

# Sistem Kendali *Hybrid Fuzzy-PID* pada Kinematika Robot Berkaki 4 Menggunakan Sensor *Gyroscope*

La Ode Muhamad Idris<sup>1)</sup>, Andi Kurniawan Nugroho<sup>2)</sup>, dan Daniyah<sup>3)</sup>

<sup>1,2)</sup> Universitas Semarang, <sup>3)</sup>Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Jl. Soekarno Hatta, Tlogosari Kulon, Kec. Pedurungan, Kota Semarang

e-mail: laode@usm.ac.id<sup>1)</sup>, andikn@usm.ac.id<sup>2)</sup>

## ABSTRACT

*Legged robots have attracted the attention of researchers because of their superior adaptation to complex environments compared to wheeled robots. Legged robots are divided into 2 (two) legged Humanoid robots, 4 (four) legged robots, 6 (six) legged robots, and other robots with more legs. Legged robots are robots that can be more adaptable to the terrain compared to wheeled robots in the case of their use in land exploration activities. Although functionally legged robots are more superior, legged robots have their own problems, namely motion control which is more complicated than wheeled robots, therefore the right method is needed to be implemented on the robot.. In this research discusses a 4 (four) legged robot designed in order to move using the inverse kinematic equation on the legs and the body of the robot which is integrated with the MPU6050 gyroscope sensor based on the Hybrid Fuzzy-PID control system. The purpose of this research is to develop a Fuzzy-PID control system that stabilizes the setpoint position in the 4 (four) legged Robot movement system. Fuzzy PID is a combination of PID control and fuzzy logic, where PID control is used to stabilize the system and fuzzy logic is used to improve the system performance. In this research, the Fuzzy-PID control system is developed using the Mamdani (Min-Max) method. The system is later tested by observing the robot's movement response to changes in the gyroscope sensor values. The results obtained were able to get an average output error up to 0.173333% during the response test to the pitch axis of -15°, but in several tests also get the response results that have a considerable error rate is up to 27.31% during the response test to the roll axis of -5°. From the test results of hybrid Fuzzy-PID control, it is obtained that the robot is able to make movements or responses to its stable point by giving reference to the x (roll), y (pitch) and z (yaw) axes where it can be analyzed that the response to the x (roll) and y (pitch) axes will affect the angle of the tibia and femur servo joints, while the response to the z (yaw) axis will affect the angle of the coxa joint servo.*

**Keywords:** IMUs (Inertial Measurement Units), Gyroscope, Inverse Kinematics, Hybrid Fuzzy-PID.

## ABSTRAK

Robot berkaki telah menarik perhatian para peneliti karena adaptasinya unggul terhadap lingkungan yang kompleks dibanding robot beroda. Robot berkaki dibagi menjadi robot *Humanoid* berkaki 2(dua), robot berkaki 4(empat), robot berkaki 6(enam), dan lainnya yang berkaki lebih banyak. Robot berkaki adalah robot yang lebih adaptif terhadap medan tempuh dibandingka robot beroda dalam kasus penggunaannya pada kegiatan eksplorasi daratan. Walaupun secara fungsional robot berkaki lebih unggul, robot berkaki memiliki permasalahan sendiri, yaitu kontrol gerak yang lebih kompleks dibanding robot beroda, maka dari itu dibutuhkan metode yang tepat untuk diterapkan pada robot. Pada penelitian ini membahas tentang robot berkaki 4(empat) yang dirancang untuk dapat bergerak dengan menggunakan persamaan inverse kinematic pada kaki maupun badan robot yang diintegrasikan dengan sensor *gyroscope* MPU6050 berbasis sistem kendali *Hybrid Fuzzy-PID*. Tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan sistem kontrol Fuzzy-PID untuk menstabilkan posisi setpoint pada sistem pergerakan Robot berkaki 4(empat). Fuzzy PID adalah gabungan dari kontrol PID dan logika fuzzy, dimana kontrol PID digunakan untuk menstabilkan sistem dan logika fuzzy digunakan untuk memperbaiki performa sistem. Pada penelitian ini sistem kontrol Fuzzy-PID dikembangkan dengan menggunakan metode Mamdani (Min-Max). Sistem ini kemudian diuji dengan mengamati respon pergerakan robot terhadap perubahan nilai sensor *gyroscope*. Dimana diperoleh hasil mampu memperoleh rata-rata kesalahan hasil keluarannya sampai dengan 0.173333% pada saat pengujian respon terhadap sumbu pitch -15°, namun dibebberapa pengujian juga mendapa tkan hasil respon yang memiliki tingkat kesalahan yang cukup besar sampai dengan 27.31% pada saat pengujian respon terhadap sumbu roll -5°. Dari hasil pengujian kendali *hybrid Fuzzy-PID* diperoleh hasil robot mampu melakukan pergerakan atau respon untuk menuju titik stabilnya dengan pemberian acuan terhadap sumbu x(roll), y(pitch) dan z(yaw) dimana dapat dianalisa bahwa respon terhadap sumbu x(roll) dan y(pitch) akan mempengaruhi sudut servo sendi tibia dan femur, sedangkan respon terhadap sumbu z(yaw) akan mempengaruhi sudut servo sendi coxa.

**Kata Kunci:** IMUs (Inertial Measurement Units), Gyroscope, Inverse Kinematics, Hybrid Fuzzy-PID.

## I. PENDAHULUAN

Robot berkaki telah menarik perhatian para peneliti karena adaptasinya unggul terhadap lingkungan yang kompleks dibanding robot beroda. Robot berkaki dibagi menjadi robot *Humanoid* berkaki 2(dua), robot berkaki 4(empat), robot berkaki 6(enam), dan lainnya yang berkaki lebih banyak[1].

Robot berkaki adalah robot yang lebih adaptif terhadap medan tempuh dibandingka robot beroda dalam kasus penggunaannya pada kegiatan eksplorasi daratan. Walaupun secara fungsional robot berkaki lebih unggul, robot berkaki memiliki permasalahan sendiri, yaitu kontrol gerak yang lebih kompleks dibanding robot beroda, maka dari itu dibutuhkan

metode yang tepat untuk diterapkan pada robot[2].

Permasalahan yang sering terjadi pada robot berkaki adalah ketika dihadapkan pada permukaan yang tidak rata, yang mengakibatkan pergerakan robot terhambat dikarenakan titik beban robot yang tidak seimbang[3].

Sistem kendali yang memiliki struktur sederhana serta mudah didesain dan diaplikasikan salah satunya adalah kendali PID[4]. Hal ini yang mendasari sistem kendali yang banyak digunakan dalam industri adalah sistem kendali PID[4].

Logika *fuzzy* adalah teknik yang mencoba untuk secara sistematis dan matematis meniru penalaran manusia dalam pengambilan keputusan[5]. Logika *fuzzy* memungkinkan untuk mengeksploitasi pengetahuan empiris dan heuristik yang diwakili dalam aturan “*if/then*” dan mentransfernya kedalam blok fungsi[5].

Pada penelitian ini membahas tentang robot berkaki 4(enam) yang dirancang untuk dapat berjalan dengan menggunakan persamaan *inverse kinematic* pada kaki maupun badan robot yang diintegrasikan dengan sensor gyroscope MPU6050 berbasis sistem kendali *hybrid Fuzzy-PID*.

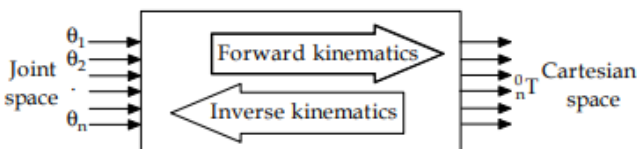
## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Kinematika Robot

Dalam ilmu fisika kinematika adalah cabang ilmu analisis sebuah gerak benda tanpa mempersoalkan gaya atau momen yang mengakibatkan benda tersebut bergerak[6][7].

Kinematika robot adalah studi tentang sistem gerak robot tanpa mempersoalkan gaya atau momen penyebab gerakan[8][9]. Kinematika robot mengacu pada studi analitik tentang gerakan robot. Merumuskan model kinematika yang sesuai untuk mekanisme robot sangat penting untuk menganalisis perilaku robot. Pada dasarnya ada dua ruang berbeda yang digunakan dalam pemodelan kinematika robot yaitu, ruang *Cartesian* dan ruang *Quaternion*. Transformasi antara dua sistem koordinat Cartesian dapat didekomposisi menjadi rotasi dan translasi[7].

Ada 2(dua) jenis kinematika yang diterapkan pada robot, yaitu *Direct Kinematics/Forward Kinematics* dan *Inverse kinematics*[7][8]. Hubungan antara *forward* dan *inverse kinematics* diilustrasikan pada gambar 1.



Gambar 1. Representasi dari forward dan inverse kinematics[7]

### B. Logika Fuzzy

Logika *Fuzzy* merupakan cabang ilmu matematika untuk memecahkan permasalahan yang nilainya samar

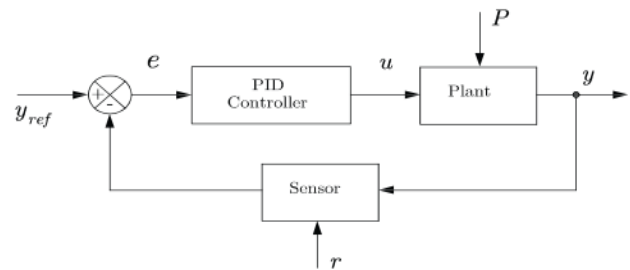
atau nilai yang bisa benar atas salah secara besamaan. Model matematika digunakan sebagai pendekatan untuk mengontrol sistem. Logika *fuzzy* adalah cara berhitung dengan menggunakan variabel kata-kata untuk menggantikan berhitung dalam bilangan[10],[11],[12].

Dalam *fuzzy* memiliki derajat keanggotaan dalam rentang nilai 0 (nol) sampai 1 (satu) berbeda dengan himpunan tegas yang memiliki nilai 0 (nol) atau 1 (satu)[10],[12].

Aturan *Fuzzy If-Then* atau disebut juga aturan *fuzzy* adalah aturan yang digunakan untuk merumuskan relasi *conditional* antara 2 atau lebih himpunan *fuzzy*[12],[13].

### C. Kendali PID

Kendali PID merupakan sistem kendali yang terdiri dari 3 operasi kendali yaitu Proporsional, Integral, dan Derivatif terhadap sinyal kesalahan  $e(t)$ , yang didefinisikan dari perbedaan antara sinyal referensi  $y_{ref}$  dengan sinyal keluaran proses  $y(t)$ , untuk membangkitkan sinyal kontrol  $u(t)$  yang memanipulasi keluaran dari proses seperti yang diinginkan[14].



Gambar 2. Skema Sistem SISO dengan kendali PID [14].

Salah satu pengontrol yang paling banyak digunakan di industri modern adalah kontrol klasik Proporsional, Integral dan Derivatif, PID karena mudah diimplementasikan, hanya membutuhkan pengujian dasar untuk tuning gain  $k_P$ ,  $k_I$  dan  $k_D$  [4][15].

Secara umum, pengontrol PID mengambil sinyal kesalahan  $e$  sebagai input dan bekerja padanya untuk menghasilkan sinyal kontrol output  $u$ , sebagai[14]:

$$u = k_P e + k_I \int_0^t e dt + k_D \frac{de}{dt} \quad (1)$$

Dimana  $k_P$ ,  $k_I$  y  $k_D$  adalah penguatan PID yang akan disetel, dan  $e$  adalah sinyal kesalahan yang didefinisikan sebagai[14]:

$$e = y_{ref} - y \quad (2)$$

Bentuk PID diskrit adalah[16]:

$$u(k) = u(k - 1) + k_P [e(k) - e(k - 1)] + k_I e(k) + k_D [e(k) - 2e(k - 1) + e(k - 2)] \quad (3)$$

### D. Kendali Hybrid Fuzzy-PID

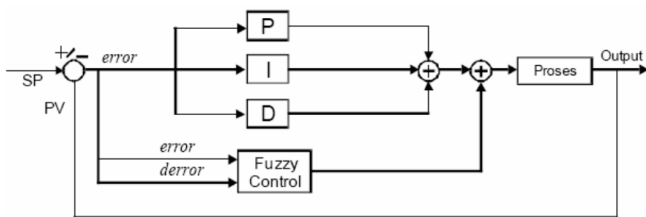
Sistem *Hybrid Fuzzy-PID* ini dikembangkan oleh OMRON's Industrial Temperature Regulator.

Kemudian disini akan dicoba untuk mengimplementasikannya pada sistem untuk mengendalikan kecepatan motor dengan sistem pengereman sebagai disturbance-nya[17].

Penerapan Logika Fuzzy ke berbagai aplikasi kontrol telah memungkinkan pembentukan kontrol cerdas (Lee 1990). Daya tariknya, dari sudut pandang Teori Kontrol Proses, terletak pada kenyataan bahwa teknik ini memberikan dukungan yang baik untuk menerjemahkan pengetahuan heuristik dari operator yang terampil, yang dinyatakan dalam istilah linguistik, ke dalam algoritma komputer. Kontrol Fuzzy memecahkan masalah nyata, yang sebelumnya tidak ditangani karena kompleksitasnya atau kurangnya informasi[18].

Metode ini menggabungkan teori Fuzzy dengan kontrol PID untuk membangun kontroler PID adaptif Fuzzy, yang mewujudkan kontrol sistem yang optimal[19], [20].

Kontroler Fuzzy-PID bekerja seperti homonim klasiknya, tetapi variabel masukan dan aksi kontrol diberikan dalam istilah linguistik. Pengembangan analitik pengendali fuzzy memungkinkan untuk menjelaskan pengaruh setiap parameter tuning pada respon sistem[18].



Gambar 3 Skema SISO dengan kendali Fuzzy-PID[17].

### E. Sensor Gyroscope

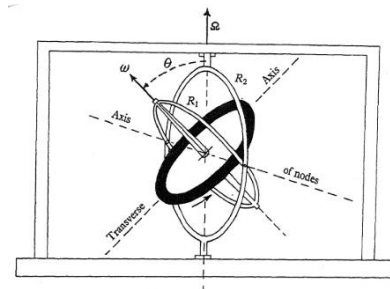
*Gyroscope* dapat didefinisikan secara luas sebagai benda padat yang mampu berputar dengan kecepatan sudut tinggi terhadap sumbu sesaat yang selalu melewati titik tetap. Titik tetap mungkin merupakan pusat gravitasi benda padat atau mungkin titik lainnya[21].

*Gyroscope* (juga disebut *gyro*) mengukur kecepatan sudut di sekitar sumbu tetap sehubungan dengan ruang inersia. Dalam empat dekade terakhir, upaya penelitian intensif telah dikhususkan untuk merancang, mengoptimalkan, dan membuat berbagai jenis *gyro* yang pada dasarnya didasarkan pada konservasi momentum sudut. Dalam beberapa tahun terakhir pengembangan *gyros* inovatif telah difokuskan pada teknologi Mikro-fotonik dan Mikro-elektromekanik[22].

Sensor inersia, yang memungkinkan untuk mengukur percepatan linier dan kecepatan sudut, muncul sebagai kelas sensor yang penting dan aplikasinya terus meningkat. Mereka pertama kali dikembangkan untuk sistem kedirgantaraan dan militer tetapi saat ini banyak digunakan dalam spektrum

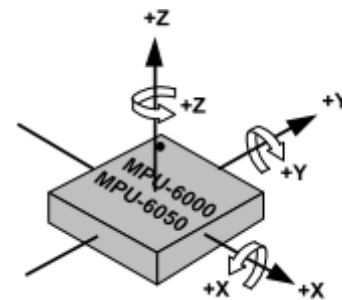
aplikasi yang luas, seperti otomotif, obat-obatan, elektronik konsumen, dan sebagainya[22].

*Inertial Measurement Units (IMUs)* yang memungkinkan pengukuran percepatan di sepanjang tiga sumbu dan kecepatan sudut di sekitar tiga sumbu yang sama adalah sistem yang sangat canggih yang pengembangannya dalam hal pengurangan biaya dan peningkatan kinerja dianggap sebagai tugas penting bagi industri angkatan laut, pertahanan, dan kedirgantaraan. IMU berkualifikasi luar angkasa yang inovatif dengan bobot yang lebih ringan, konsumsi daya yang rendah, sensitivitas tinggi, dan keandalan yang baik diperlukan untuk misi luar angkasa baru. Pasar IMU di seluruh dunia, yang saat ini sekitar 2 miliar dolar, diperkirakan akan tumbuh secara signifikan dalam beberapa tahun ke depan[22].



Gambar 4 Gambaran mekanik Gyrocope [21].

Sensor MPU6050 adalah salah satu jenis sensor IMU yang didalamnya dapat diperoleh data 6 sumbu, yaitu 3 sumbu (x, y, dan z) data *accelerometer* dan 3 sumbu (x, y, dan z) data *gyroscope*[19].



Gambar 5 Orientasi Sumbu Sensitivitas dan Polaritas Rotasi[23]

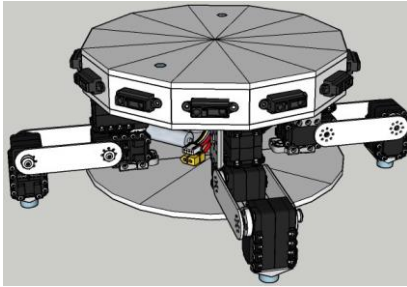
## III. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini merancang robot berkaki 4 (empat) atau sering juga dikenal dengan istilah Robot *Quadruped* dengan 3DOF (Degree of Freedom) yang mekaniknya menggunakan bahan acrylic dan ABS, sedangkan sistem penggerakannya menggunakan motor servo Dynamixel AX-12 sebanyak 12 buah dan terdapat sistem elektronik mikrokontroler serta sensor. Sumber energy robot adalah baterai LiPo 3s 11,1 volt. Pada robot dipasang sebuah sensor *gyroscope* seri MPU6050 yang kemudian data sensor tersebut dijadikan acuan utama dalam penelitian ini, yaitu pengaplikasian-nya pada sistem pergerakan robot menggunakan sistem

kendali *Hybrid Fuzzy-PID*.

### A. Mekanik Robot

Mekanik pada robot dalam penelitian ini tersusun dari beberapa bahan diantaranya adalah acrylic dan ABS yang kemudian diintegrasikan dengan sistem gerak robot berupa motor servo Dynamixel AX-12. Gambar 6 berikut adalah desain 3d dari robot berkaki 4(empat) dalam penelitian ini.

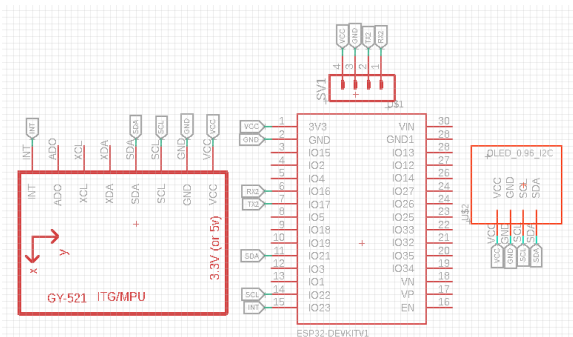


Gambar 6 Desain 3D Robot Berkaki 4 (empat)

### B. Elektronik Robot

Sistem elektronik pada robot dalam penelitian ini meliputi rangkaian elektronik sistem mikrokontroler ESP32, Sensor *gyroscope* seri MPU6050 yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32 menggunakan jalur komunikasi serial I2C (Inter Integrated Circuit), kemudian rangkaian sistem mikrokontroler stm32 dalam hal ini menggunakan board OpenCM9.04 yang digunakan untuk mengatur motor servo Dynamixel AX-12 yang kemudian board OpenCM9.04 ini dikoneksikan dengan mikrokontroler ESP32 menggunakan jalur komunikasi Serial UART, selain itu terdapat juga sebuah *display* oled seri SSD1306 yang dikoneksikan dengan mikrokontroler ESP32 menggunakan jalur komunikasi serial I2C (Inter Integrated Circuit) untuk menampilkan informasi dan data-data sensor robot.

Gambaran skema perancangan rangkaian elektronik pada penelitian ini seperti pada gambar 7 berikut:



Gambar 7 Skematik Board ESP32

### C. Program Robot

Pada perancangan Program yang tertanam pada Robot menggunakan *Software* Arduino IDE dengan

bahasa pemrograman berbasis bahasa C/C++ yang disesuaikan dengan aturan penulisan Arduino IDE.

Terdapat beberapa perancangan program yang pada penelitian ini meliputi perancangan pembacaan sensor *Gyroscope* MPU6050, tampilan OLED I2C SH1106, komunikasi Serial UART, akses servo dynamixel AX12, *Inverse Kinematic*, dan Kendali *Hybrid Fuzzy-PID*.

### D. Kendali Hybrid Fuzzy – PID

Penentuan aturan fuzzy pada penelitian ini adalah:

$R : \text{If } E \text{ then if } dE \text{ then } U$

Di mana himpunan fuzzy E dan dE masing-masing adalah input Error dan dError dan U adalah output kontrol fuzzy.

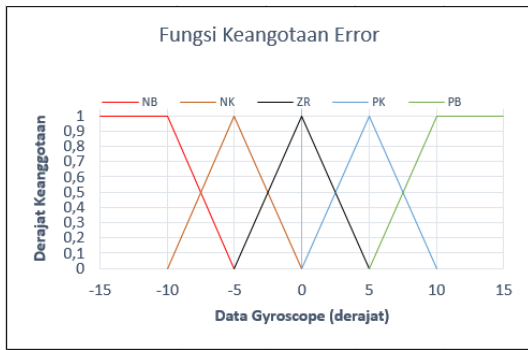
Aturan fuzzy dinyatakan dalam matriks aturan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 yang memiliki 25 aturan. Notasi NB artinya Negatif Besar, NK artinya Negatif Kecil, ZR artinya Zero atau Nol, PK artinya Positif Kecil, dan PB artinya Positif Besar.

Tabel 1. Matriks Aturan Keluaran Fuzzy

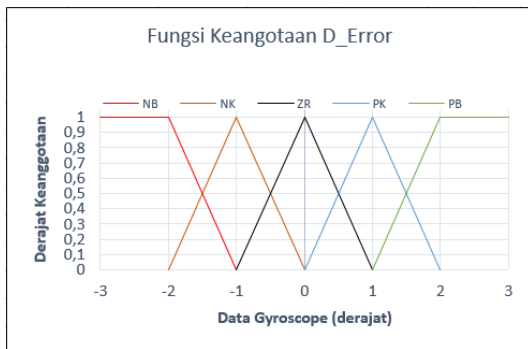
	E	NB	NK	ZR	PK	PB
dE	U					
NB		NB	NB	NB	NK	ZR
NK		NB	NB	NK	ZR	PK
ZR		NB	NK	ZR	PK	PB
PK		NK	ZR	PK	PB	PB
PB		ZR	PK	PB	PB	PB

Nilai keanggotaan sebagai hasil dari operasi 2 himpunan sering dikenal dengan nama firestrength atau predikat. Ada beberapa operator dasar yang diciptakan oleh Zadeh, namun operator yang digunakan dalam penelitian ini adalah operator AND. Operator AND ini berhubungan dengan operasi interseksi pada himpunan.  $\alpha$ -predikat sebagai hasil operasi dengan operator AND diperoleh dengan mengambil nilai keanggotaan terkecil antar elemen pada himpunan-himpunan yang bersangkutan [24].

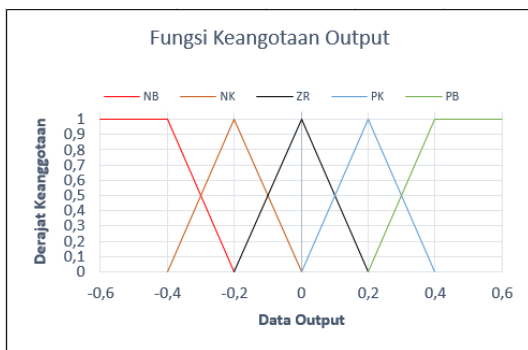
Gambar 8 dan 9 berikut masing-masing menunjukkan penentuan *Fuzzy Set Input* serta gambar 10 menunjukkan *Fuzzy Set Output* nya:



Gambar 8. Fuzzy Set Input (Error)



Gambar 9. Fuzzy Set Input (D\_Error)



Gambar 10. Fuzzy Set Output

Metode FIS yang digunakan pada penelitian ini adalah metode *MIN-MAX*, menggunakan *MIN* pada fungsi implikasi, dan *MAX* pada komposisi antar fungsi implikasi. dan metode Defuzzyfikasinya menggunakan metode *Centroid (Composite Moment)*.

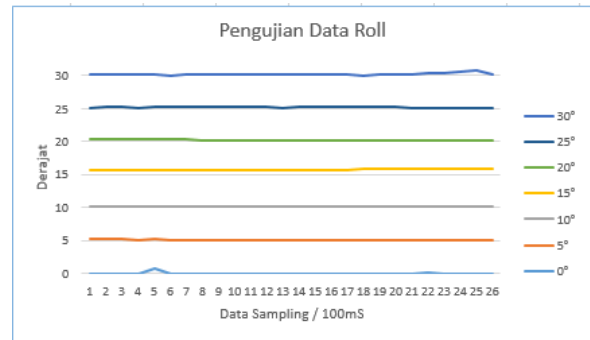
#### IV. HASIL PENELITIAN

##### A. Sensor Gyroscope MPU6050

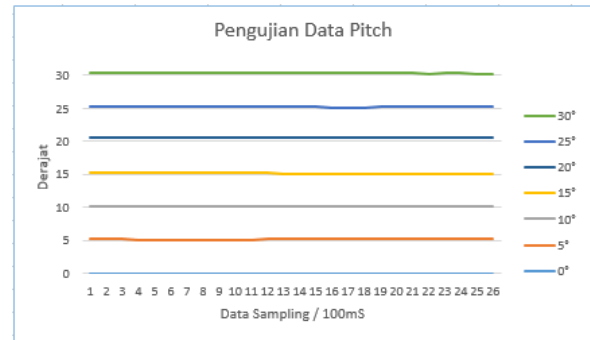
Pada pengujian awal dilakukan pembacaan sensor *Gyroscope MPU6050* untuk mengetahui tingkat keakuratan dari sensor tersebut. Pengujian meliputi pengujian 3 sumbu yaitu sumbu x (*roll*), sumbu y (*pitch*), dan sumbu z (*yaw*).

Pada sumbu x (*roll*) dan y (*pitch*) dilakukan pengujian dengan mengambil data dari beberapa derajat meliputi data 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, dan 30°. Sedangkan pada sumbu z (*yaw*) meliputi data 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, dan 90° disetiap derajat pengujiannya. Masing-masing pengambilan data dilakukan dengan mencuplik 100 mS (mili detik) setiap pengambilan datanya, dan pada pengujian ini mengambil sebanyak 26 data. Gambar 9,

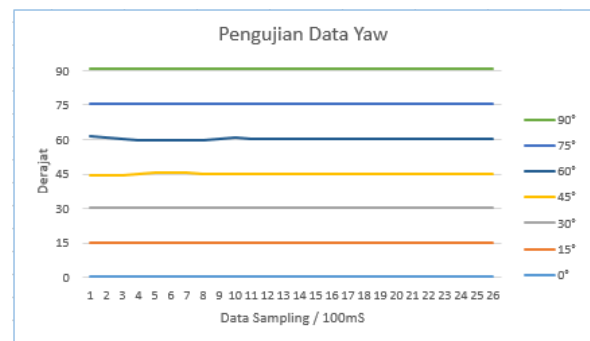
10, dan 11 berikut adalah grafik hasil pengujiannya:



Gambar 11. Pengujian data Roll



Gambar 12. Pengujian Data Pitch



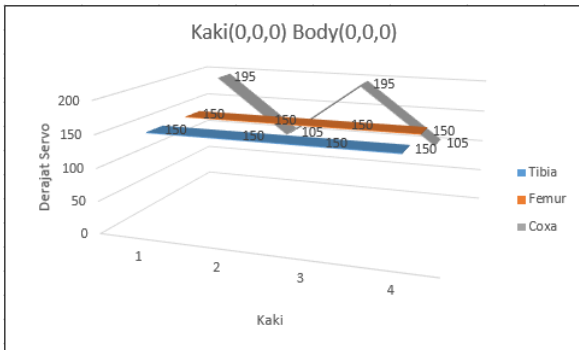
Gambar 13. Pengujian Data Yaw

Dari hasil pengujian data sensor *Gyroscope MPU6050* diperoleh hasil rata-rata tingkat kesalahan (*error*) pembacaan sensor pada sumbu x (*roll*) adalah 2,230769 % untuk data 5°, 1,85 % untuk data 10°, 4,833333% untuk data 15°, 1,105769 % untuk data 20°, 0,726154 % untuk data 25°, dan 0,687179 % untuk data 30°. Sedangkan pada sumbu y (*pitch*) diperoleh 3,3% untuk data 5°, 1,392308 % untuk data 10°, 1,287179 % untuk data 15°, 3,011538 % untuk data 20°, 0,718462 % untuk data 25°, dan 1,038462 % untuk data 30°. Sementara itu pada pembacaan sensor sumbu z (*yaw*) diperoleh hasil *error* sebesar 2,105128 % untuk data 15°, 1,660256 % untuk data 30°, 0,482051 % untuk data 45°, 0,439744 % untuk data 60°, 0,636923 % untuk data 75°, dan 0,75812 % untuk data 90°.

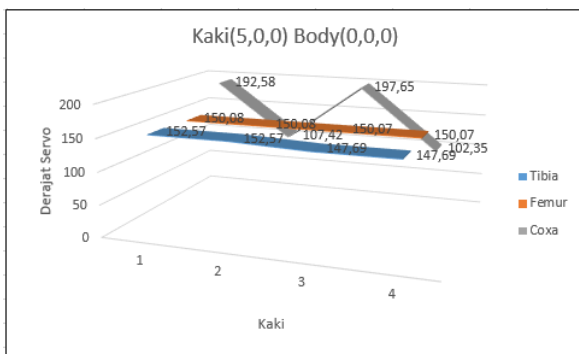
##### B. Pengujian Inverse Kinematic

Pada pengujian *Inverse kinematic* dilakukan dengan memberikan beberapa nilai terhadap posisi robot yaitu menguji kinematik kaki (x,y, dan z) dan kinematik *body* (x, y,dan z), pada pengujian ini dilakukan dengan

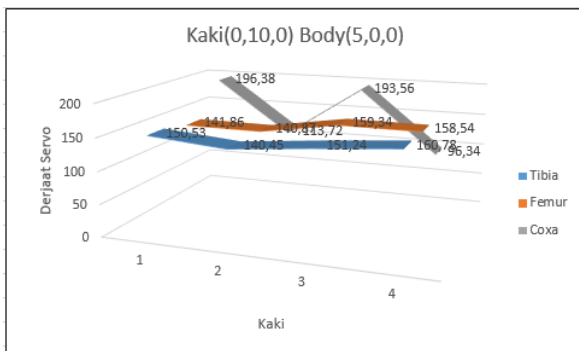
beberapa kombinasi diantaranya adalah kaki(0,0,0) *body*(0,0,0) sampai dengan kaki(10,15,20) *body*(10,15,0) seperti pada gambar 12, 13, dan 14, 15, dan 16 berikut:



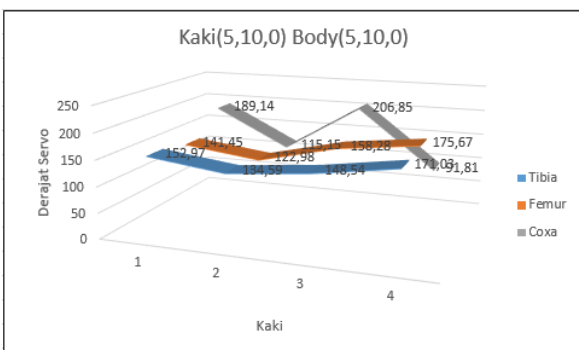
Gambar 14. Pengujian Kinematik Kaki(0,0,0), *Body*(0,0,0)



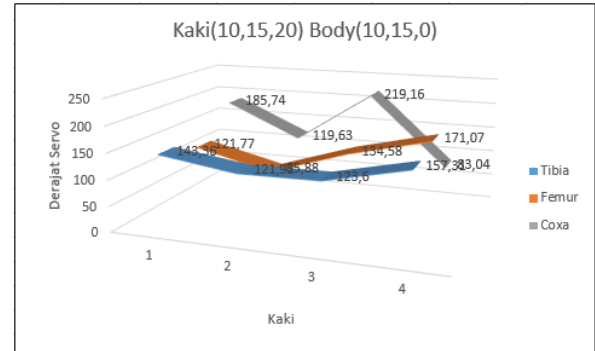
Gambar 15. Pengujian Kinematik Kaki(5,0,0), *Body*(0,0,0)



Gambar 16. Pengujian Kinematik Kaki(0,10,0), *Body*(5,0,0)



Gambar 17. Pengujian Kinematik Kaki(5,10,0), *Body*(5,10,0)



Gambar 18. Pengujian Kinematik Kaki(10,15,20), *Body*(10,15,0)

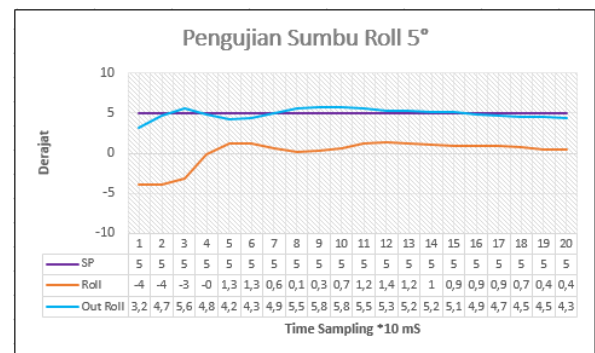
Dari hasil pengujian yang dilakukan dengan memberikan masukan berupa nilai sumbu untuk kinematik kaki dan kinematik *body* (masing-masing terhadap sumbu *x*, *y*, dan *z*) diperoleh hasil dimana persamaan *inverse kinematic* dapat menghasilkan posisi atau sudut derajat servo yang kemudian dari hasil perhitungan derajat tersebut langsung diberikan ke servo. Servo yang digunakan dapat diberikan nilai berupa angka 0 – 300 dalam satuan derajat.

### C. Pengujian Kendali Hybrid Fuzzy – PID

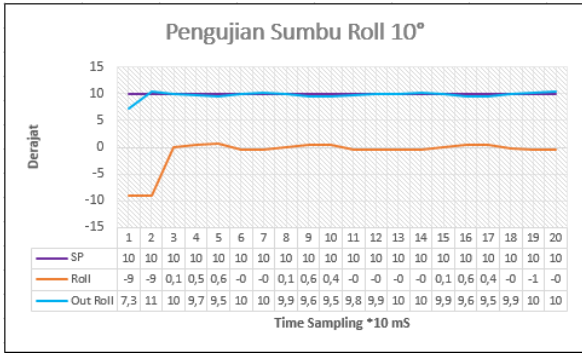
Pada pengujian kendali *Hybrid Fuzzy – PID* dilakukan dengan memberikan beberapa acuan nilai target data sensor *gyroscope* (kemiringan bidang robot) dan kemudian diamati respon pergerakan robot untuk menyesuaikan terhadap target nilai tersebut. Nilai yang diberikan berupa sumbu *x*, *y*, dan *z*. Penentuan derajat keanggotaan pada *input* dibedakan antara sumbu *x* (*roll*) dan *y* (*pitch*) dengan sumbu *z* (*yaw*).

Pada pengujian ini robot diletakkan dibidang datar dengan posisi robot *standby* yang kemudian diberikan berupa gangguan terhadap sumbu *x* (*roll*), *y* (*pitch*), dan *z* (*yaw*). Pengambilan data pada pengujian ini dilakukan dengan *sampling* 10 mS.

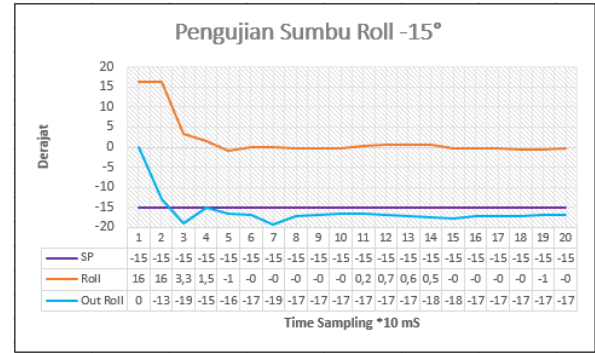
#### 1. Pengujian Sumbu *x* (*roll*)



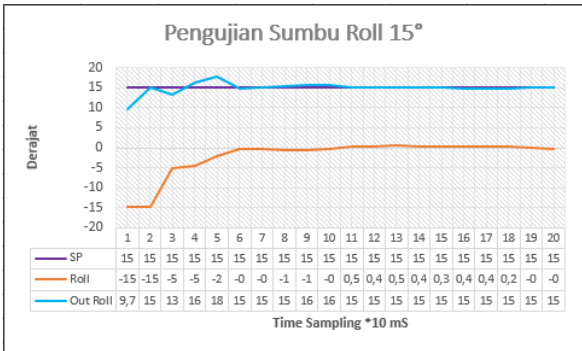
Gambar 19. Pengujian Ouput terhadap Sumbu Roll 5°



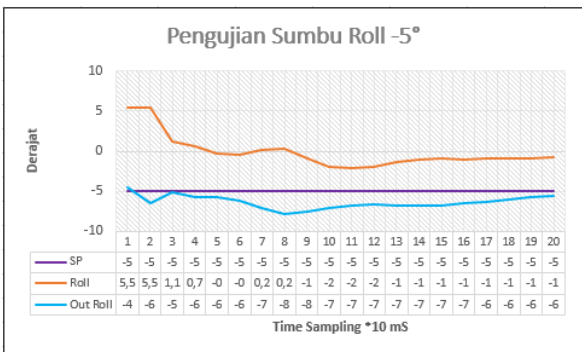
Gambar 20. Penguujian Ouput terhadap Sumbu Roll 10°



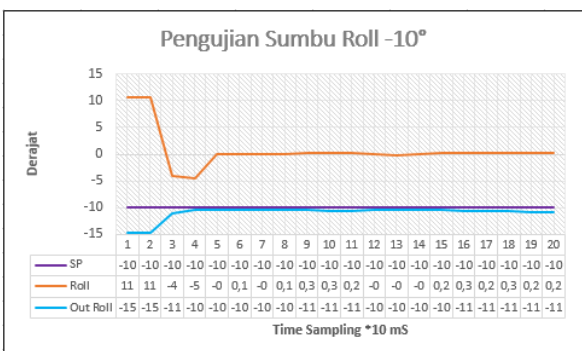
Gambar 24. Penguujian Ouput terhadap Sumbu Roll -15°



Gambar 21. Penguujian Ouput terhadap Sumbu Roll 15°



Gambar 22. Penguujian Ouput terhadap Sumbu Roll -5°

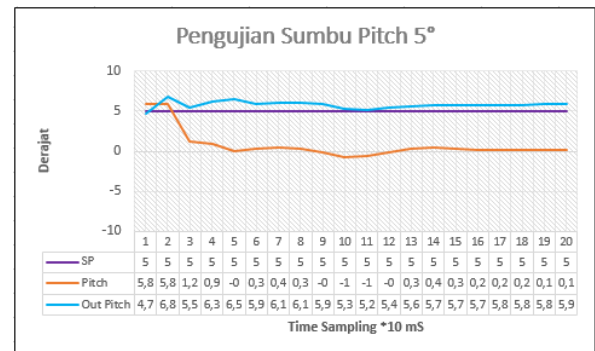


Gambar 23. Penguujian Ouput terhadap Sumbu Roll -10°

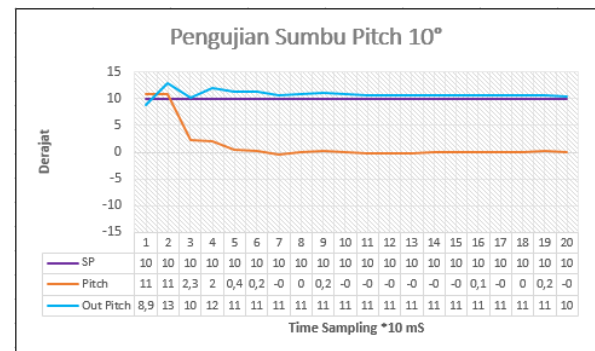
Berdasarkan penguujian pemberian acuan menggunakan sumbu  $x$  (*roll*) dilakukan dengan beberapa sudut yaitu sudut 5°, 10°, 15°, -5°, -10°, dan -15° diperoleh hasil robot mampu bergerak menyesuaikan acuan dimana terlihat dari grafik yang robot mampu menuju ke nilai target.

Berdasarkan hasil dari data yang diperoleh dapat diketahui rata-rata tingkat kesalahan (*error*) respon keluaran sistem kendalinya yaitu sudut 5° adalah 2.0%, sudut 10° adalah 2.175%, sudut 15° adalah 0.683333%, sudut -5° adalah 27.31%, sudut -10° adalah 9.72%, dan sudut -15° adalah 12.98667%.

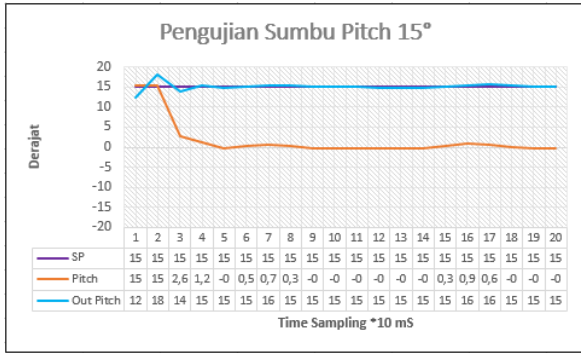
## 2. Penguujian Sumbu $y$ (*pitch*)



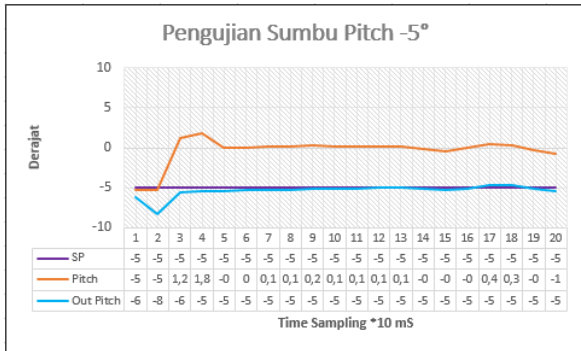
Gambar 25. Penguujian Ouput terhadap Sumbu Pitch 5°



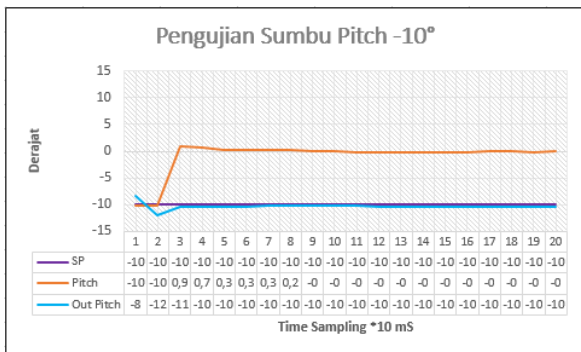
Gambar 26. Penguujian Ouput terhadap Sumbu Pitch 10°



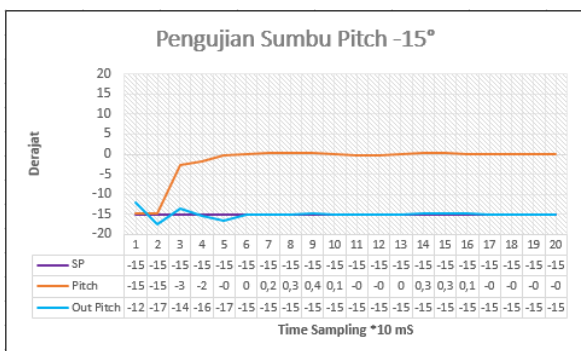
Gambar 27. Pengujian Ouput terhadap Sumbu Pitch 15°



Gambar 28. Pengujian Ouput terhadap Sumbu Pitch -5°



Gambar 29. Pengujian Ouput terhadap Sumbu Pitch -10°



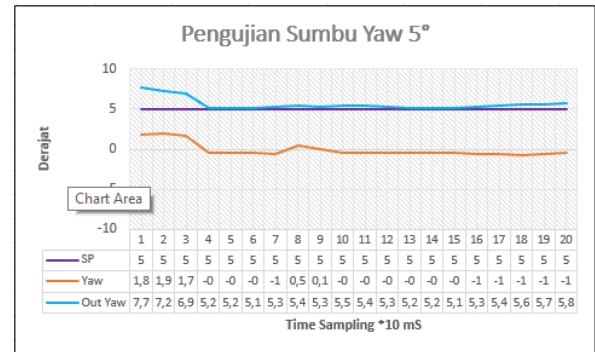
Gambar 30. Pengujian Ouput terhadap Sumbu Pitch -15°

Berdasarkan pengujian pemberian acuan menggunakan sumbu *y* (*pitch*) dilakukan dengan beberapa sudut yaitu sudut 5°, 10°, 15°, -5°, -10°, dan -15° diperoleh hasil robot mampu bergerak menyesuaikan acuan dimana terlihat dari grafik yang robot mampu menuju ke nilai target.

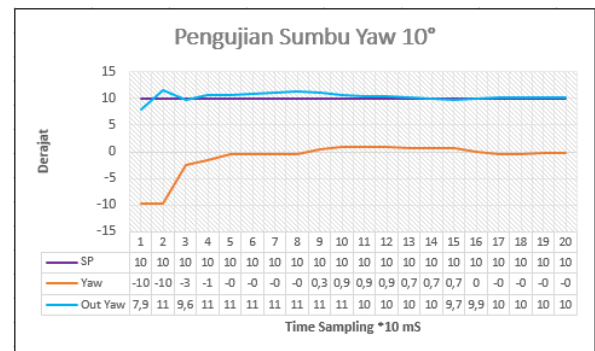
Berdasarkan hasil dari data yang diperoleh dapat diketahui rata-rata tingkat kesalahan (*error*) respon keluaran sistem kendalinya yaitu sudut 5° adalah

15.51%, sudut 10° adalah 8.065%, sudut 15° adalah 0.45%, sudut -5° adalah 7.2%, sudut -10° adalah 3.29%, dan sudut -15° adalah 0.173333%.

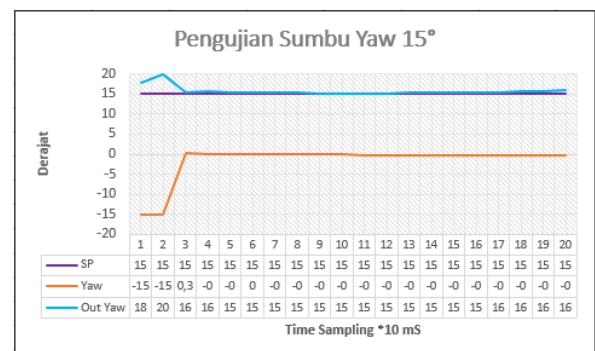
### 3. Pengujian Sumbu z (*yaw*)



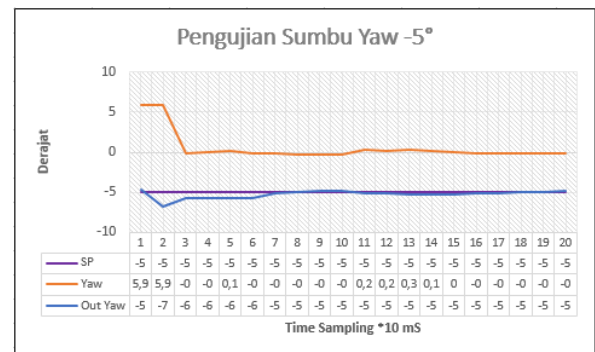
Gambar 31. Pengujian Ouput terhadap Sumbu Yaw 5°



Gambar 32. Pengujian Ouput terhadap Sumbu Yaw 10°

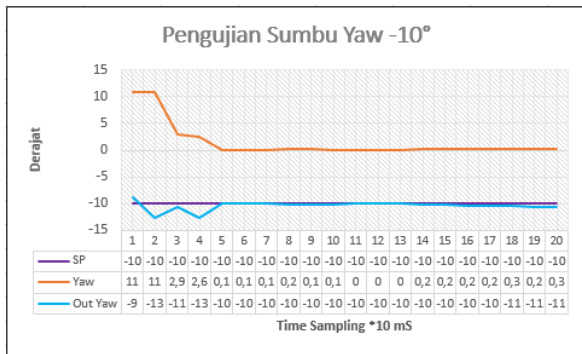


Gambar 33. Pengujian Ouput terhadap Sumbu Yaw 15°



Gambar 34. Pengujian Ouput terhadap Sumbu Yaw -5°





Gambar 35. Penguujian Ouput tarhadap Sumbu Yaw -15°

Berdasarkan penguujian pemberian acuan menggunakan sumbu  $z$  ( $yaw$ ) dilakukan dengan beberapa sudut yaitu sudut  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $-10^\circ$ , dan  $-15^\circ$  diperoleh hasil robot mampu bergerak menyesuaikan acuan dimana terlihat dari grafik yang robot mampu menuju ke nilai target.

Berdasarkan hasil dari data yang diperoleh dapat diketahui rata-rata tingkat kesalahan ( $error$ ) respon keluaran sistem kendalinya yaitu sudut  $5^\circ$  adalah 12.68%, sudut  $10^\circ$  adalah 3.315%, sudut  $15^\circ$  adalah 5.7615%, sudut  $-5^\circ$  adalah 5.41%, sudut  $-10^\circ$  adalah 4.13%, dan sudut  $-15^\circ$  adalah 1.54667%.

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penguujian *gyroscope* MPU6050 dapat membaca sudut  $x$ ( $roll$ ),  $y$ ( $pitch$ ), dan  $z$ ( $yaw$ ) dengan rata-rata  $error$  pembacaan terkecil pada percobaan sumbu  $x$ ( $roll$ ) adalah sudut  $30^\circ$  yaitu 0,687179 % dan  $error$  pembacaan terbesar adalah sudut  $15^\circ$  yaitu 4,833333% , sedangkan pada percobaan sumbu  $y$ ( $pitch$ )  $error$  pembacaan terkecil adalah sudut  $25^\circ$  yaitu 0,718462 % sedangkan  $error$  pembacaan terbesar adalah sudut  $5^\circ$  yaitu 3,3%, kemudian pada percobaan sumbu  $z$ ( $yaw$ )  $error$  pembacaan terkecil adalah sudut  $60^\circ$  yaitu 0,439744 %, dan  $error$  pembacaan terbesar adalah sudut  $15^\circ$  yaitu 2,105128 %.

Dari hasil penguujian yang dilakukan dengan memberikan masukan berupa nilai sumbu untuk kinematik kaki dan kinematik body (masing-masing terhadap sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ ) diperoleh hasil dimana persamaan *inverse kinematic* dapat menghasilkan posisi atau sudut derajat servo yang kemudian dari hasil perhitungan derajat tersebut langsung diberikan ke servo.

Dari hasil penguujian kendali *hybrid Fuzzy-PID* diperoleh hasil robot mampu melakukan pergerakan atau respon untuk menuju titik stabilnya dengan pemberian acuan terhadap sumbu  $x$ ( $roll$ ),  $y$ ( $pitch$ ) dan  $z$ ( $yaw$ ) dimana dapat dianalisa bahwa respon terhadap sumbu  $x$ ( $roll$ ) dan  $y$ ( $pitch$ ) akan mempengaruhi sudut servo sendi *tibia* dan *femur*, sedangkan respon terhadap sumbu  $z$ ( $yaw$ ) akan mempengaruhi sudut servo sendi *coxa*.

Dari hasil penguujian kendali *hybrid Fuzzy-PID*

diperoleh hasil rata-rata  $error$  keluaran terhadap nilai targetnya dengan nilai terkecil pada penguujian sumbu  $x$  ( $roll$ ) adalah sudut  $15^\circ$  dengan nilai 0.683333% dan nilai terbesarnya adalah pada sudut  $-5^\circ$  dengan nilai 27.31%. Sedangkan pada penguujian sumbu  $y$  ( $pitch$ ) diperoleh hasil rata-rata  $error$  keluaran terhadap nilai targetnya dengan nilai terkecil adalah pada sudut  $-15^\circ$  dengan nilai 0.173333%. dan nilai terbesarnya adalah pada sudut  $5^\circ$  dengan nilai 15.51%. Pada penguujian sumbu  $z$  ( $yaw$ ) diperoleh hasil rata-rata  $error$  keluaran terhadap nilai targetnya dengan nilai terkecil adalah pada sudut  $-15^\circ$  dengan nilai 1.54667%. dan nilai terbesarnya adalah pada sudut  $5^\circ$  dengan nilai 12.68%.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Deng, G. Xin, G. Zhong, and M. Mistry, "Gait and trajectory rolling planning and control of hexapod robots for disaster rescue applications," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 95, pp. 13–24, 2017, doi: 10.1016/j.robot.2017.05.007.
- [2] A. Hidayat, "Desain dan implementasi metode inverse kinematics dan sine pattern untuk kontrol gerak pada autonomous quadruped robot design and implementation inverse kinematics and sine pattern methods for locomotion control on," *E-Proceeding Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 2116–2123, 2016.
- [3] R. C. Prayogo and A. Triwiyatno, "Perancangan Robot Berkaki 4 ( Quadruped ) Dengan Stabilization Algorithm Pada Uneven Floor Menggunakan 6-Dof Imu Berbasis Invers Kinematic," *Transient*, vol. 7, no. 2, pp. 543–551, 2018.
- [4] K. J. Åström and T. Hägglund, "Advanced PID Control," *IEEE Control Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 30–31, 2006, doi: 10.1109/MCS.2006.1580151.
- [5] J. Shearer and T. Consultant, "Nonlinear Control and Decision Making," *Progr. Manag.*, 2007.
- [6] O. Bottema and B. Toth, "Theoretical Kinematics." Dover Publications; Inc., New York, 1979.
- [7] S. Kucuk and Z. Bingul, *Industrial robotics: Theory, Modelling and Control - Robot Kinematics: Forward and Inverse Kinematics*, no. December. 2006.
- [8] P. A. Kumar and Y. S. Narayan, "Design of a quadruped robot and its inverse kinematics," *Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Dev.*, vol. 7, no. 4, pp. 241–252, 2017, doi: 10.24247/ijmpredaug201725.
- [9] A. I. Nasrudin, K. Anam, and M. A. Prawira N, "Evaluasi Inverse Kinematics untuk Robot Quadruped Menggunakan Sensor Accelerometer," *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 15, no. 3, 2020, doi: 10.17529/jre.v15i3.14079.
- [10] Sudradjat, "Dasar-dasar fuzzy logic (Modul Kuliah)," *Fak. Mat. dan Ilmu Pengetah. Alam Univ. Padjajaran Bandung*, vol. 1, no. 1, 2008, doi: 10.14710/medstat.1.1.43-51.
- [11] V. Novák, I. Perfilieva, and J. Močkoř, *Mathematical Principles of Fuzzy Logic*, no. December 2014. 1999. doi: 10.1007/978-1-4615-5217-8.
- [12] H. Nasution, "Implementasi Logika Fuzzy pada Sistem Kecerdasan Buatan," *ELKHA J. Tek. Elektro*, vol. 4, no. 2, pp. 4–8, 2012, [Online]. Available: <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/Elkha/article/view>

- [13] Sri Kusumadewi, "Artificial Intelligence," *Artif. Intell. (Teknik dan Apl.*, 2003.
- [14] Marialena Vagia, *Pid Controller Design Approaches – Theory , Tuning And Application*. Rijeka: InTech, 2012. [Online]. Available: [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)
- [15] P. J. Escamilla-Ambrosio and N. Mort, "Auto-tuning of fuzzy PID controllers," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 35, no. 1, pp. 169–174, 2002, doi: 10.3182/20020721-6-es-1901.00681.
- [16] A. Visioli, *Practical PID Control*, no. 9781846285851. 2006. doi: 10.1007/1-84628-586-0\_3.
- [17] S. Masmachofari, "Sistem Kendali Hybrid PID-Logika Fuzzy Pada Pengaturan Kecepatan Motor DC," *Makara, Teknol.*, vol. Vol. 8, no. 1, pp. 25–34, 2004.
- [18] M. Santos, S. Dormido, and J. M. D. La Cruz, "M. Santos", *Fuzzy-PID Control. vs. Fuzzy-PI Control.*, no. 34, pp. 1598–1604, 1996.
- [19] J. Zhang, L. Guo, S. Wei, Y. Song, and Y. Zhang, "Study of Kalman filtering algorithm and fuzzy PID controller for the Coriolis acceleration tester," *Chinese Control Conf. CCC*, vol. 2016-Augus, pp. 3782–3786, 2016, doi: 10.1109/ChiCC.2016.7553943.
- [20] M. H. Chiang, L. W. Lee, and H. H. Liu, "Adaptive fuzzy controller with self-tuning fuzzy sliding-mode compensation for position control of an electro-hydraulic displacement-controlled system," *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 26, no. 2, pp. 815–830, 2014, doi: 10.3233/IFS-130773.
- [21] F. G. Becker et al., *The Gyroscope - Theory and Applications*, vol. 7, no. 1. 1958.
- [22] C. C. M. N. Armenise, *Advances in Gyroscope Technology*. 2010.
- [23] NvenSense, *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4*, vol. 33, no. 1. 2013. doi: 10.1093/fs/XXXIII.1.1.
- [24] Yulmaini, "PENGUNAAN METODE FUZZY INFERENCE SYSTEM (FIS) MAMDANI DALAM PEMILIHAN PEMINATAN MAHASISWA UNTUK TUGAS AKHIR," *J. Inform. Darmajaya*, vol. 15, no. 1, pp. 10–23, 2015.