHATKHANDI, PRANAV, & HAVENS, T. C. 2014. Real time fuzzy controller for quadrotor stability control. *Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), IEEE International Conference*, pp. 913-919. IEEE.
- FAHMIZAL, KUO, CHUNG-HSIEN. 2016. Trajectory and heading tracking of a mecanum wheeled robot using fuzzy logic control. *Instrumentation, Control and*

Automation (ICA), International Conference, pp. 54-59. IEEE.

- HASSENPLUG, STEVE. 2008. Nxt programming software. *NXT Programming Software*.
- HUANG, QIANG, & NAKAMURA, Y. 2005. Sensory reflex control for humanoid walking. *IEEE Transactions on Robotics* 21, no. 5, pp. 977-984. IEEE.
- KUMAGAI, MASAOKI, & OCHIAI, T. 2008. Development of a robot balancing on a ball. *In Control, Automation and Systems (ICCAS). International Conference*, pp. 433-438. IEEE.
- KUO, CHUNG-HSIEN, FAHMIZAL, & WU, S. 2016. Development of Fuzzy Logic Controllers for Controlling Bipedal Robot Locomotion on Uneven Terrains with IMU Feedbacks. *Indian Journal of Science and Technology* 9, no. 28.
- MAMDANI, EBRAHIM H. & ASSILIAN, S. 1975. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies* 7, no. 1, pp. 1-13.
- NGUYEN, HOA G., MORRELL, J., MULLENS, K., BURMEISTER, A., MILES, S., FARRINGTON, N., THOMAS, K. & DOUGLAS, W. 2004. Cage. Segway robotic mobility platform. space and naval warfare systems center san diego ca.
- ROWBERG, JEFF. 2011. I2Cdevlib. MPU-6050 6-axis accelerometer/gyroscope. <http://www.i2cdevlib.com/devices/mpu6050>, [Diakses pada 27 – 08 - 2017].
- TANG, KWOK L., & MULHOLLAND, R. J. 1987. Comparing fuzzy logic with classical controller designs. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 17, no. 6, pp. 1085-1087, IEEE.
- TSENG, STEPHEN P., LI, W., SHENG, C., HSU, J. & CHEN, C. 2011. Motion and attitude estimation using inertial measurements with complementary filter. *Control Conference (ASCC), 2011 8th Asian*, pp. 863-868, IEEE.
- YONEYAMA, JUN, NISHIKAWA, M., KATAYAMA, H. & ICHIKAWA, A. 2000. Output stabilization of Takagi–Sugeno fuzzy systems. *Fuzzy sets and Systems* 111, no. 2, pp. 253-266.
- ZADEH, L. A. 1965. Fuzzy sets. *Information and control* 8, no. 3, pp. 338-353.