

Rancang Bangun *Fuzzy-PID Controller* pada *Ball Balancing Table* dengan *Universal Joint* berbasis NI MyRIO dan LabVIEW

HILDA KHOIRUNNISA, FITRIA SURYATINI, ADHITYA SUMARDI SUNARYA,
AFAF FADHIL RIFAI, ANGGRAENI MULYADEWI, SENDI DIKA PRASENDA

Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika, Politeknik Manufaktur Bandung, Indonesia
Email: hilda@polman-bandung.ac.id

Received 31 Mei 2023 | *Revised* 28 Juli 2023 | *Accepted* 20 Agustus 2023

ABSTRAK

Menyeimbangkan objek dinamis yang tidak stabil adalah salah satu masalah yang paling relevan dalam pembangunan sistem kendali otomatis. Metode ini dapat menghasilkan penelitian tentang efek dari suatu sistem kendali otomatis, atau melakukan pengaturan kendali pada suatu plant. Pada penelitian ini, akan dijelaskan bagaimana merancang sebuah ball balancing table (BBT) dan mengimplementasikan sistem kontrol otomasi ke dalamnya dengan menggunakan metode Fuzzy Logic dan PID Controller. Pada penelitian ini didapatkan kesimpulan bahwa pemasangan kendali Fuzzy Logic dan PID Controller memiliki efektifitas paling bagus dibandingkan dengan kendali close-loop ataupun kendali Fuzzy Logic dan PID Controller yang tidak dipasangkan bersamaan. Penggunaan metode Fuzzy Logic dan PID Controller yang menggunakan parameter trial and error dimana memasukkan nilai tuning manual yang dipasangkan pada ball balancing table dan NI MyRIO yang dirancang menghasilkan lama waktu menuju steady state paling singkat yaitu selama 8,7 detik, overshoot paling rendah, dan error yang hanya sebesar 0,4 terhadap nilai koordinat sumbu X dan sumbu Y.

Kata kunci: *Ball Balancing Table, Fuzzy Logic, Kontrol PID, NI myRIO*

ABSTRACT

Balancing unstable dynamic objects is one of the most relevant problems in the construction of automated control systems. This method can provide research on the effects of an automatic control system, or carry out a control arrangement on a plant. In this study, will be explained how to design a ball balancing table (BBT) and implement an automation control system into it using Fuzzy Logic and PID Controls methods. And from this research it is concluded that the installation of Fuzzy Logic and PID Controller control has the best effectiveness compared to close-loop control or Fuzzy Logic and PID Controller that are not installed together. The application of the Fuzzy Logic Controller and PID method paired on the ball balancing table and NI MyRio that was designed resulted in the shortest steady state time of 8.7 seconds, the lowest overshoot, and an error of only 0.4 on the X-axis and Y-axis coordinate values.

Keywords: *Ball Balancing Table, Fuzzy Logic, PID Controller, NI myRIO*

1. PENDAHULUAN

Sistem *Ball Balancing Table* (BBT) merupakan pengembangan dari sistem ball and beam, dimana sistem BBT sudah memiliki gerakan dua dimensi dibandingkan dengan sistem ball and beam yang memiliki gerakan satu dimensi. Sistem ini banyak digunakan untuk perangkat eksperimen dalam studi sistem *non-linear multivariabel*. BBT ini terdiri dari bola yang menggelinding bebas di atas pelat persegi panjang yang dipasang di tengah dan dapat berputar di sekitar sumbu X dan Y, oleh karena itu sistem ini menantang karena sangat tidak stabil dalam kontrol loop terbuka. Koordinat bola besi yang menggelinding bebas diperoleh melalui sensor layar sentuh secara *real-time* (Hamdoun, dkk, 2021).

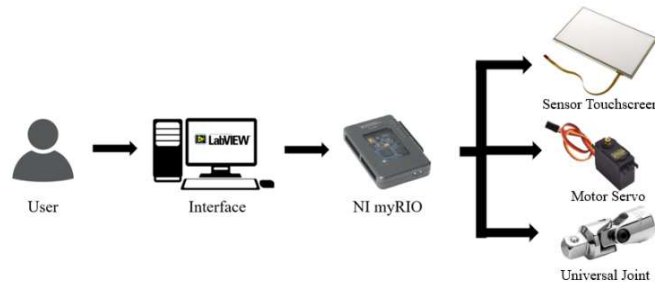
Ada dua jenis masalah yang biasa diteliti dalam sistem BBT (Kopichev, dkk, 2019) ini diantaranya adalah masalah kontrol posisi statis di mana bola distabilkan pada posisi referensi, dan masalah kontrol posisi dinamis di mana bola mengikuti lintasan yang diinginkan. Banyak pengontrol telah disarankan untuk mempelajari masalah ini dan salah satu yang paling umum adalah pengontrol PID klasik. Namun, PID klasik memiliki banyak keterbatasan yang disebutkan oleh beberapa peneliti seperti waktu penyelesaian yang lama dan *overshoot* yang besar (Wang, dkk, 2014) Jadi untuk memperbaiki kinerja sistem, beberapa metode kontrol lanjutan telah diselidiki diantaranya skema kontrol *Fuzzy* hirarkis, akan tetapi sistem ini baru masuk pada tahap layak diuji coba (Putra, dkk, 2021). Kemudian kontroler *Fuzzy*-PID berdasarkan filter Kalman diperkenalkan dimana parameter PID disetel sendiri, dan filter Kalman digunakan untuk mengatasi ketidaktepatan pemodelan dan mengurangi noise dari sensor (Han & Liu, 2016).

Penggunaan logika *Fuzzy* banyak dilakukan dengan pemanfaatan citra kamera dalam mendeteksi pergerakan bola (Iqbal, dkk, 2005). Hal ini ditunjukkan dengan hasil pergerakan halus yang dihasilkan dengan pemanfaatan citra (Kuncan, dkk, 2016). Selain itu terdapat penggunaan *Fuzzy*-PID dalam berbagai objek keseimbangan salah satunya dalam penggunaan *drone* untuk Komunikasi (Anggraeni, dkk, 2023) Ada juga pengontrol dua saluran nonlinier yang optimal berdasarkan struktur kontrol referensi model. Untuk menentukan parameter optimal, digunakan algoritma optimasi gulma invasif dan hasilnya desain yang diberikan cocok untuk mengontrol kelas sistem non-linier namun belum pada tahap tingkat lanjut (Ali, dkk, 2019). Kemudian pengontrol mode geser adaptif diusulkan, pengontrol ini kuat terhadap gangguan eksternal dan ketidakpastian parameter (Jeon & Hyun, 2017). Hingga dilakukan perbandingan antara kontroler *Fuzzy*, LQR, sliding mode, dan PID, berdasarkan performa static position dan dynamic tracking (Kassem, dkk, 2015). Selain itu, dua pendekatan kontrol yaitu merupakan umpan balik ruang keadaan berdasarkan pengamat dan pengontrol mode geser, yang kemudian dibandingkan dalam studi eksperimental (Sumega, dkk, 2018) dan . Studi eksperimental lain yang dilakukan pada pendekatan *trajectory tracking control* berbasis ROS (Anggraeni, dkk, 2023). Penggunaan *universal joint* pernah digunakan akan tetapi baru menggunakan metode PID (Mohammadi & Ryu, 2020).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengaplikasikan ilmu sistem kendali yang dapat disajikan oleh *plant ball balancing table*, sehingga dapat diketahui nilai respon antara penggunaan pengendali PID dan *Fuzzy*-PID. Dengan tujuan tersebut, penelitian akan fokus kepada pembuatan purwarupa *plant ball balancing table*, kemudian melakukan akuisisi data pada sensor koordinat pada *table*, serta melakukan pengendalian kestabilan pada motor servo berdasarkan respon yang didapatkan dari sensor di atas.

2. METODE

Pada metode penelitian sistem, akan dijelaskan desain sistem, diagram alir, blok diagram, *control loop* yang digunakan, desain pengontrol, dan model matematikanya. Untuk gambaran umum dari sistem ini akan dijelaskan oleh Gambar 1.

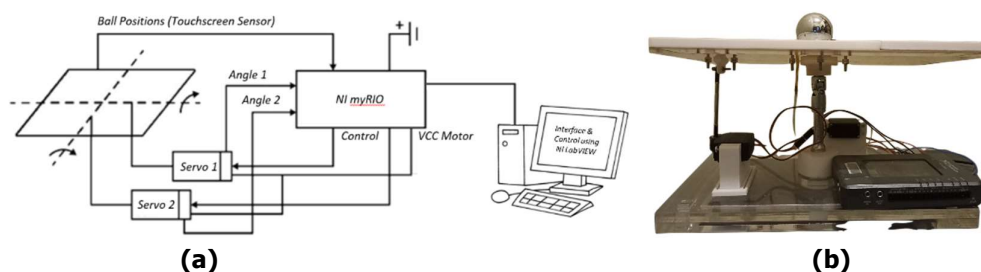


Gambar 1. Diagram Sistem BBT

Sistem ini terdiri atas empat bagian: masukan, pengontrol, keluaran, dan antarmuka. *Masukan* diperoleh dari sensor layar sentuh. Sensor layar sentuh mendeteksi koordinat posisi bola dalam piring. Koordinat posisi bola diproses melalui NI myRIO, dan ditampilkan pada antarmuka melalui NI LabVIEW. Pengguna melakukan pengaturan untuk titik stabil posisi bola dan metode kontrol yang akan digunakan. Data yang diatur oleh pengguna akan diproses oleh NI myRIO untuk didistribusikan ke aktuator. motor servo diatur sebagai aktuator sistem. motor servo dan *universal joint* memberikan gerakan bebas tentang sumbu X dan Y dari meja untuk menstabilkan bola pada posisi yang diinginkan. *Keluaran* dari sistem adalah nilai PWM yang digunakan untuk menggerakkan motor servo.

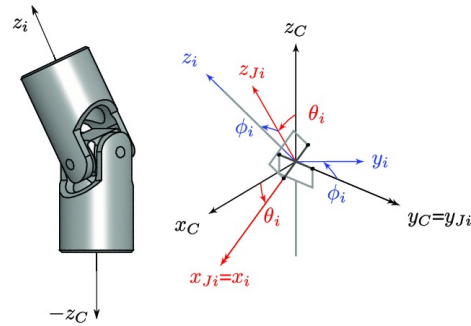
2.1 Sistem Perancangan Mekanik

Untuk memperoleh fungsi stabilisasi bola yang diinginkan pada permukaan datar, sistem pertama-tama harus dapat mengubah kemiringan platform di sekitar dua sumbu ortogonal. Ini diwujudkan oleh dua motor servo yang terhubung ke platform oleh dua pasang lengan. Panel sentuh resistif, bertindak sebagai platform, akan memberikan posisi bola sebagai input ke mikrokontroler dan pada kemiringan platform, motor servo akan digunakan untuk menghitung output yang diperlukan yang terlihat pada Gambar 2.



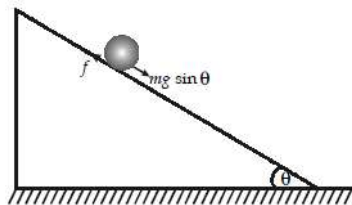
Gambar 2. (a) Elemen Esensial dari Sistem (b) Plant BBT

Pada bagian perancangan mekanik untuk sistem yang diusulkan, memiliki 3 sumbu kebebasan dalam pergerakannya, sehingga bentuk meja memiliki 4 kaki. Sistem meja dengan 4 kaki memerlukan motor sebagai penggerak hingga 2 buah motor servo untuk menahan beban disetiap kaki meja nya, kemudian titik pusat untuk beban gaya dan momen inersia dari meja tersebut tidak ada yang menopangnya.



Gambar 3. Representasi untuk Gerakan Universal Joint

Kaki yang berada dipusat poros meja akan dipasang *universal joint* pada Gambar 3 untuk memberikan fungsi dimana meja dapat bergerak bebas terhadap semua sumbu dan membentuk sudut kemiringan meja untuk menggerakkan bola yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Ilustrasi Pergerakan Bola diatas Meja

Sedangkan untuk bagaimana bola bergerak akan menggunakan prinsip momen inersia. Jika sebuah benda pejal bermassa M dan berjari-jari R , memiliki momen inersia $I = kMR^2$. Benda tersebut menggelinding pada suatu bidang miring dengan sudut kemiringan θ . Maka percepatan yang dialami benda pejal tersebut menurut hukum kedua newton pada gerak translasi, diperoleh hubungan:

$$Mg \sin \theta - f = Ma \text{ atau } Ma + f = Mg \sin \theta \quad (1)$$

Berdasarkan prinsip rotasi terhadap pusat benda, berlaku hubungan seperti persamaan dibawah ini:

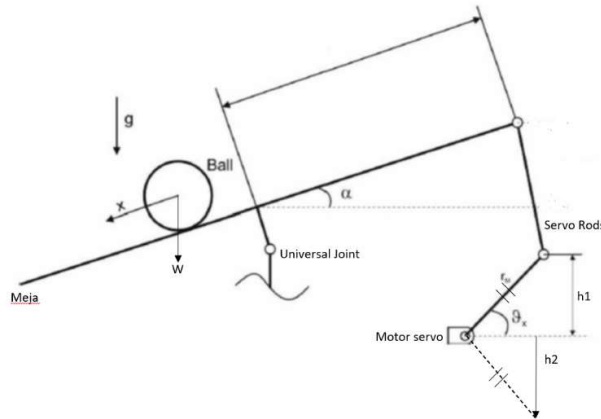
$$f = kMa \quad (2)$$

Substitusikan Persamaan (1) kedalam Persamaan (2), maka diperoleh persamaan percepatan benda penjal seperti dibawah ini:

$$a = \frac{g \sin \theta}{k + 1} \quad (3)$$

Dari analisis yang telah dilakukan, maka diketahui dalam mengontrol *plant ball balancing table* yang akan digunakan ada beberapa hal yang harus dipertimbangkan dan mempengaruhinya, diantaranya g (gravitasi), w (berat bola), x (gerakan perpindahan bola), α (sudut kemiringan meja), h_1 & h_2 (sudut gerakan motor servo), maka komponen mekanik yang dipilih harus

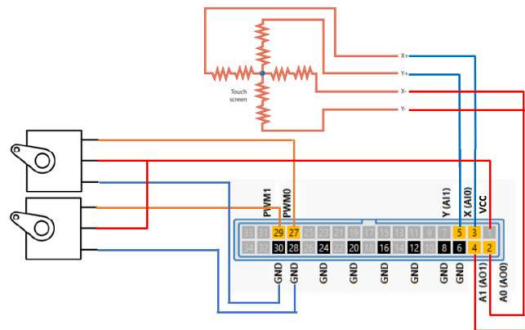
memenuhi kebutuhan dari setiap pertimbangan analisis gerak yang telah dilakukan. Diilustrasikan oleh Gambar 5.



Gambar 5. Analisis Pergerakan *Plant Ball Balancing Table*

2.2 Sistem Perancangan Elektrik

Pada penelitian sebelumnya menggunakan aplikasi transformasi laplace pada rangkaian listrik (Arifin, dkk, 2013) Sedangkan untuk menjalankan sistem yang telah dibuat, maka dibuatlah rangkaian *wiring* (pengkabelan) sensor, aktuator, dan pengendali seperti yang diperlihatkan pada Gambar 6.

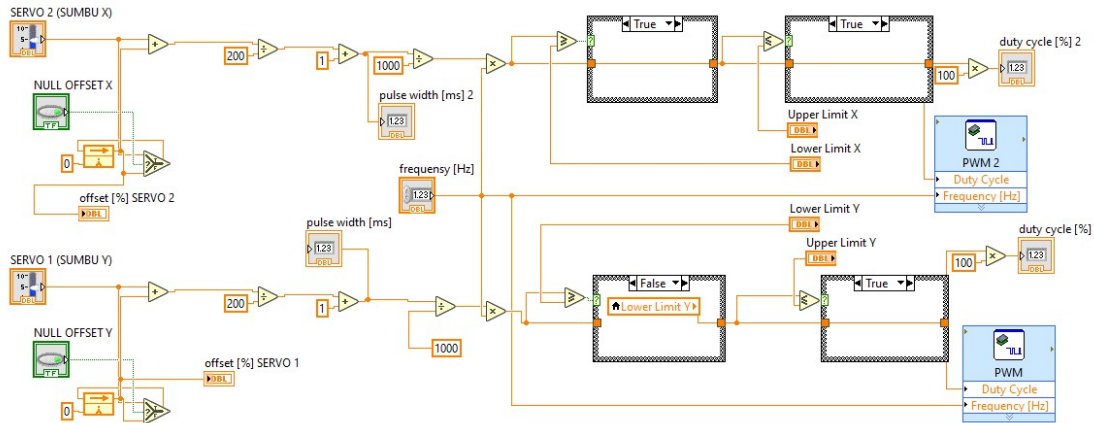


Gambar 6. *Wiring* (Pengkabelan) Diagram *System Ball Balancing Table*

Untuk mendapatkan sinyal keluaran dari *4 wire resistive touchscreen* diperlukan tegangan 5 volt sebagai masukanya, ketika kabel X+ mendapatkan tegangan 5 volt maka kabel X- akan mengeluarkan *keluaran* berupa tegangan terhadap posisi X, begitu pula sebaliknya untuk mendapatkan *keluaran* posisi Y. Disatu sisi untuk mendapatkan nilai *keluaran* tersebut tetap harus ada yang berposisi sebagai *grounding*, maka nilai X+ dan Y+ harus terus bergantian antara VCC dan GND. Sedangkan untuk menggerakkan aktuator yaitu motor servo, setiap jenis koneksi yang diperlukan sudah tersedia, untuk kabel PWM disambungkan pada *port* PWM yang tersedia pada kontroler myRIO, dan untuk VCC dan GND juga sudah terseda pada kontroler myRIO.

2.3 Rancangan Program Aktuator

Untuk mengendalikan motor servo digunakan blok fungsi PWM yang sudah tersedia dalam pemrograman LabVIEW pada Gambar 7. Nilai yang digunakan dalam mengendalikan motor servo ini adalah nilai *duty cycle* dan frekuensinya. Untuk mendapatkan nilai *duty cycle* dilakukan perhitungan untuk mengkonversi nilai numerik ke PWM dan kemudian dikonversi lagi ke *duty cycle*.



Gambar 7. Program menggerakkan Motor Servo pada LabVIEW

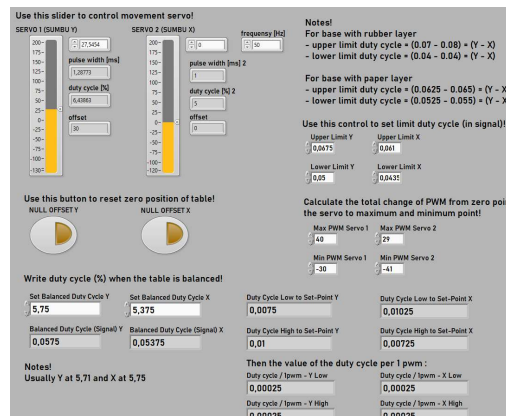
Dengan asumsi bahwa nilai numerik maksimum dan minimum dari pergerakan motor servo diatur ke nilai 200 hingga -200. maka kita mendapatkan rumus untuk mendapatkan PWM.

$$PWM = \frac{\text{numerical servo value}}{200} + 1 \tag{4}$$

Dari nilai PWM yang telah didapatkan, maka dapat dirubah kedalam nilai *duty cycle* dengan menggunakan Persamaan (5).

$$\text{Duty cycle} = \frac{PWM}{1000} \times \text{frequency} \tag{5}$$

Frekuensi yang digunakan disesuaikan dengan spesifikasi motor servo yang digunakan, dalam hal ini dengan nilai 50Hz. Fitur null offset juga dapat ditambahkan untuk mengatur ulang posisi 0 motor servo, dan pembatas *duty cycle* sebagai fitur keamanan untuk pergerakan BBT. Kemudian seluruh perancangan gerakan aktuator ini ditampilkan dalam antarmuka seperti pada Gambar 8.

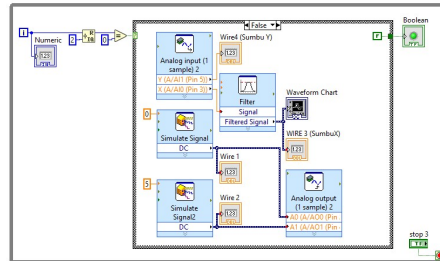


Gambar 8. Antarmuka dari Perancangan Program Aktuator

2.4 Rancangan Program Sensor

Gambar 9 adalah program sensor yang digunakan adalah layar sentuh resistif dengan 4 kabel berbentuk flexi. Prinsip sensor *resistive touchscreen* 4 kabel dibagi menjadi 2 untuk setiap

sumbu. Untuk mendapatkan sumbu X, arah keempat kabel diatur menjadi Kawat 1 = VCC, Kawat 2 = GND, Kawat 3 = Keluaran X, Kawat 4 = GND. Dan untuk mendapatkan sumbu Y Kawat 1 = GND, Kawat 2 = VCC, Kawat 3 = GND, Kawat 4 = Keluaran Y. untuk mengatasi hal ini, Gambar 8 menunjukkan cara kerja program. VCC dan GND dimasukkan dalam port keluaran analog pada NI MyRIO sehingga keluarannya dapat diatur sendiri, dan kabel 3 - 4 dihubungkan ke *port* masukan analog sehingga dapat menangkap keluaran dari sensor.

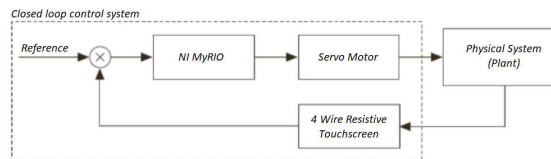


Gambar 9. Program Sensor 4-wire Resistive Touchscreen pada LabVIEW

Kondisi perubahan nilai VCC dan GND diatur oleh fungsi *while-loop* dengan algoritma ganjil-genap. Sehingga ketika perulangan genap maka akan menghasilkan nilai benar dan ketika perulangan ganjil maka akan menghasilkan nilai salah. Waktu perulangan juga diatur cepat menjadi 5 ms sehingga pembacaan sensor dilakukan hampir secara *real time*.

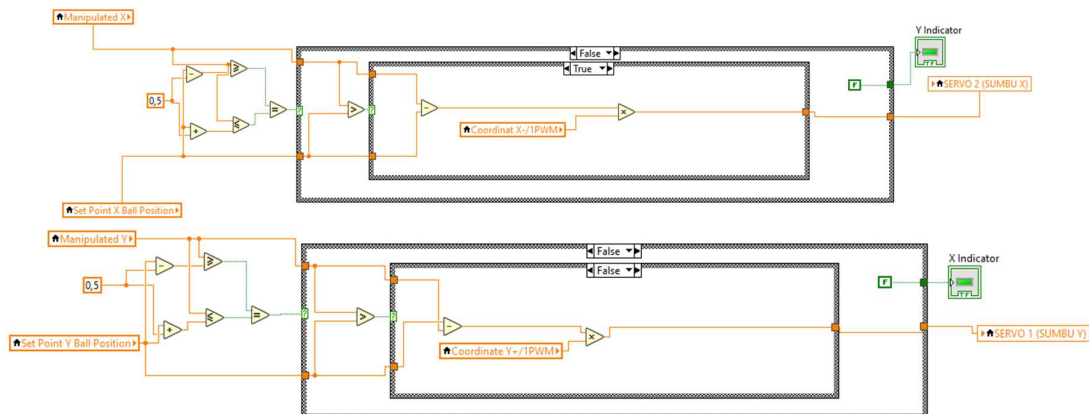
2.5 Rancangan Program Kendali *Loop* Tertutup

Kontrol loop tertutup merupakan representasi sistem dengan umpan balik dari sensor untuk mengendalikan aktuator motor servo terlihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Diagram sistem kontrol loop tertutup

Kontrol pertama yang digunakan pada plant ini adalah kontrol loop tertutup. NI MyRIO sebagai kontroler memberikan keluaran ke motor servo dari perbandingan posisi bola terhadap *set point*.



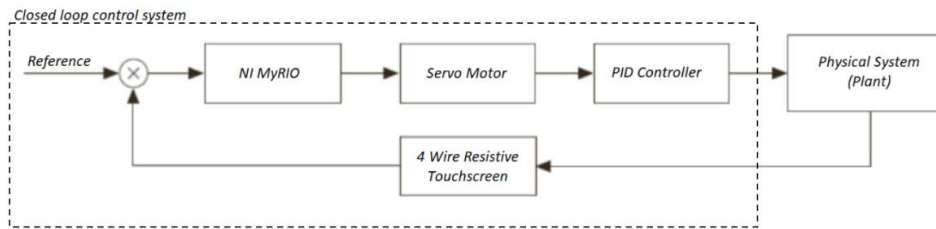
Gambar 11. Program Sistem Kontrol *Loop* Tertutup pada LabVIEW

Pada Gambar 11 program untuk bagaimana arah motor servo bergerak didasarkan pada situasi koordinat terhadap set point. Ketika koordinat lebih dari *set point* maka pergerakan motor servo akan minus, dan ketika koordinat kurang dari *set point* maka pergerakan motor servo akan positif. Berapa besar pergerakan motor servo didapatkan dari nilai error posisi bola besi dikalikan dengan nilai koordinat maksimum atau minimum dari masing-masing sumbu dibagi dengan batas nilai servo numerik yang digunakan. atau pada Persamaan (6) dibawah ini.

$$Output = error\ ball\ position \times movement\ motor\ servo\ value \quad (6)$$

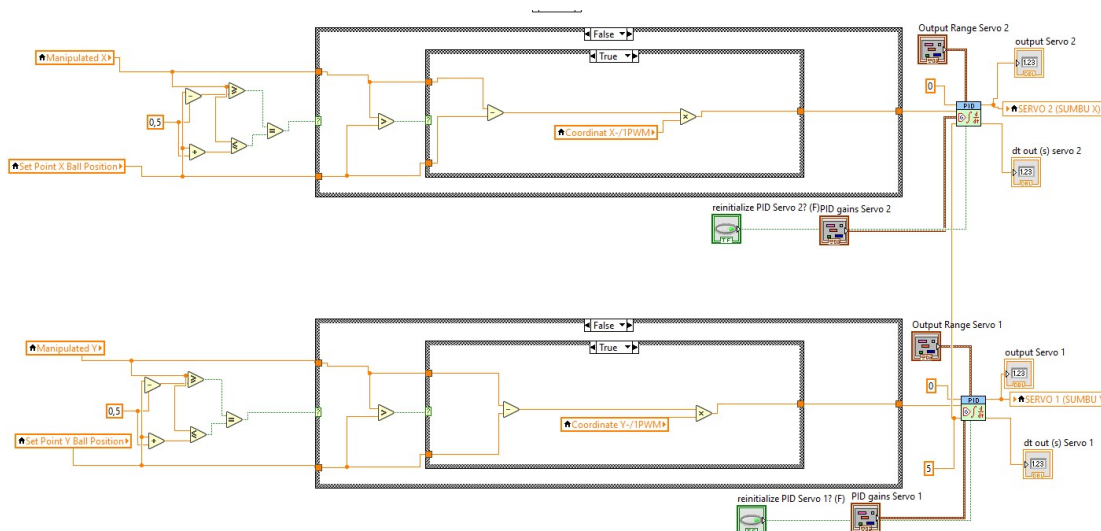
2.6 Rancangan Program Kendali Loop Tertutup dengan PID

Berikut diagram sistem pada *plant balancing table* pada kontrol loop tertutup.



Gambar 12. Diagram Sistem Kontrol Loop Tertutup

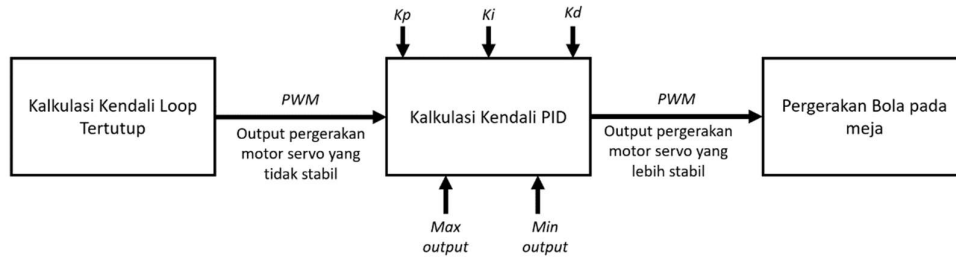
Kontrol kedua yang digunakan pada plant ini adalah dengan menambahkan kontrol PID pada kontrol loop tertutup yang telah dibuat. Hal ini bertujuan untuk mengurangi gangguan pada sistem sehingga menjadi lebih stabil.



Gambar 13. Program Sistem Kontrol Loop Tertutup dengan PID pada labVIEW

Dalam kontrol kedua ini, blok PID ditambahkan ke keluaran kontrol loop tertutup sebelum menjadi nilai kontrol aktuator. Nilai parameter PID dapat ditetapkan, memberikan fleksibilitas kepada pengguna untuk mengubah nilai. Sehingga pemasangan PID pada kontrol loop tertutup dapat dilihat dalam ilustrasi pada Gambar 14.

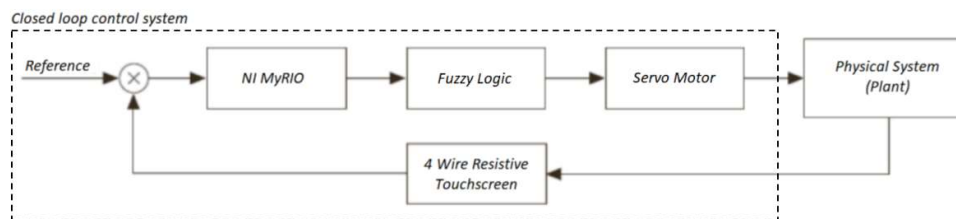
Rancang Bangun *Fuzzy-PID Controller* pada *Ball Balancing Table* dengan *Universal Joint* berbasis NI MyRIO dan labVIEW



Gambar 24. Blok Diagram Fungsi Kalkulasi Kendali PID

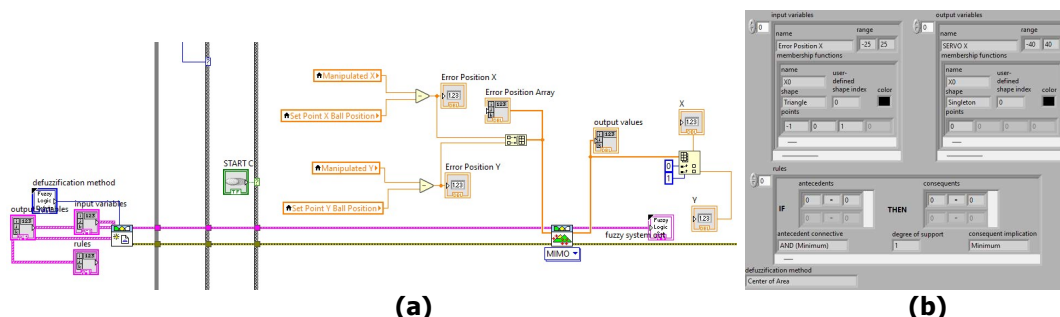
2.7 Rancangan Program Kendali Dengan Logika *Fuzzy Decision Making*

Kontrol ketiga yang digunakan adalah kontroler logika *fuzzy*. Kontrol logika *fuzzy* ini memiliki dua masukan yaitu masukan dari error koordinat X dan koordinat Y. Kemudian keluaran dari kontrol logika *fuzzy* ini juga akan ada dua yaitu pergerakan pada servo 1 dan servo 2. Kemudian keluaran dari kontrol logika *fuzzy* ini juga akan ada dua, yaitu pergerakan pada servo 1 dan servo 2. Gambar 15 menggambarkan diagram sistem.



Gambar 15. Diagram Sistem Kontrol dengan *Fuzzy Logic Decision Making*

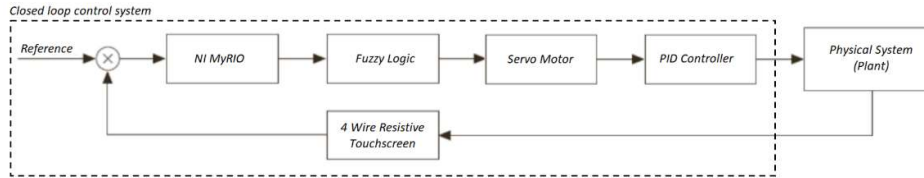
Karena *masukan* dan *keluaran* dari sistem lebih dari satu, maka prinsip logika *fuzzy* yang digunakan adalah MIMO (*multi input multi output*). Oleh sebab itu kedua *masukan* yang terpisah harus digabungkan terlebih dahulu. Begitu pula ketika *keluaran* yang didapatkan masih menyatu dalam bentuk array maka harus dipisahkan kembali untuk kemudian dihubungkan keaktuator yang digunakan.



Gambar 16. (a) Program Sistem dengan Logika *Fuzzy Decision Making* pada LabVIEW, (b) Antarmuka *Decision Making* dengan Logika *Fuzzy* pada LabVIEW

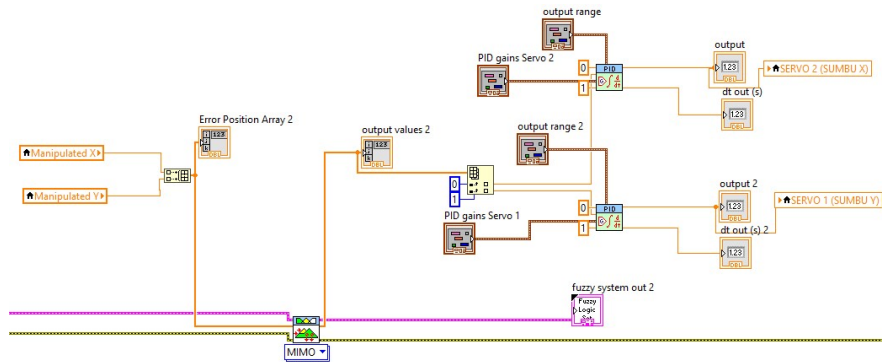
Keanggotaan logika *fuzzy* dapat disesuaikan dengan memasukkan nilai error posisi -25, 25, aturan-aturan IF = 0 Then 0 = 0, *antecedent connective* AND (Minimum), *degree of support* dengan nilai 1, *consequent implication* dengan minimum, dan metode defuzzifikasi menggunakan *Center of Area*.

2.8 Rancangan Program Kendali Dengan Logika *Fuzzy Decision Making* dan PID
 Kendali terakhir yang merupakan kendali yang paling mutakhir dalam penelitian ini adalah kombinasi antara logika *fuzzy* dan pengendali PID yang ditunjukkan pada Gambar 17.



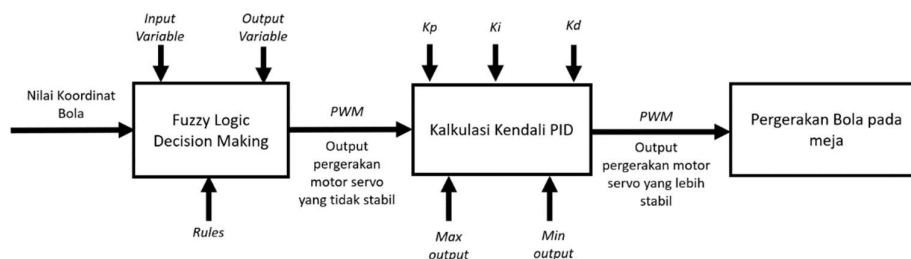
Gambar 3. Diagram Sistem Kontrol dengan *Fuzzy Logic Decision Making* dan PID

Kendali PID ini dipasang pada *keluaran* dari pengendali logika *fuzzy*.



Gambar 18. Program Sistem dengan Logika *Fuzzy Decision Making* dan PID pada LabVIEW

Maka pada kendali terakhir ini *user* dapat melakukan kendali untuk mengatur parameter-parameter logika *fuzzy* dan PID dengan cara memasukkan nilai percobaan antara K_p , K_i dan K_d dengan nilai 1-10. Logika *fuzzy* mengubah nilai koordinat dari bola menjadi nilai PWM untuk menggerakkan motor servo, selanjutnya nilai tersebut distabilkan dengan PID.

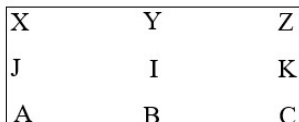


Gambar 19. Blok Diagram Fungsi Kalkulasi Kendali dengan Logika *fuzzy* dan PID

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

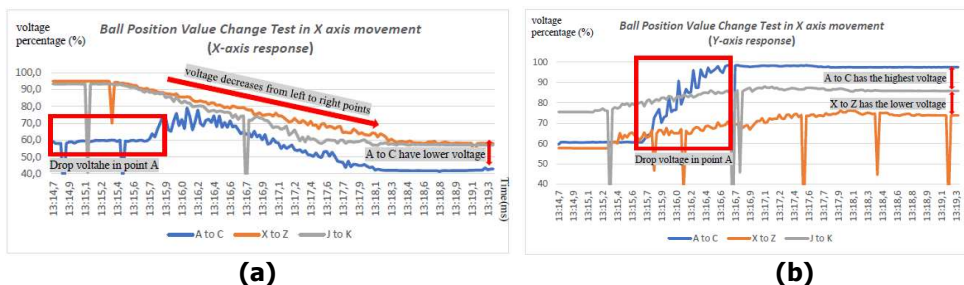
3.1 Pengujian Perubahan Nilai Posisi Bola

Untuk menguji perubahan nilai koordinat untuk posisi bola dengan sensor touchscreen resistif 4 kawat, diuji dengan mengamati sinyal pembacaan sensor terhadap perubahan posisi. Perubahan posisi bola dilakukan dengan skema seperti Gambar 20 berikut ini.



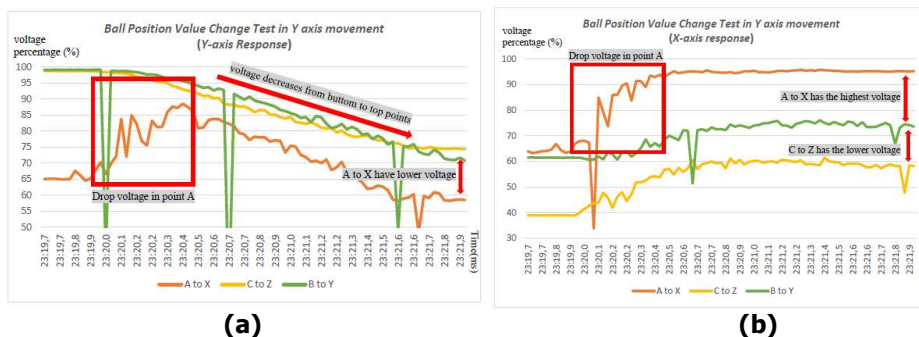
Gambar 20. Skema Perubahan Posisi Bola

Pengujian pertama dilakukan dengan melihat respon perubahan dari posisi bola terhadap sumbu X, yaitu pergerakan dari titik A ke C, J ke K, dan X ke Z. Dibawah ini grafik dari hasil uji coba.



Gambar 21. (a) Pertubahan Nilai Respon Koordinat X, (b) Perubahan Nilai Respon Koordinat Y, terhadap Uji Coba pada Sumbu X

Pengujian kedua dilakukan dengan melihat respon perubahan dari posisi bola terhadap sumbu Y, yaitu pergerakan dari titik A ke X, B ke Y, dan C ke Z. Dibawah ini grafik dari hasil uji coba.



Gambar 22. (a) Pertubahan Nilai Respon Koordinat Y, (b) Perubahan Nilai Respon Koordinat X, terhadap Uji Coba pada Sumbu Y

Dari Gambar 21 (a) dan Gambar 22 (a) maka dapat diketahui bahwa jarak dari ujung ke ujung untuk setiap sumbu dalam nilai koordinat sensor yang digunakan adalah 44 perubahan nilai koordinat untuk sumbu X, dan 28 perubahan nilai koordinat untuk sumbu Y. maka jika dikonversikan dalam bentuk centimeter akan menjadi seperti Tabel 1 dibawah ini.

Perbandingan	Hasil Perbandingan
panjang sumbu X kekanan (cm)	0.42 cm
perubahan nilai koordinat sumbu X (kanan)	
panjang sumbu X kekiri (cm)	0.61 cm
perubahan nilai koordinat sumbu X (kiri)	
panjang sumbu Y kekanan (cm)	0.48 cm
perubahan nilai koordinat sumbu Y (kanan)	
panjang sumbu Y kekiri (cm)	0.48 cm
perubahan nilai koordinat sumbu Y (kiri)	

3.2 Pengujian Pergerakan Bola

Pengujian selanjutnya sebelum masuk ketahap kendali adalah pengujian pergerakan bola, dari Gambar 23 dapat diketahui bahwa bola akan menggelinding kearah mana ketika aktuator motor servo diberikan nilai masukan. Kemudian kita harus mengetahui pada kemiringan berapa derajat bola akan mulai menggelinding dan bagaimana alas yang paling tepat dengan *plant ball balancing table* yang telah dibuat. Alas ini bertujuan untuk membuat bola tidak mengalami slip ketika menggelinding dan percepatan bola sesuai dengan luas penampakan meja yang digunakan. Dalam pengujian ini akan dilakukan dengan 3 jenis alas yang berbeda, yang pertama adalah alas dengan lapisan kertas, yang kedua dengan lapisan amplas, dan yang ketiga alas dengan lapisan karet. Dibawah ini adalah gambaran dari penggunaan alas yang ditawarkan.



Gambar 4. (a) Alas Kertas, (b) Alas Amplas, dan (c) Alas Karet

Alas kertas yang digunakan adalah kertas jeruk, alas amplas yang digunakan adalah amplas dengan grid 80, dan alas karet yang digunakan adalah alas karet *dashboard* mobil. Dibawah ini tabel percobaan bola dapat bergerak terhadap perubahan kemiringan meja dengan berbagai macam alas.

Tabel 2. Uji Manual Pergerakan Bola Terhadap Kemiringan

Alas	Kemiringan meja untuk bola bergerak	Kemiringan meja untuk bola berubah arah	Respon gerakan bola
Meja Kayu	1°	-2°	<i>Unstable</i>
Tanpa Alas	0° > x < 1°	-1°	<i>Unstable</i>
Alas Kertas	1°	-2°	<i>Unstable</i>
Alas Amplas	2°	-2°	<i>Stable</i>
Alas Karet	5°	-5°	<i>Stable</i>

Dari hasil percobaan maka akan dipilih alas dengan menggunakan amplas, walaupun alas karet sama dengan alas amplas dalam pemberian respon untuk menggerakkan dan mengubah arah gerak bola, percepatan bola yang lambat membuat bola dapat berhenti bergerak saat kemiringan meja mencapai 1°. Bahkan ketika diuji coba dengan kendali loop tertutup saja bola sudah dapat mencapai titik stabil, hal ini membuat penggunaan alas karet tidak menjadi opsi paling baik untuk penggunaan dan percobaan sistem kendali.

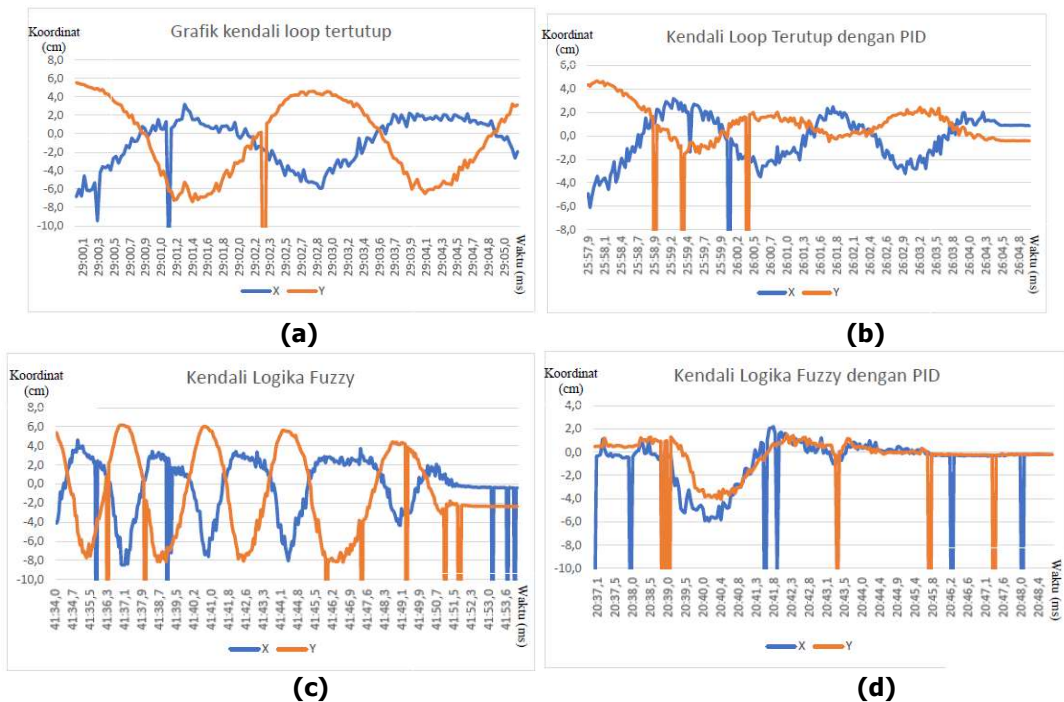
3.3 Pengujian Hasil Kendali

Hasil pengujian sistem yang diusulkan akan divalidasi dari respon posisi bola kembali ke *set point*. Variabel yang dilihat pada Tabel 3 hasil dari respon tersebut adalah waktu dan *overshoot*. Untuk mendapatkan respon kendali tersebut maka ditentukan parameter dan nilai yang digunakan untuk kendali yang akan dipakai.

Tabel 3. Parameter dan Nilai untuk Sistem Kendali

Parameter	Nilai
<i>Duty cycle balanced value - Inclination</i>	Servo 1 = 57,5 % - 0° Servo 2 = 52,5% - 1°
<i>Max duty cycle value - Inclination</i>	Servo 1 = 61,75% - 2° Servo 2 = 56,25% - 2°
<i>Min duty cycle value - Inclination</i>	Servo 1 = 53,75% - 2° Servo 2 = 48,75% - 2°
<i>Set point X-axis</i> (persentase nilai koordinat)	72,5 %
<i>Set point Y axis</i> (persentase nilai koordinat)	84 %

Berikut perbandingan dari grafik hasil sistem kendali yang digunakan, terdapat perbandingan dengan kendali loop tertutup, dengan kendali loop tertutup ditambahkan PID, dengan *fuzzy logic decision making*, dan terakhir *fuzzy logic decision making* ditambahkan PID.



Gambar 5. (a) Hasil Uji Coba Kendali Loop Tertutup, (b) Hasil Uji Coba Kendali Loop Tertutup Ditambahkan PID, (c) Hasil Uji Coba *Fuzzy Logic Decision Making*, (d) Hasil Uji Coba *Fuzzy Logic Decision Making* Ditambahkan PID

Tabel 4. Kesimpulan dari Hasil Percobaan

	Kendali loop tertutup	Kendali loop tertutup + PID	Logika <i>Fuzzy</i>	Logika <i>Fuzzy</i> + PID
Lama Waktu	-	9,3 s	17 s	8,7 s
<i>Overshoot</i>	-	X = 2,9 cm Y = 1,5 cm	X = 8,5 cm Y = 6 cm	X = 5,7 cm Y = 4,1 cm
<i>Error</i>	-	X = 2,9 cm Y = 1,5 cm	X = 0,4 cm Y = 2,3 cm	X = 0,2 cm Y = 0,2 cm

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan pada *plant ball balancing table* yang telah dibuat dengan menggunakan *universal joint* dan *controller NI MyRIO* menggunakan LabVIEW, didapatkan tabel hasil percobaan pada Tabel 4. Kendali dengan loop tertutup dan PID memberikan respon menuju kestabilan selama 9,3 detik, *overshoot* sumbu X sejauh titik 2,9 cm, *overshoot* titik Y sejauh 1,5 cm, dan *error* sumbu X sebesar 0,9 cm sedangkan untuk sumbu Y *error* sebesar 0,4 cm. Kendali dengan logika *fuzzy* memberikan respon menuju kestabilan selama 17 detik, *overshoot* sumbu X sejauh titik 8,5 cm, *overshoot* titik Y sejauh 6 cm, dan *error* sumbu X sebesar 0,4 cm sedangkan untuk *error* sebesar 2,3 cm. Serta Kendali dengan logika *fuzzy* dan PID memberikan respon menuju kestabilan selama 8,7 detik, *overshoot* sumbu X hingga sejauh 5,7 cm, *overshoot* titik Y sejauh 4,1 cm, dan *error* untuk sumbu X dan Y memberikan nilai yang sama sebesar 0,2 cm. Hal ini membuat Fuzzy-PID adalah kendali dengan waktu tersingkat, *overshoot* terendah, dan *error* terkecil dalam penelitian ini.

4. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan pada *plant ball balancing table* yang telah dibuat dengan menggunakan *universal joint* dan *controller NI MyRIO* menggunakan LabVIEW, metode yang digunakan adalah *trial and error* juga dikenal sebagai metode *tuning* manual dan metode ini adalah metode yang paling sederhana. Dalam metode ini, pertama-tama tingkatkan nilai k_p hingga sistem mencapai respons beresolusi tetapi sistem tidak boleh membuat tidak stabil dan menjaga nilai k_d dan k_i nol. Setelah itu, set nilai k_i sedemikian rupa sehingga osilasi sistem terhenti. Setelah itu atur nilai k_d untuk *fast response* dengan persamaan $y(t) = k_p * e(t) + k_d * de(t) / dt$ dan data yang telah diperoleh maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut: Kendali dengan loop tertutup tidak memberikan respon stabil sama sekali. Berdasarkan hasil penelitian ini kendali dengan logika Fuzzy-PID pada *Ball Balancing Table* memiliki waktu tersingkat 8,7 detik, *overshoot* terendah $X=5,7$ cm dan $Y=4,1$ cm, dan *error* terkecil sebesar $X=0,2$ cm dan $Y=0,2$ cm.

DAFTAR RUJUKAN

- Ali, H. I., Jassim, H. M., & Hasan, A. F. (2019). Optimal Nonlinear Model Reference Controller Design for Ball and Plate System. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(8), 6757–6768.
- Anggraeni, P., Khoirunnisa, H., Rizal, M. N., & Alfadhila, M. F. (2023). Implementation of WiFi Communication on Multi UAV for Leader-Follower Trajectory based on ROS. *5th International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication, ICAIIC 2023*, (pp. 697–702).
- Anggraeni, P., Rizal, M. N., Khoirunnisa, H., & Kristian, T. (2023). Experimental of Quadcopter Trajectory Tracking Control Based ROS. *MOTIVATION: Journal of Mechanical, Electrical and Industrial Engineering*, 5(1), 295–302.
- Arifin, A., Musthofa, M. W., & Sugiyanto, S. (2013). Aplikasi Transformasi Laplace Pada Rangkaian Listrik. *Jurnal Fourier*, 2(1), 45.
- Hamdoun, M., Abdallah, M. Ben, Ayadi, M., Rotella, F., & Zambettakis, I. (2021). Functional

- observer-based feedback controller for ball balancing table. *SN Applied Sciences*, 3(6), 2–10.
- Han, J., & Liu, F. (2016). Positioning control research on Ball&Plate system based on Kalman filter. *Proceedings - 2016 8th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, IHMSC 2016*, (pp. 420–424).
- Iqbal, J., Khan, M. A., Tarar, S., Khan, M., & Sabahat, Z. (2005). Implementing ball balancing beam using digital image processing and fuzzy logic. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2005*(May), (pp. 2241–2244).
- Jeon, J. H., & Hyun, C. H. (2017). Adaptive sliding mode control of ball and plate systems for its practical application. *2017 2nd International Conference on Control and Robotics Engineering, ICCRE 2017*, (pp. 119–123).
- Kassem, A., Haddad, H., & Albitar, C. (2015). Comparison Between Different Methods of Control of Ball and Plate System with 6DOF Stewart Platform. *IFAC-PapersOnLine*, 48(11 11), 47–52.
- Kopichev, M. M., Putov, A. V., & Pashenko, A. N. (2019). Ball on the plate balancing control system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 638(1).
- Kuncan, M., Kaplan, K., Acar, F., Malik, I., & Metin, K. H. (2016). Fuzzy Logic Based Ball on Plate Balancing System Real Time Control by Image Processing. *International Journal of Natural and Engineering Sciences*, 10(3), 28–32.
- Mohammadi, A., & Ryu, J. C. (2020). Neural network-based PID compensation for nonlinear systems: ball-on-plate example. *International Journal of Dynamics and Control*, 8(1), 178–188.
- Putra, I. N. T. A., Kartini, K. S., Sinariyani, N. K. A., & Maharani, N. (2021). Decision Support System For Determining The Type Of Workout Using The Fuzzy Analytical Hierarchy Process (F-AHP) In GYM STIKI. *Telematika*, 18(1), 73.
- Sumega, M., Struharnansky, L., Gorel, L., & Pacha, M. (2018). Simulation and experimental study of ball position control at biaxial platform using state space approach. *Communications - Scientific Letters of the University of Žilina*, 20(1), 47–54.
- Wang, Y., Sun, M., Wang, Z., Liu, Z., & Chen, Z. (2014). A novel disturbance-observer based friction compensation scheme for ball and plate system. *ISA Transactions*, 53(2), 671–678.