

Implementasi Fuzzy Logic pada Sistem Robotik Ball Balancing Table dengan Konfigurasi Ball Joint untuk Stabilitas Dinamis

Hilda Khoirunnisa¹, Fitria Suryatini², Suharyadi Pancono³, Muhamad Al Ghafara⁴, Cepi Ramdani^{5*}

Program Studi Teknologi Rekayasa Otomasi, Jurusan Teknik Otomasi Manufaktur Dan Mekatronika
Politeknik Manufaktur Bandung

Jl. Kanayakan No.21, Dago, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40135

hilda@polman-bandung.ac.id¹, fitria@ae.polman-bandung.ac.id², suharyadi@ae.polman-bandung.ac.id³,
al.ghafara@mhs.polman-bandung.ac.id⁴, cepi@polman-bandung.ac.id^{5*}

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan Fuzzy Logic Controller (FLC) pada sistem Ball Balancing Table (BBT) dengan konfigurasi struktur mekanik Ball Joint untuk stabilitas dinamis. Sistem ini dirancang untuk dapat menempatkan bola pada posisi tertentu. Posisi bola dideteksi secara real-time menggunakan panel touchscreen resistif dan sinyal posisi diproses oleh kontroler fuzzy pada NI myRIO, yang kemudian mengendalikan aktuator motor servo untuk menyesuaikan kemiringan permukaan meja. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menempatkan bola pada posisi target dengan tingkat akurasi yang baik sebesar 93.63% untuk sumbu X dan 90.41% untuk sumbu Y. Rerata Kesalahan posisi bola pada sumbu X tercatat sebesar 17.33 mm sedangkan pada sumbu Y sebesar 14.55 mm. Untuk waktu respons penempatan bola terhadap titik target, hasil pengujian mencatat waktu tercepat 10.8 detik dan waktu terlama 16.82 detik. Hasil ini menunjukkan bahwa implementasi fuzzy logic dan struktur mekanik Ball Joint menghasilkan sistem kendali yang cukup akurat dan responsif.

Kata Kunci: Ball Balancing Table, Ball Joint, Fuzzy Logic Controller, NI myRIO.

1 Pendahuluan

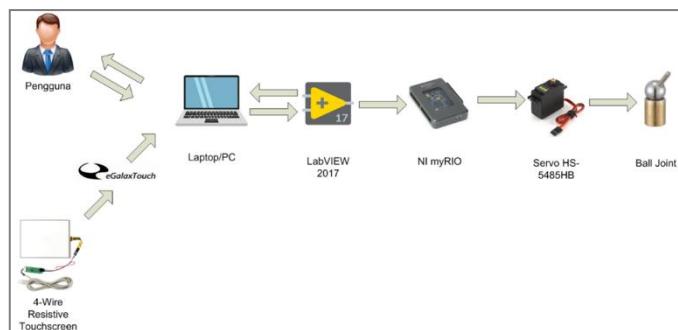
Perkembangan teknologi kendali terus mengalami kemajuan pesat, terutama dalam bidang sistem kendali non-linier dan sistem dinamis yang kompleks. Sistem kendali yang pada awalnya dilakukan secara manual oleh manusia sebagai operator kini mulai beralih bekerja secara otomatis. Pada bidang sistem kendali otomatis permasalahan mengendalikan keseimbangan objek yang tidak stabil dan dinamis adalah salah satu yang paling relevan[1]. Salah satu sistem yang sering digunakan sebagai platform pembelajaran maupun penelitian dalam bidang kendali adalah Ball Balancing Table (BBT). Sistem 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[2]. Sistem ini merepresentasikan tantangan pengendalian posisi sebuah objek (bola) di atas permukaan yang dapat dimiringkan, sehingga membutuhkan kontrol yang presisi dan responsif terhadap perubahan posisi bola. Permasalahan utama dalam sistem BBT adalah bagaimana menempatkan bola pada posisi yang diinginkan, meskipun terdapat gangguan atau perubahan kondisi awal. Sistem ini bersifat tidak stabil secara alami dan memiliki karakteristik non-linier yang cukup kompleks, sehingga pengendalian menggunakan metode konvensional seperti Proportional Integral Derivative (PID) sering kali memiliki keterbatasan[3][4], terutama dalam menghadapi perubahan kondisi dan parameter sistem secara dinamis.

Dalam menjawab tantangan tersebut, metode Fuzzy Logic Controller (FLC) menjadi salah satu pendekatan yang menjanjikan[5][6][7] karena mampu menangani sistem non-linier tanpa memerlukan model matematis yang kompleks. FLC bekerja dengan cara meniru cara berpikir manusia dalam membuat keputusan berdasarkan aturan-aturan linguistik[8], sehingga lebih adaptif terhadap perubahan kondisi dan cocok diterapkan pada sistem dengan ketidakpastian tinggi. Untuk mengendalikan sistem secara real-time, digunakan perangkat NI myRIO sebagai platform kontrol utama, yang menjalankan algoritma fuzzy logic dan berfungsi sebagai antarmuka antara sensor input dan aktuator output. Panel touchscreen resistif digunakan sebagai sensor posisi bola karena kemampuannya dalam mendeteksi posisi secara presisi dan responsif.

Selain aspek kontrol, aspek mekanik juga memegang peranan penting dalam stabilitas dan performa sistem BBT. Struktur mekanik berbasis Ball joint dapat menjadi salah satu pilihan terbaik untuk kontrol posisi. Ball joint merupakan sambungan mekanik berbentuk bola yang memungkinkan pergerakan rotasi bebas pada berbagai arah, menjadikannya ideal sebagai titik tumpu untuk sistem kendali dua sumbu. Penggunaan Ball joint menyederhanakan struktur mekanik karena satu titik tumpu dapat menangani rotasi di kedua sumbu, berbeda dengan sistem konvensional yang memerlukan dua aktuator dengan engsel terpisah. Ball joint sangat cocok untuk digunakan sebagai bagian modular untuk manipulator karena beberapa derajat kebebasan (DOF), karakteristik kontrol posisi yang sangat baik, dan integritas struktural yang baik[9]. Mekanisme ini memungkinkan pergerakan lebih halus, presisi, dan meningkatkan kecepatan respons sistem karena minim gesekan serta mengurangi jumlah komponen gerak. Berdasarkan hal tersebut maka penelitian ini bertujuan untuk membangun sistem Ball Balancing Table (BBT) mengimplementasikan Fuzzy Logic Controller (FLC) dengan konfigurasi mekanik berbasis Ball joint.

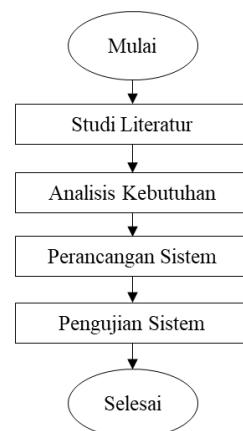
2 Metodologi Penelitian

Gambaran umum sistem yang dibangun ditunjukkan pada Gambar. 1. Cara kerja sistem BBT yang dibangun adalah sebagai berikut, Pengguna memasukkan parameter pada perangkat lunak NI LabVIEW yang kemudian akan diteruskan menuju controller NI myRIO. NI myRIO mendapat masukan berupa koordinat letak posisi bola dari panel resistive touchscreen yang pengolahan data pembacaannya diproses oleh eGalaxyTouch. Luaran dari NI myRIO akan diteruskan menuju motor servo yang akan menggerakkan pelat dengan Ball joint sebagai penopang agar pelat tetap kokoh tetapi dapat mengikuti pergerakan yang diberikan oleh motor servo.



Gambar. 1. Gambaran Umum Sistem Ball Balancing Table

Tahapan penelitian dapat dilihat pada Gambar. 2. diawali dengan Studi Literatur, kemudian secara berturut-turut dilanjutkan dengan Analisis Kebutuhan, Perancangan Sistem, dan Pengujian Sistem.



Gambar. 2. Metode Penelitian

2.1 Studi Literatur

Pada tahap dilakukan pengumpulan informasi dari dokumen-dokumen penelitian dalam bentuk jurnal mengenai Ball Balancing Table untuk memahami posisi saat ini pada penelitian yang dilakukan dan buku sebagai acuan teori. Selain itu, dilakukan analisis terhadap informasi yang sudah dikumpulkan untuk dijadikan sebagai referensi yang menghasilkan solusi pada penelitian ini.

2.2 Analisis Kebutuhan

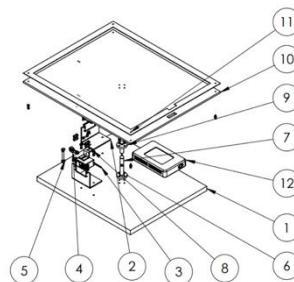
Guna menghasilkan sistem Ball Balancing Table, yang dapat menempatkan bola pada posisi tertentu dalam keadaan seimbang dengan waktu singkat dan tingkat ketepatan posisi bola yang baik, target waktu 2 detik dan target akurasi mencapai 95%, maka perlu dilakukan analisis kebutuhan sistem dengan tepat.

2.3 Perancangan Sistem

Perancangan sistem meliputi perancangan mekanik, perancangan elektrik, perancangan sistem informasi, perancangan interface, dan perancangan sistem kendali.

1. Perancangan Mekanik

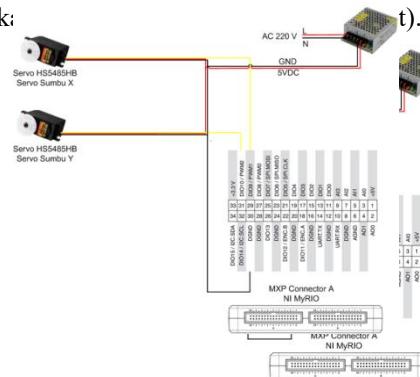
Konstruksi mekanik pada Ball Balancing Table yang dibangun terinspirasi dari penelitian [10][11][12] dapat dilihat pada Gambar. 3. Tersusun dari berbagai komponen mekanis diantaranya (1) Base, (2) Bracket servo, (3) Motor servo, (4) Arm servo, (5) Rod servo, (6) Connector base, (7) Ball joint, (8) Bracket touchscreen (9) Connector base touchscreen, (10) Base touchscreen, (11) Cover touchscreen, (12) NI myRIO.



Gambar. 3. Rancangan Mekanik Sistem Ball Balancing Table

2. Perancangan Elektrik

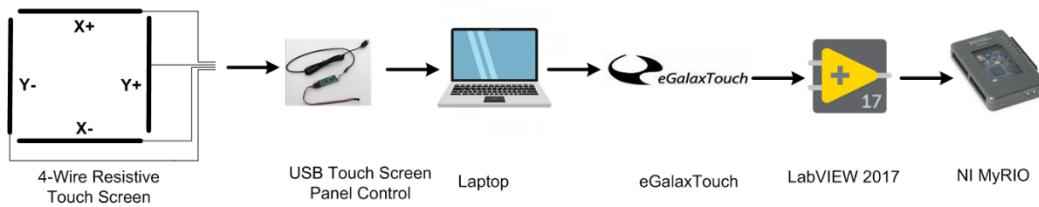
Rangkaian elektrik sistem BBT dapat dilihat pada Gambar. 4. Motor servo memiliki 3 kabel yaitu merah (+), hitam (-), kuning (pulsa). Tiga kabel motor servo dihubungkan dengan NI myRIO dengan pin masing-masing. Kabel merah menuju pin 1 (+5V), kabel hitam menuju pin 30 (DGND), dan kabel pulsa menuju pin 27 dan 29 (PWM). Selain itu terdapat 4 kabel pada resistive touchscreen yang dihubungkan dengan NI myRIO. X+ dan Y+ masing-masing dihubungkan dengan pin 3 dan 5 (analog input) dan X- dan Y- masing-masing dihubungkan.



Gambar. 4. Rangkaian Elektrik Ball Balancing Table

3. Perancangan Sistem Informasi

Rancangan perjalanan data mulai dari sensor hingga ke controller pada sistem BBT ditunjukkan pada Gambar. 5.



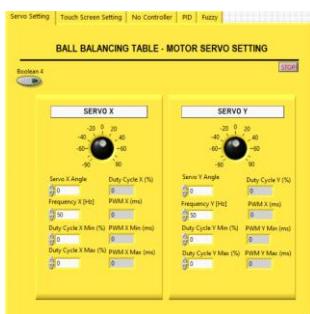
Gambar. 5. Rancangan Sistem Informasi Ball Balancing Table

Resistive touchscreen akan menghasilkan nilai dari posisi bola berada. Nilai hasil pembacaan resistive touchscreen dikirim ke laptop/komputer melalui USB touchscreen panel control. Dengan USB touchscreen panel control nilai dari resistive touchscreen akan didapatkan oleh laptop/komputer. eGalaxTouch merupakan software yang digunakan untuk mendeteksi sentuhan pada resistive touchscreen sebagai pointer. Pointer akan menempatkan posisi sesuai dengan bagian resistive touchscreen yang disentuh. Setelah itu nilai diterima program LabVIEW yang berjalan pada komputer yang kemudian menampilkan nilai koordinat posisi pointer. Koordinat yang dibaca didapatkan dari posisi pointer pada resolusi layar yang digunakan. Hasil pembacaan disimpan dalam sebuah variabel global yaitu variabel vertikal dan horizontal. LabVIEW yang berjalan pada myRIO akan membaca nilai variabel global vertikal dan horizontal sebagai koordinat posisi bola.

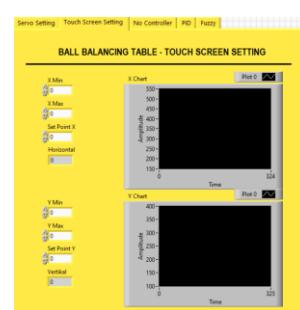
4. Perancangan Interface

Gambar. 6. menunjukkan rancangan interface dari servo setting yang berfungsi untuk mengatur posisi sudut servo secara manual. Pada tampilan ini terdapat 2 buah knob yang dapat mengontrol posisi servo sesuai dengan nilai sudut yang dimasukan. Pada bagian ini juga dapat mengatur nilai frekuensi, duty cycle min dan duty cycle max untuk melakukan kontrol posisi bola dengan metode tanpa pengontrol.

Gambar. 7. menunjukkan interface touchscreen setting yang berfungsi untuk menentukan nilai posisi target atau posisi bola yang dituju. Pada bagian ini dapat dilakukan penentuan nilai X Min, X Max, Y Min, dan Y Max untuk kontrol posisi bola dengan metode tanpa pengontrol. Di bagian kanan terdapat 2 chart yang dapat menampilkan pergerakan bola pada masing-masing koordinat.



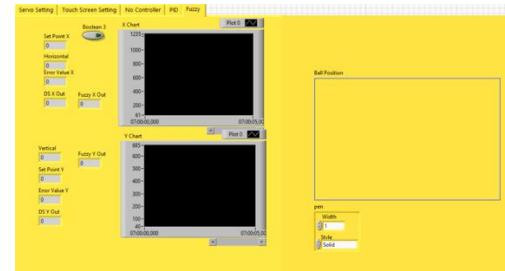
Gambar. 6. Interface Servo Setting



Gambar. 7. Interface Touchscreen Setting

Gambar. 8. menunjukkan Interface No Controller. Tampilan ini untuk menampilkan data posisi bola, horizontal (posisi x), duty cycle servo x, vertikal (posisi y), duty cycle servo y, dan 2 chart yang menampilkan posisi bola di masing-masing sumbu. Semua data yang ditampilkan pada bagian ini adalah data yang didapat ketika kontrol posisi bola berjalan dengan menggunakan metode no controller.

Gambar. 9. menunjukkan Interface Fuzzy Logic Controller. Semua data yang ditampilkan pada bagian ini merupakan data yang didapat dari kontrol posisi bola ketika menggunakan metode fuzzy logic controller. Pada bagian kanan akan ditampilkan animasi 2D posisi bola di atas resistive touchscreen.



Gambar. 8. Interface No Controller Gambar. 9. Interface Fuzzy Logic Controller

5. Perancangan Kendali Fuzzy Logic Controller

Kendali fuzzy yang digunakan adalah multi input single output (MISO). Terdapat 2 variabel input dari resistive touchscreen. Variabel input yang diterima berupa nilai error posisi bola dan pertambahan error setiap 50ms yang menggambarkan kecepatan bola. Kendali fuzzy akan menghasilkan 1 variabel output berupa nilai sudut yang akan dikonversi menjadi gerakan pada motor servo di sumbu X dan motor servo di sumbu Y. Kendali fuzzy pada sumbu X dan Y masing-masing memiliki 2 input variabel yang masing-masing memiliki fungsi keanggotaan. Tabel 2. menunjukkan fungsi keanggotaan sumbu X dan Y. Keduanya memiliki 11 fungsi keanggotaan.

Tabel 2. Fungsi Keanggotaan Variabel Input X dan Y

Fungsi Keanggotaan	Bentuk Fungsi	Nilai X				Nilai Y			
		α	β	γ	λ	α	β	γ	λ
Sangat Jauh +	SJ+	Trapesium	400	500	730	400	300	350	395
Jauh+	J+	Segitiga	300	400	500	300	200	300	350
Menengah+	M+	Segitiga	200	300	400	200	150	200	300
Dekat +	D+	Segitiga	100	200	300	100	100	150	200
Sangat Dekat+	SD+	Segitiga	0	100	200	0	0	100	150
Seimbang	S	Segitiga	-100	0	100	-100	-100	0	100
Sangat Dekat-	SD-	Segitiga	-200	-100	0	-200	-150	-100	0
Dekat-	D-	Segitiga	-300	-200	-100	-300	-200	-150	-100
Menengah-	M-	Segitiga	-400	-300	-200	-400	-300	-200	-150
Jauh-	J-	Segitiga	-500	-400	-300	-500	-350	-300	-200
Sangat Jauh-	SJ-	Trapesium	-730	-730	-500	-730	-395	-395	-350

Selain input variabel X dan Y terdapat input variabel lain yaitu ΔX dan ΔY yang merupakan perubahan dari nilai X dan Y pada waktu tertentu. Jika variabel X dan Y merepresentasikan error posisi bola, maka ΔX dan ΔY menggambarkan perubahan error posisi bola pada waktu tertentu. Fungsi keanggotaan dari variabel ΔX dan ΔY dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Fungsi Keanggotaan Variabel Input ΔX dan ΔY

Fungsi Keanggotaan	Bentuk Fungsi	Nilai ΔX				Nilai ΔY			
		α	β	γ	λ	α	β	γ	λ
Sangat Kencang+	SK+	Trapesium	100	150	180	180	60	80	100
Kencang+	K+	Segitiga	50	100	150	-	40	60	80
Menengah+	M+	Segitiga	25	50	100	-	20	40	60
Pelan+	P+	Segitiga	10	25	50	-	6	20	40
Sangat Pelan+	SP+	Segitiga	0	10	25	-	0	6	20
Diam	D	Segitiga	-10	0	10	-	-6	0	6
Sangat Pelan-	SP-	Segitiga	-25	-10	0	-	-20	-6	0
Pelan-	P-	Segitiga	-50	-25	-10	-	-40	-20	-6
Menengah-	M-	Segitiga	-100	-50	-25	-	-60	-40	-20
Kencang-	K-	Segitiga	-180	-100	-50	-	-80	-60	-40
Sangat Kencang-	SK-	Trapesium	-180	-180	-150	-100	-100	-100	-60

Variabel input dari fuzzy akan menghasilkan 1 nilai output berupa nilai sudut yang akan diterima oleh motor servo. Variabel output sudut memiliki fungsi keanggotaan seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Fungsi Keanggotaan Variabel Output Sudut X dan Y

Fungsi Keanggotaan	Bentuk Fungsi	Nilai Sudut X				Nilai Sudut Y			
		α	β	γ	λ	α	β	γ	λ
Sangat Jauh +	SJ+	Trapesium	400	500	600	600	200	250	300
Jauh+	J+	Segitiga	300	400	500	-	150	200	250
Menengah+	M+	Segitiga	200	300	400	-	100	150	200
Dekat +	D+	Segitiga	100	200	300	-	50	100	150
Sangat Dekat+	SD+	Segitiga	0	100	200	-	0	50	100
Seimbang	S	Segitiga	-75	0	100	-	-50	0	50
Sangat Dekat-	SD-	Segitiga	-150	-75	0	-	-100	-50	0
Dekat-	D-	Segitiga	-225	-150	-75	-	-150	-100	-50
Menengah-	M-	Segitiga	-300	-225	-150	-	-200	-150	-100
Jauh-	J-	Segitiga	-375	-300	-225	-	-250	-200	-150
Sangat Jauh-	SJ-	Trapesium	-450	-450	-375	-300	-300	-300	-250

Tabel 5. dan tabel 6. menunjukkan aturan fuzzy yang digunakan untuk menjalankan pengontrol fuzzy. Baris pertama menunjukkan variabel input X (pada tabel 5) dan variabel input Y (pada tabel 6), sementara kolom pertama menunjukkan variabel input ΔX (pada tabel 5) dan variabel input ΔY (pada tabel 6). Tabel menunjukkan nilai output yang diberikan ketika terdapat variabel input tertentu.

Tabel 5. Aturan Fuzzy Variabel X

X/ ΔX	SJ+	J+	M+	D+	SD+	S	SD-	D-	M-	J-	SJ-
SK+	SJ+	SJ+	J+	J+	M+	M+	D+	D+	SD+	SD+	S

X/ ΔX	SJ+	J+	M+	D+	SD+	S	SD-	D-	M-	J-	SJ-
K+	SJ+	J+	J+	M+	M+	D+	D+	SD+	SD+	S	SD-
M+	SJ+	J+	M+	M+	D+	D+	SD+	SD+	S	SD-	D-
P+	SJ+	J+	M+	D+	D+	SD+	SD+	S	SD-	D-	M-
SP+	SJ+	J+	M+	D+	SD+	SD+	S	SD-	D-	M-	J-
D	SJ+	J+	M+	D+	SD+	S	SD-	D-	M-	J-	SJ-
SP-	J+	M+	D+	SD+	S	SD-	SD-	D-	M-	J-	SJ-
P-	M+	D+	SD+	S	SD-	SD-	D-	D-	M-	J-	SJ-
M-	D+	SD+	S	SD-	SD-	D-	D-	M-	M-	J-	SJ-
K-	SD+	S	SD-	SD-	D-	D-	M-	M-	J-	J-	SJ-
SK-	S	SD-	SD-	D-	D-	M-	M-	J-	J-	SJ-	SJ-

Tabel 6. Aturan Fuzzy Variabel Y

X/ ΔX	SJ+	J+	M+	D+	SD+	S	SD-	D-	M-	J-	SJ-
SK+	SJ-	SJ-	J-	J-	M-	M-	D-	D-	SD-	SD-	S
K+	SJ-	J-	J-	M-	M-	D-	D-	SD-	SD-	S	SD+
M+	SJ-	J-	M-	M-	D-	D-	SD-	SD-	S	SD+	D+
P+	SJ-	J-	M-	D-	D-	SD-	SD-	SD-	SD+	D+	M+
SP+	SJ-	J-	M-	D-	SD-	SD-	S	SD+	D+	M+	J+
D	SJ-	J-	M-	D-	SD-	S	SD+	D+	M+	J+	SJ+
SP-	J-	M-	D-	SD-	S	SD+	SD+	D+	M+	J+	SJ+
P-	M-	D-	SD-	S	SD+	SD+	D+	D+	M+	J+	SJ+
M-	D-	SD-	S	SD+	SD+	D+	D+	M+	M+	J+	SJ+
K-	SD-	S	SD+	SD+	D+	D+	M+	M+	J+	J+	SJ+
SK-	S	SD+	SD+	D+	D+	M+	M-	J+	J+	SJ+	SJ+

2.4 Pengujian Sistem

1. Pengujian Ketepatan Posisi Bola

Ball Balancing Table harus memiliki kemampuan menyeimbangkan/menempatkan posisi bola pada titik yang ditentukan dengan tepat. Ketepatan posisi bola ditentukan dari kesesuaian antara posisi target dengan hasil akhir dari proses penempatan bola. Untuk mengetahui kemampuan Ball Balancing Table dalam menempatkan bola pada titik yang ditentukan, dilakukan percobaan sebanyak 20 kali.

2. Pengujian Waktu Respons Penyeimbangan Posisi Bola

Waktu respons penempatan bola pada posisi target menjadi salah satu target dari penelitian ini, selain posisi bola yang tepat, waktu respons yang singkat merupakan hal yang penting. Waktu respons dihitung ketika motor servo mulai bergerak hingga posisi bola seimbang berada pada posisi target. Untuk mengetahui kecepatan Ball Balancing Table dalam menempatkan bola, dilakukan percobaan sebanyak 20 kali.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Implementasi Perancangan

Implementasi sistem *Ball Balancing Table* sesuai dengan perancangan yang telah dilakukan, dapat dilihat pada Gambar. 10.



Gambar. 10. Implementasi Perancangan Mekanik

3.2 Hasil Pengujian

1. Pengujian Ketepatan Posisi Bola

Pengujian ketepatan posisi bola terhadap posisi target yang ditentukan. Posisi target ditentukan pada sumbu X dan Y masing-masing adalah 648 px, dan 362 px. Pengujian dilakukan sebanyak 20 kali percobaan dengan 4 lokasi titik awal bola. Lokasi 1 memiliki nilai X (250-350), dan Y (150-250). Lokasi 2 memiliki nilai X (950-1050) dan Y (150-250). Lokasi 3 memiliki nilai X (250-350) dan Y (500-600). Lokasi 4 memiliki nilai X (950-1050) dan Y (500-600). Tabel 7-10. menunjukkan hasil pengujian ketepatan posisi bola dari lokasi 1 sampai lokasi 4.

Tabel 7. Hasil Pengujian Penempatan Posisi Bola Lokasi 1

Percobaan	Posisi Target		Posisi Awal		Kesalahan	
	X(px)	Y(px)	X(px)	Y(px)	X	Y
	1	648	362	625	363	3.55%
2			601	341	7.25%	5.80%
3			601	324	7.25%	10.50%
4			606	389	6.48%	7.46%

Rata-Rata Kesalahan	5.90%	5.80%
---------------------	-------	-------

Tabel 8. Hasil Pengujian Penempatan Posisi Bola Lokasi 2

Percobaan	Posisi Target		Posisi Awal		Kesalahan	
	X(px)	Y(px)	X(px)	Y(px)	X	Y
1			591	400	8.80%	10.50%
2			608	405	6.17%	11.88%
3	648	362	644	415	0.62%	14.64%
4			615	404	5.09%	11.60%
5			604	363	6.79%	0.28%
Rata-Rata Kesalahan				5.49%	9.78%	

Tabel 9. Hasil Pengujian Penempatan Posisi Bola Lokasi 3

Percobaan	Posisi Target		Posisi Awal		Kesalahan	
	X(px)	Y(px)	X(px)	Y(px)	X	Y
1			600	405	7.41%	11.88%
2	648	362	589	401	9.10%	10.77%
3			604	434	6.79%	19.89%

4	599	409	7.56%	12.98%
5	622	430	4.01%	18.78%
Rata-Rata Kesalahan		6.98%	14.86%	

Tabel 10. Hasil Pengujian Penempatan Posisi Bola Lokasi 4

Percobaan	Posisi Target		Posisi Awal		Kesalahan	
	X(px)	Y(px)	X(px)	Y(px)	X	Y
1			602	361	7.10%	0.28%
2			602	389	7.10%	7.46%
3	648	362	580	357	10,49%	1.38%
4			608	387	6.17%	6.91%
5			616	411	4.94%	13.54%
Rata-Rata Kesalahan				7.16%	5.91%	

Rata-rata kesalahan pada setiap lokasi secara umum tidak memiliki nilai yang signifikan, pada sumbu X rata-rata kesalahan setiap lokasi ada pada kisaran (5.80 – 14.86 %) sedangkan pada sumbu Y (5.49 – 7.16 %). Nilai kesalahan yang bervariasi dipengaruhi oleh getaran pada konstruksi mekanik yang kurang kokoh terutama ketika bola mendekati titik tujuan. Secara keseluruhan rata-rata kesalahan sumbu X dan sumbu Y berturut-turut adalah 6.38 % dan 9.09 %. Konversi nilai kesalahan dalam satuan mm diperoleh nilai kesalahan pada sumbu X adalah 17.30 mm dan pada sumbu Y 14.55 mm. Sementara itu nilai persentase ketepatan posisi bola pada sumbu X sebesar 93.63% dan pada sumbu Y sebesar 90.41%.

3. Pengujian Waktu Respons Penempatan Posisi Bola

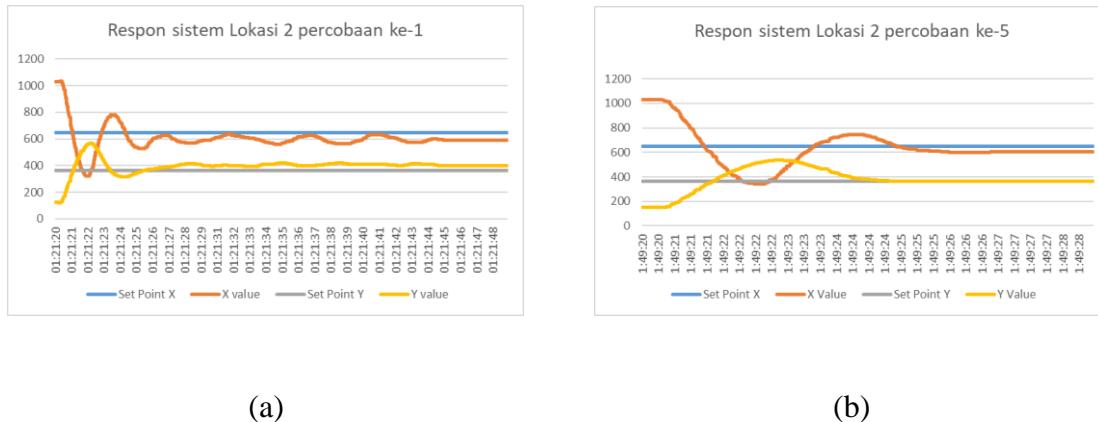
Titik posisi target yang ditentukan pada sumbu X dan Y masing-masing adalah 649 px dan 343 px. Pengujian dilakukan sebanyak 20 kali percobaan dari 4 lokasi titik awal yang berbeda seperti pada pengujian ketepatan posisi bola. Tabel 11. menunjukkan hasil pengujian waktu respons penempatan posisi bola dari lokasi 1 sampai lokasi 4.

Tabel 11. Hasil Pengujian Waktu Respons Penempatan Posisi Bola

Percobaan	Lokasi			
	1	2	3	4
1	7 detik	26.3 detik	19 detik	26.1 detik
2	8.8 detik	20 detik	12.2 detik	9.1 detik
3	15.5 detik	21 detik	8,9 detik	17,6 detik
4	9.7 detik	10.7 detik	16.1 detik	10.6 detik
5	13 detik	6.1 detik	13.6 detik	10.3 detik
Rata-rata	10.8 detik	16.82 detik	13.96 detik	14.74 detik

Berdasarkan Tabel 11, rata-rata waktu tercepat adalah 10.8 detik pada lokasi 1 dan terlama 16.82 detik pada lokasi 2. Meskipun terdapat perbedaan 6 detik pada rata-rata waktu di lokasi 1 dan 2 jika melihat data tunggal pada masing-masing lokasi terdapat juga perbedaan nilai yang signifikan meskipun menggunakan titik awal yang sama. Hal ini berarti bahwa titik awal berpengaruh pada waktu respons tetapi yang lebih berpengaruh adalah getaran pada konstruksi mekanik yang kurang kokoh sehingga membuat penempatan posisi bola terganggu. Bukti yang menunjukkan getaran pada konstruksi mekanik berpengaruh pada waktu penempatan posisi bola, dapat dilihat pada Gambar. 11. dilakukan proses perbandingan 2 data waktu respons pada lokasi yang sama, pengujian di lokasi 2, pada percobaan ke 1 (26.3 detik) dan percobaan ke 5 (6.1 detik). Gambar. 11(a) menunjukkan data pergerakan bola pada percobaan ke 1, pada visualisasi tersebut terdapat osilasi yang disebabkan ketika bola sudah mulai mendekati titik tujuan. Osilasi ini menyebabkan waktu bola untuk mencapai posisi tujuan menjadi lebih lama yaitu 26.3 detik. Meskipun kedua percobaan ini memiliki titik awal yang sama yaitu pada lokasi 2. Sementara itu pada Gambar.

11(b) tidak terdapat osilasi yang disebabkan oleh getaran sehingga waktu yang diperlukan untuk membuat bola menuju titik tujuan lebih cepat yaitu 6.1 detik.



Gambar 11. Data Pergerakan Bola

3.3 Pembahasan

Fuzzy Logic Controller (FLC) digunakan untuk memutuskan dan mengatur besar sudut kemiringan pelat berdasarkan *error* posisi bola terhadap titik referensi. *Input fuzzy* berupa *error* dan *delta error*, sedangkan *output* berupa *sudut* aktuator. FLC mampu menangani karakteristik sistem yang non-linier dan tidak pasti. Hasil pengujian menunjukkan bahwa FLC mampu mengatur posisi bola dengan rerata kesalahan hanya 6.38% (~17.30 mm) pada sumbu X dan 9.09% (~14.55 mm) pada sumbu Y. Respons waktu penyeimbangan posisi bola pun relatif singkat, waktu tercepat 10.8 detik dan terlama16.82 detik. Hal ini menunjukkan bahwa *fuzzy logic* cukup efektif dalam merespons dinamika bola.

4. Kesimpulan dan Saran

Kendali Fuzzy Logic dan struktur mekanik Ball Joint berhasil diimplementasikan pada sistem Ball Balancing Table (BBT), memungkinkan pelat bergerak pada dua sumbu secara simultan dengan satu titik pivot. Fuzzy Logic Controller efektif mengatur kemiringan pelat untuk menjaga posisi bola, dengan akurasi di atas 90% dan waktu respons antara 10,8–16,82 detik. Namun, sistem memiliki kendala seperti kemiringan pelat akibat rod servo yang longgar dan getaran dari braket servo yang kurang kokoh, yang menyebabkan osilasi saat bola mendekati target. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan agar konstruksi mekanik diperkuat dan sistem pendekripsi posisi bola ditingkatkan.

Referensi

- [1] M. M. Kopichev, A. V. Putov, and A. N. Pashenko, "Ball on the plate balancing control system," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 638, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/638/1/012004.
- [2] M. Hamdoun, M. Ben Abdallah, M. Ayadi, F. Rotella, and I. Zambettakis, "Functional observer-based feedback controller for ball balancing table," *SN Appl. Sci.*, vol. 3, no. 6, pp. 2–10, 2021, doi: 10.1007/s42452-021-04590-9.
- [3] D. A. Pahlawan, A. S. Wibowo, and E. Susanto, "Realization of Ball on Plate Control using PID Controller and Webcam," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1077, no. 1, p. 012056, 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1077/1/012056.
- [4] H. Khoirunnisa, F. Suryatini, A. S. Sunarya, A. F. Rifai, A. Mulyadewi, and S. D. Prasenda, "Rancang Bangun Fuzzy-PID Controller pada Ball Balancing Table dengan Universal Joint berbasis NI MyRIO dan LabVIEW," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 11, no. 4, p. 1089, 2023, doi: 10.26760/elkomika.v11i4.1089.
- [5] J. M. Belman-Flores, D. A. Rodríguez-Valderrama, S. Ledesma, J. J. García-Pabón, D. Hernández, and D. M. Pardo-Cely, "A Review on Applications of Fuzzy Logic Control for Refrigeration Systems," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 3, 2022, doi: 10.3390/app12031302.
- [6] N. S. Abdul Aziz, M. Hezri Fazalul Rahiman, N. Ishak, R. Adnan, and M. Tajjudin, "Design of Fuzzy PID Controller with Reference Model for Ball and Beam Mechanism," *2019 IEEE Int. Conf. Autom. Control Intell. Syst. I2CACIS 2019 - Proc.*, no. June, pp. 194–198, 2019, doi: 10.1109/I2CACIS.2019.8825012.
- [7] A. Miron, A. C. Cziker, and H. G. Beleiu, "Fuzzy Control Systems for Power Quality Improvement—A Systematic Review Exploring Their Efficacy and Efficiency," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 11, 2024, doi: 10.3390/app14114468.
- [8] R. Saatchi, "Fuzzy Logic Concepts, Developments and Implementation," *Inf.*, vol. 15, no. 10, pp. 0–24, 2024, doi: 10.3390/info15100656.
- [9] J. Guo, J. H. Low, J. Liu, Y. Li, Z. Liu, and C. H. Yeow, "Three-Dimensional Printable Ball Joints with Variable Stiffness for Robotic Applications Based on Soft Pneumatic Elastomer Actuators," *Polymers (Basel.)*, vol. 14, no. 17, 2022, doi: 10.3390/polym14173542.
- [10] F. I. R. Betancourt, S. M. B. Alarcon, and L. F. A. Velasquez, "Fuzzy and PID controllers applied to ball and plate system," *4th IEEE Colomb. Conf. Autom. Control Autom. Control as Key Support Ind. Product. CCAC 2019 - Proc.*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/CCAC.2019.8921113.
- [11] F. Kose, K. Kaplan, and H. M. Ertunc, "Real time position and trajectory control of ball and plate system using different control techniques," *2018 6th Int. Conf. Control Eng. Inf. Technol. CEIT 2018*, no. October, pp. 25–27, 2018, doi: 10.1109/CEIT.2018.8751946.
- [12] K. Zarzycki and M. Ławryńczuk, "Fast real-time model predictive control for a ball-on-plate process," *Sensors*, vol. 21, no. 12, 2021, doi: 10.3390/s21123959.