

PERANCANGAN KENDALI PADA BOLA DI ATAS BIDANG DATAR *BALL ON PLATE CONTROL DESIGN*

Dahnur Agus Pahlawan¹, Agung Surya Wibowo, S.T., M.T.², Dr.Erwin Susanto S.T, M.T.³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹dahnuraguspahlawan@student.telkomuniversity.ac.id, ²agungsw@telkomuniversity.ac.id

³erwinelektro@telkomuniversity.ac.id

ABSTRAK

Alat peraga yang ada di laboratorium sistem kendali dasar memiliki harga sekitar 300 juta rupiah dan hanya ada 1 unit menyebabkan proses praktikum tidak bisa kondusif. Ketersediaan alat peraga merupakan hal yang sangat penting bagi sebuah laboratorium untuk mendukung mahasiswa mengerti metode yang dipelajari saat kelas.

Penelitian ini bertujuan untuk mengaplikasikan metode *fuzzy logic* pada sistem mekanik *ball on plate*. Metode *fuzzy* digunakan agar sistem *ball on plate* menjadi stabil. Alat peraga *ball on plate* akan mengatur posisi atau letak bola pada koordinat yang diinginkan pada bidang datar. Posisi didapatkan dengan mengatur koordinat dalam bentuk X piksel dan Y piksel sebagai *set point*. Input yang digunakan berupa koordinat yang didapat dari *webcam* melalui metode *image processing* dan dikirimkan secara *serial* ke mikrokontroler. Kemudian output dari mikrokontroler akan masuk ke dalam aktuator yaitu motor servo. Output target diset berdasarkan *set point* yang diinginkan.

Dari hasil percobaan dan implementasi alat yang dibuat, *ball on plate* sudah bisa menggerakkan bola pada *set point* yang diinginkan. Respon saat *set point* 250 memiliki *error* 2,69% pada sumbu x dan *error* 3,44% pada sumbu Y. Hasil respon pada koordinat X dan Y dapat dilihat secara *real time* pada *interface* di MATLAB.

Kata Kunci: *Ball on Plate, Fuzzy Logic, Webcam, Motor servo*

ABSTRACT

Props in the basic control system laboratory worth around 300 million rupiah and there is only 1 unit makes the practicum process not conducive. The availability of the props is very important for a laboratory to support students in understanding the methods learned during class.

The purpose of the research is to apply fuzzy method on ball on plate mechanical system. Fuzzy method is used to stabilize the ball on plate system. The ball on plate props adjust the position or location of the ball at the desired coordinates on a flat plane. The position is obtained by setting the coordinates in the form of X pixels and Y pixels as set points. The inputs are the form of coordinates obtained from the webcam through image processing methods and sent serially to the microcontroller. The target output is set based on the desired set point.

From the results of the experiment and the implementation of the tools made, ball on plate can move the ball at the desired set point. The response when set point 250 has 2.69% error on the X-axis and 3.44% error on the Y-axis. The response results on the X and Y coordinates can be seen in real time on the interface in MATLAB.

Keywords: *Ball on Plate, Fuzzy Logic, Webcam, Servo Motors*

1. Pendahuluan

Perkembangan sistem kendali saat ini banyak mengalami kemajuan. Salah satu metode yang sering digunakan dalam sistem kendali adalah pengendali *fuzzy*. Pengendali *fuzzy* menggunakan deskripsi linguistik untuk menentukan hubungan antara informasi input dan output tindakan. Pengaplikasian metode pengendali *fuzzy* dapat membantu mahasiswa untuk memahami materi yang didapatkan di kelas.

Akan tetapi, alat peraga yang ada di laboratorium sistem kendali dasar memiliki harga sekitar 300 juta dan hanya ada 1 unit. Satu alat peraga digunakan oleh 12 praktikan sehingga menyebabkan proses praktikum tidak kondusif. Maka dari itu, dibutuhkan alat peraga tambahan. Namun dengan harga yang mahal, dibutuhkan 3 sampai 5 tahun untuk merealisasikan alat peraga tersebut. Karena permasalahan tersebut, tercipta ide untuk membuat alat perancang sistem kendali yang digunakan untuk proses pembelajaran dan keperluan alat peraga yang ada di lab.

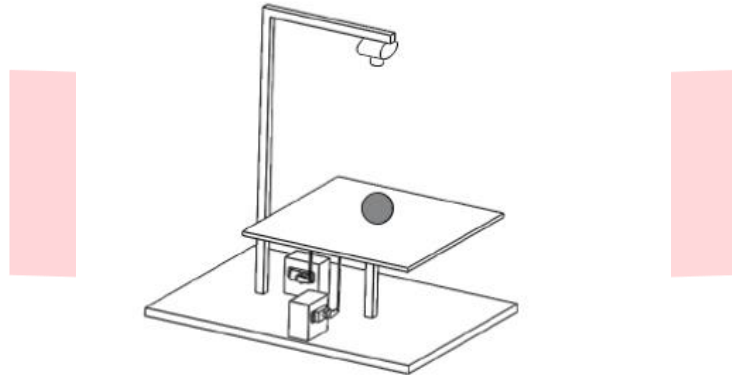
Sistem kendali adalah sistem untuk mengendalikan, mengatur, dan memerintah keadaan dari suatu sistem. Pada tugas akhir ini akan dirancang dan membuat suatu sistem kendali *Ball on Plate*. *Ball on Plate* merupakan sebuah alat yang mengatur posisi sebuah bola agar selalu berada di titik tertentu dan stabil. Sistem kendali yang dirancang berupa kendali

loop tertutup ada *feedback* (Umpan Balik) yang berfungsi sebagai pemberi informasi kepada sistem apakah output sesuai dengan yang kita inginkan.

2. Dasar Teori

2.1 Ball on Plate

Sistem *Ball on Plate* adalah sistem mekanis yang di atas bidang datar diletakkan sebuah bola yang dapat bergerak bebas dan dapat mengalami gangguan dari lingkungan sekitar misalnya angin atau guncangan. *Ball on Plate* digunakan untuk mempelajari teori kendali yang sederhana maupun kendali modern.

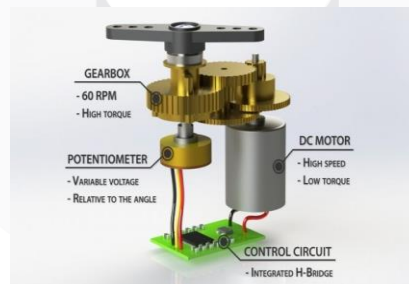


Sistem *Ball on Plate* menggunakan kamera sebagai sensor untuk mengetahui posisi bola yang dibaca oleh kamera akan diolah menggunakan proses pengolahan citra, data atau posisi bola kemudian hasilnya akan diteruskan ke pengendali. Data yang dikirimkan ke dalam pengendali akan diproses dan data tersebut akan menggerakkan motor servo menggunakan metode *fuzzy logic* sehingga posisi bola berada pada titik tengah atau *set point* yang diinginkan.

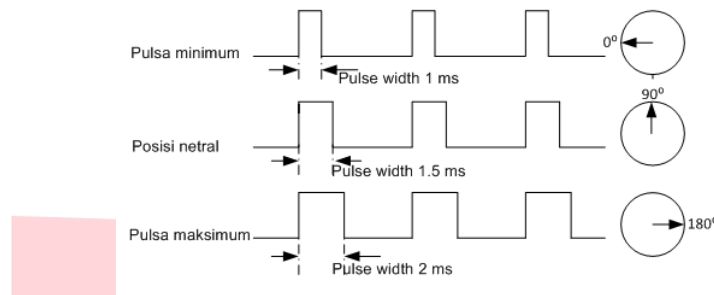
2.2 Motor Servo

Motor servo adalah sebuah aktuator yang dirancang dengan sistem kendali loop tertutup, sehingga dapat diatur untuk menentukan posisi sudut dari poros output motor. Motor servo merupakan perangkat yang terdiri dari :

1. Motor DC.
2. Serangkaian *gear*.
3. Rangkaian kendali.
4. Potensiometer.



Motor servo dikendalikan dengan memberikan sinyal modulasi lebar pulsa (PWM), lebar pulsa sinyal kendali yang diberikan akan menentukan posisi sudut putaran dari poros motor servo. Sebagai contoh, lebar pulsa dengan waktu 1,5 ms akan memutar poros motor servo ke posisi sudut 90° . Bila pulsa kurang dari 1,5 ms maka akan berputar ke arah posisi 0° atau berlawanan dengan arah jarum jam, sedangkan bila pulsa yang diberikan lebih dari 1,5 ms maka poros motor servo akan berputar ke arah posisi 180° atau searah jarum jam. Lebih jelasnya perhatikan gambar dibawah ini.



Jika ada gangguan yang mencoba memutar atau mengubah posisi tersebut, maka motor servo akan mencoba menahan atau melawan dengan besarnya kekuatan torsi yang dimilikinya, namun motor servo tidak akan mempertahankan posisinya untuk selamanya.

2.3 MATLAB (*Matrix Laboratory*)

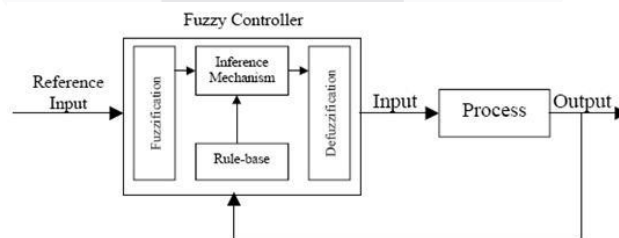
MATLAB merupakan bahasa pemrograman yang memiliki kemampuan mengintegrasikan komputasi, visualisasi, dan pemrograman. MATLAB banyak digunakan dalam :

- Pengembangan algoritma matematika dan komputasi
- Pemodelan, simulasi, dan pembuatan prototype dari penerimaan data
- Analisa, eksplorasi, dan visualisasi data
- *Scientific* dan *engineering*
- Pengembangan aplikasi berbasis grafik

MATLAB memiliki beberapa *toolbox* yang dapat digunakan untuk merangkai sistem dinamis. Pada tugas akhir ini *toolbox* yang digunakan adalah *Fuzzy Logic Designer*, *Image Acquisition*, *Image Processing*. *Fuzzy Logic Designer* digunakan untuk merancang logika *fuzzy* di MATLAB. *Image Acquisition* menyediakan fungsi dan blok untuk menghubungkan kamera dan sensor lidar ke MATLAB dan Simulink. *Image Processing* menyediakan seperangkat lengkap algoritma dan *workflow apps* untuk pemrosesan gambar, analisis, visualisasi, dan pengembangan algoritma.

2.4 Fuzzy Logic Controller

Fuzzy logic diusulkan oleh Lotfy Zadeh pada tahun 1965, kendali logika *fuzzy* biasanya digunakan banyak pada produk seperti mesin cuci, kamera video, pada proses industri seperti robot, pabrik semen dan kereta api bawah tanah, istilah "*Fuzzy*" mengacu pada input yang tidak jelas, jika biasanya input persamaan matematika yang kompleks *Fuzzy* menggunakan deskripsi linguistik untuk menentukan hubungan antara informasi input dan output tindakan.



Dari uraian blok di atas dapat dipahami Suatu sistem berbasis aturan *fuzzy* yang lengkap terdiri dari tiga komponen utama yaitu : *Fuzzyfication*, *Inference* dan *Defuzzification*.

1. *Fuzzyfication*

Nilai input yang nilai kebenarannya bersifat pasti dikonversi ke bentuk *fuzzy* yang berupa nilai linguistik yang ditentukan berdasarkan fungsi keanggotaan.

2. Inference

Suatu aturan *fuzzy* dituliskan sebagai: IF *antecedent* THEN *consequent*. Dalam suatu sistem berbasis aturan fuzzy, proses *inference* memperhitungkan semua aturan yang ada dalam basis pengetahuan. Hasil dari proses *inference* direpresentasikan oleh suatu *fuzzy set* untuk setiap variabel bebas (pada *consequent*). Derajat keanggotaan untuk setiap nilai variabel tidak bebas menyatakan ukuran komparabilitas terhadap variabel bebas (pada *antecedent*).

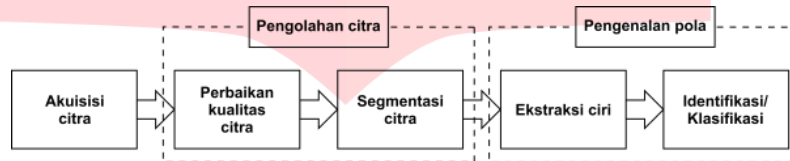
3. Defuzzyfication

Metode *defuzzyfication* adalah proses pengubah data-data *Fuzzy* menjadi data numerik yang paling sesuai dari nilai-nilai yang telah disimpulkan dari variable output linguistik.

2.5 Pengolahan Citra

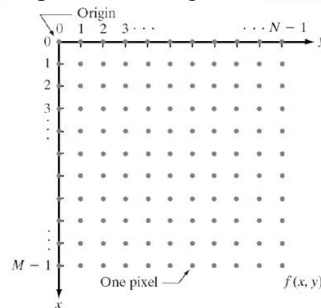
Pengolahan citra adalah proses pengolahan sinyal yang inputnya adalah citra. Outputnya dapat berupa citra atau sekumpulan karakteristik atau parameter yang berhubungan dengan citra. Istilah pengolahan citra digital secara umum didefinisikan sebagai pemrosesan citra dua dimensi dengan barisan bilangan nyata maupun kompleks yang diwakili oleh bit-bit tertentu, citra digital dibentuk oleh kumpulan titik yang dinamakan piksel.

Piksel merupakan bagian terkecil pada suatu gambar digital. Monitor menampilkan gambar dengan membagi-bagi layar menjadi ribuan (bahkan jutaan) piksel-piksel. Piksel-piksel ini sangat dekat satu sama lain sehingga tampak seperti terhubung satu sama lain. Jumlah bit yang digunakan untuk mewakili tiap piksel menentukan berapa banyak warna yang dapat ditampilkan pixel tersebut, ini biasa disebut sebagai *color depth*.



Gambar di atas merupakan proses pengolahan citra. Proses pengolahan citra dimulai dengan mengakuisisi citra menggunakan *webcam* lalu kualitas citra diperbaiki dan citra akan disegmentasi. Segmentasi citra yang digunakan adalah *thresholding* RGB dengan batasan 255 untuk setiap warna. Proses selanjutnya adalah mengekstraksi ciri menjadi warna putih. Setelah itu, bola akan teridentifikasi.

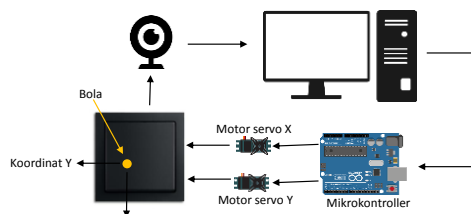
Thresholding merupakan salah satu metode *image processing* yang dapat digunakan untuk mendeteksi garis dan lingkaran pada suatu citra digital. *Thresholding* bekerja dengan cara mencari hubungan ketetanggaan antar piksel menggunakan persamaan garis lurus untuk mendeteksi garis dan persamaan lingkaran untuk mendeteksi lingkaran.



Setelah proses pengolahan citra, maka koordinat bola dapat diketahui dari letak pixel yang didapatkan seperti yang dapat dilihat pada gambar di atas.

3. Perancangan Sistem

3.1 Desain Sistem



Gambar di atas menunjukkan alur proses kerja keseluruhan. Proses ini menggunakan pemrograman menggunakan PC. Nantinya hasil dari pemrograman tersebut akan diolah dan akan dikirimkan secara serial kedalam mikrokontroler yaitu Arduino. Mikrokontroler Arduino kemudian akan menggerakkan motor servo, dan motor servo akan mengubah kemiringan *Plate* sehingga bola akan bergerak menuju posisi yang diinginkan. Posisi bola akan terus ditangkap oleh kamera untuk

menentukan apakah posisi bola sudah sesuai dengan yang kita inginkan.

Spesifikasi alat yang akan dirancang untuk tugas akhir ini adalah

- *Plate* berukuran 45 cm².
- *Webcam* dapat mengambil gambar dalam kualitas tinggi 720P.
- Mikrokontroler yang dapat mengendalikan komponen motor servo.
- Motor servo yang dapat bergerak 180 derajat.

3.2 Desain Perangkat Keras

Logitech C270 HD Webcam

Webcam berfungsi sebagai sensor yang digunakan untuk mendeteksi koordinat X dan Y pada bola, arah pergerakan bola akan di baca sebagai input. Untuk spesifikasi Logitech C270 HD *Webcam* dapat dilihat pada gambar dan tabel di bawah ini.



Resolusi Maks	720P/30fps
Port	USB
Jenis Fokus	Fixed focus
Teknologi lensa	Standar
Panjang kabel	1,5 m

Personal Computer

Personal Computer digunakan untuk mengolah data input dan menghasilkan output berupa data/informasi sesuai perintah dari pengguna. *Personal Computer* digunakan untuk menjalankan *software* MATLAB yang berfungsi untuk mengelola data *image processing* dan *fuzzy logic controller* yang akan dikirim ke Arduino UNO. Untuk spesifikasi dapat dilihat pada gambar dan tabel di bawah ini.



Spesifikasi	Personal Computer
Model Prosesor	Core i7
Model GPU	NVIDIA® GeForce GT760
RAM	8GB
Input tegangan	220Volt
HDD	1 TB
Konektifitas	HDMI , USB2.0 , USB3.0
OS	Windows 10

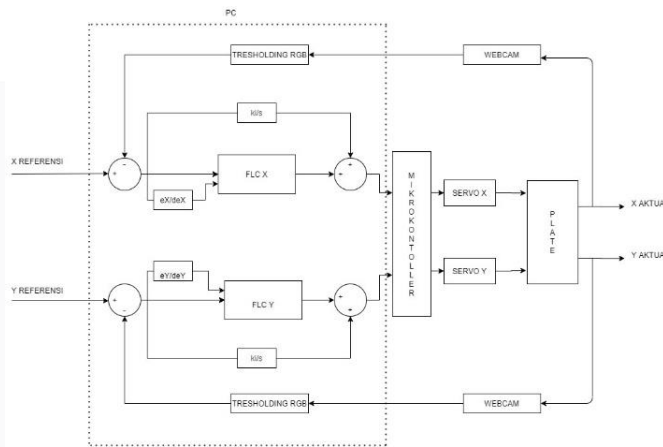
Arduino UNO

Arduino UNO berfungsi sebagai pengendali yang akan melakukan proses kalkulasi informasi yang dikirimkan oleh *webcam*. Arduino mempunyai PIN digital dan analog yang akan digunakan sebagai tempat menghubungkan antara Arduino dengan komponen elektronik lainnya. Untuk spesifikasi komponen dapat dilihat pada gambar dan tabel di bawah ini.



Tegangan operasional	4.8 V – 7.2 V
Kecepatan	0.20sec / 60 sudut(4.8V)
Torsi	10 kg.cm
Berat	55 gram
Dimensi <i>body</i>	40.7 x 19.7 x 42.9 mm
Dimensi <i>shaft</i>	P 0.4 cm x D 0.4 cm

3.3 Diagram Blok

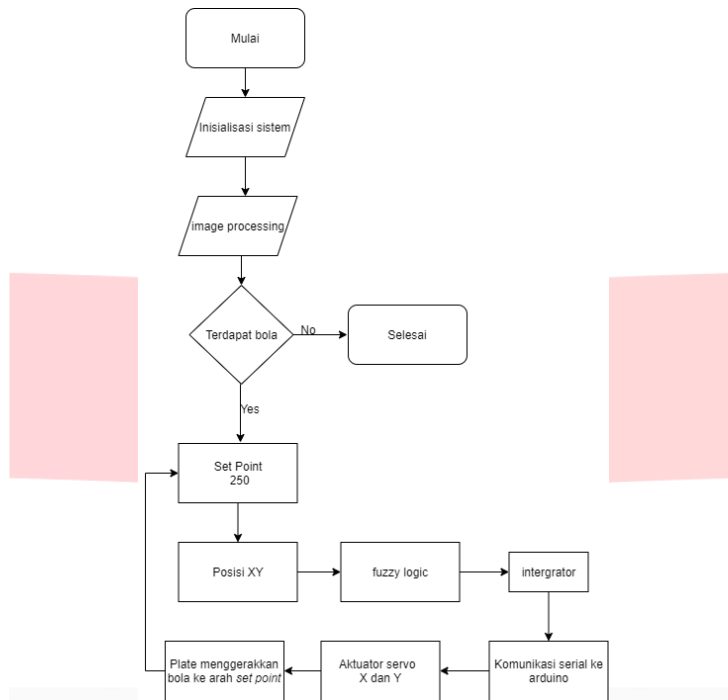


Koordinat X Y referensi adalah koordinat yang diinginkan pada bidang datar dan merupakan input dari sistem, posisi didapatkan dari webcam melalui metode *image processing* kemudian akan diproses sesuai dengan hasil metode kendali dari *fuzzy logic* dan dikirimkan secara *serial* ke dalam mikrokontroler, kemudian output dari mikrokontroler akan masuk ke dalam aktuator yaitu motor servo.

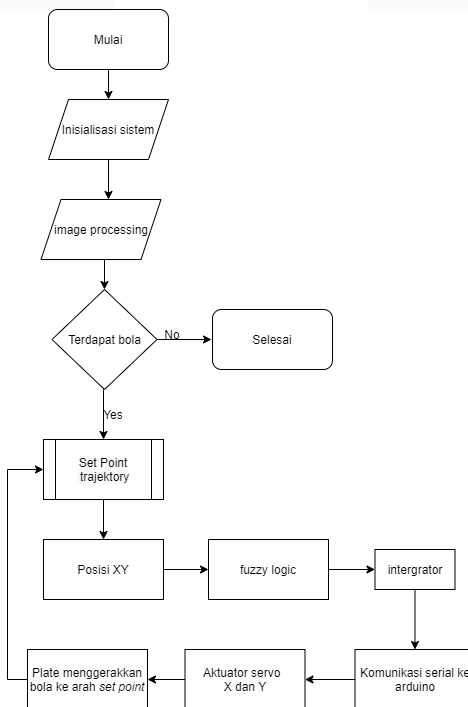
Motor Servo yang digunakan berjumlah dua untuk menggerakkan bola pada posisi pada bidang X dan posisi pada bidang Y. Motor servo ini diletakan di bawah bidang datar. Motor servo menggerakkan bola pada bidang datar (*plate*) dan berfungsi untuk mengatur posisi bola agar seimbang.

Sistem yang akan dibuat adalah rancang bangun sistem perangkat keras yaitu webcam untuk membaca parameter fisik yaitu keberadaan bola, motor servo yang tersambung dengan mikrokontroler untuk mengirim hasil bacaan data koordinat bola.

3.4 Desain Perangkat Lunak

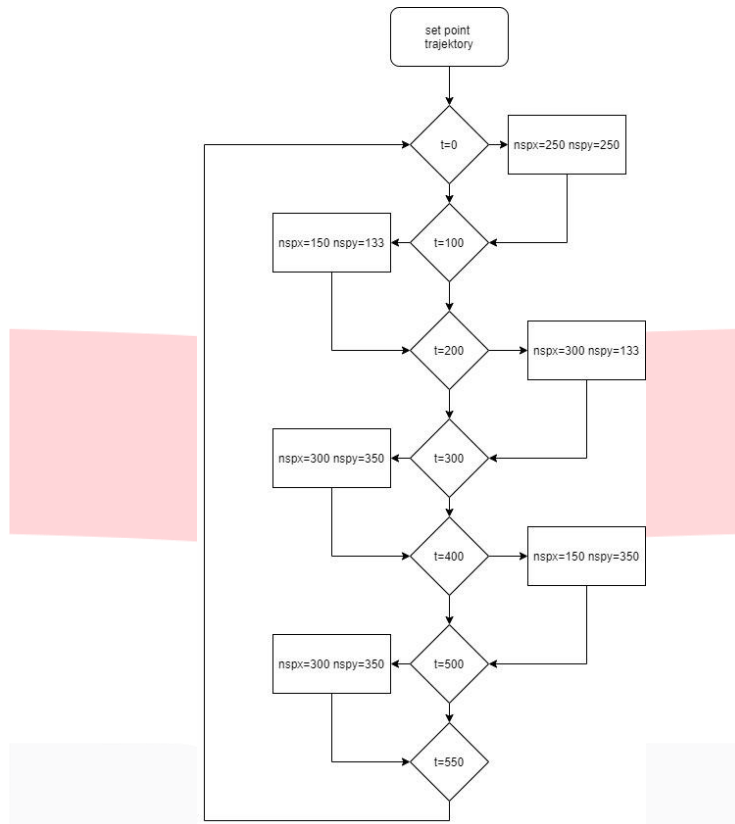


Perancangan Kendali pada Sistem *Ball on Plate* ini dirancang untuk memberikan pengetahuan tentang bagaimana mengimplementasikan metode kendali *Fuzzy Logic*. Output dari sistem ini adalah bola akan berada pada *set point* yang telah diatur oleh pengguna. Koordinat bola diketahui setelah data dari *webcam* di proses oleh metode *image processing* yang selanjutnya data diproses kembali dengan metode *Fuzzy Logic* dan diteruskan ke mikrokontroler dan dikirim ke motor servo.



Output dari sistem ini adalah bola akan berada pada *set point* yang berbeda-beda yang telah ditentukan. Koordinat bola diketahui setelah data dari *webcam* diproses oleh metode *image processing* yang selanjutnya data diproses kembali dengan

metode *Fuzzy Logic* dan diteruskan ke mikrokontroler dan dikirim ke motor servo.

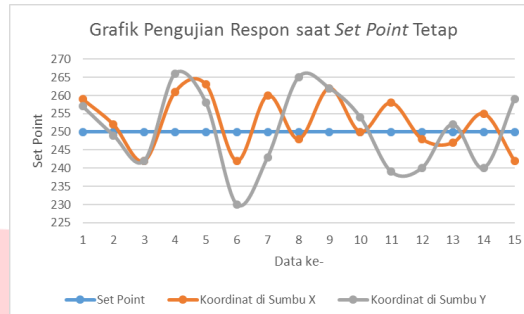


Nilai *set point* akan berubah dengan bertambahnya nilai *t* yang telah diprogramkan. Setelah *t* sama dengan 550, *t* akan bernilai 0 kembali dan pergerakan bola menjadi kotak.

4. Hasil dan Analisis

4.1 Pengujian Respon saat *Set Point* Tetap

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui *error* ketika *set point* tetap. Nilai *set point* yang digunakan adalah 250. Pengujian dilakukan dengan cara bola diletakkan secara acak pada *plate*. Bola akan berhenti pada *set point* yang telah ditentukan. *Error* dihitung dari selisih *set point* dengan koordinat bola yang didapatkan. Grafik pengujian respon saat *set point* tetap dapat dilihat pada gambar dan tabel di bawah ini.

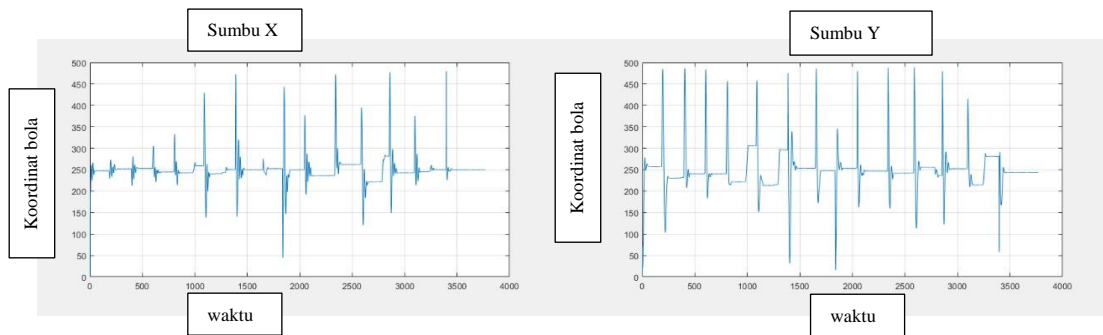


No.	<i>Set Point</i>	Koordinat di Sumbu X	Koordinat di Sumbu Y	<i>Error Sumbu X</i>	<i>Error Sumbu Y</i>	Waktu(s)
1	250	259	257	9	7	100
2	250	252	249	2	1	50
3	250	242	242	8	8	90
4	250	261	266	11	16	130
5	250	263	258	13	8	108
6	250	242	230	8	20	100
7	250	260	243	10	7	100
8	250	248	265	2	15	105
9	250	262	262	12	12	150
10	250	250	254	0	4	50
11	250	258	239	8	11	109
12	250	248	240	2	10	80
13	250	247	252	3	2	65
14	250	255	240	5	10	100
15	250	242	259	8	1	80

Dari hasil pengujian di atas, dapat disimpulkan bahwa sistem mekanik *Ball on Plate* sudah stabil. Pada pengujian respon saat *set point* tetap memiliki rata-rata *error* pada sumbu x sebesar 2,69% dan rata-rata *error* pada sumbu y sebesar 3,44%. Rata-rata waktu yang ditempuh untuk mencapai keadaan *settling time* pada pengujian ini 94,46 detik. Posisi awal bola berpengaruh terhadap hasil yang di dapatkan. Saat posisi bola berada jauh dari *set point* maka persentase *error* akan lebih dari 3,2%. Jika posisi awal bola berada dekat dengan *set point* maka persentase *error* akan kurang dari 3,2%.

4.2 Pengujian Respon saat *Set Point* Tetap (250) diberikan Gangguan

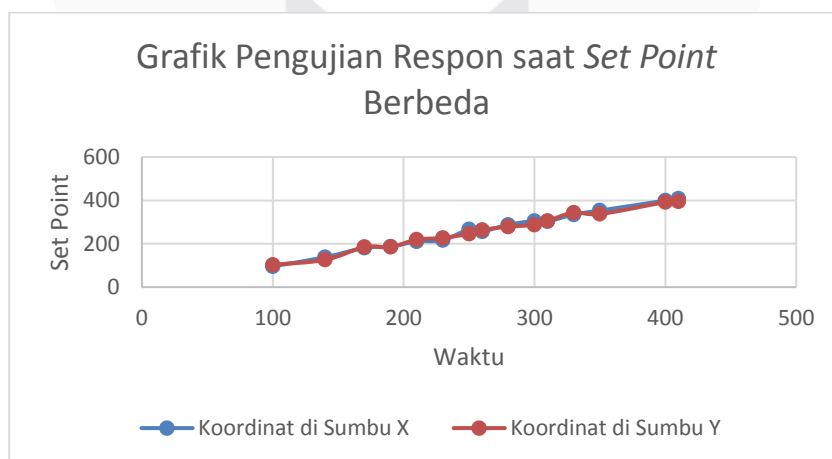
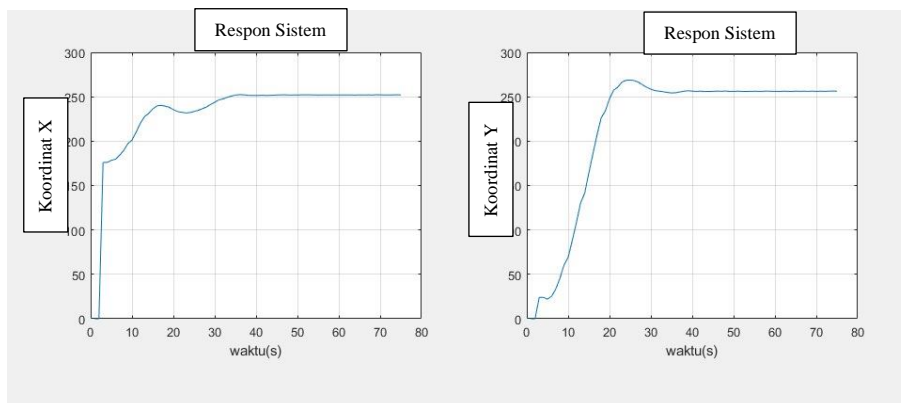
Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui *error* dan *settling time* ketika *set point* tetap dengan cara memberikan gangguan pada bola yang sudah berada pada *set point*. Bola akan diberikan gangguan dengan gaya yang berbeda-beda. *Error* dihitung dari selisih *set point* dan *settling time* didapatkan dengan melihat waktu ketika sistem sudah stabil di koordinat bola yang ditentukan. Grafik dapat dilihat pada gambar dan tabel di bawah ini.



Pada pengujian respon saat *set point* tetap diberikan gangguan memiliki rata-rata error pada sumbu X sebesar 1,84% dan rata-rata error pada sumbu Y sebesar 2,72%. Posisi awal bola mempunyai pengaruh terhadap hasil yang telah di berikan gangguan. Proses komputasi juga berpengaruh terhadap keluaran posisi bola. *Settling time* yang didapatkan pada percobaan ini 90,36 detik. Resolusi servo juga memiliki pengaruh terhadap *error* yang di dapatkan. Semakin kecil resolusinya, maka *error* yang dihasilkan juga kecil.

4.3 Pengujian Respon saat Set Point Berbeda

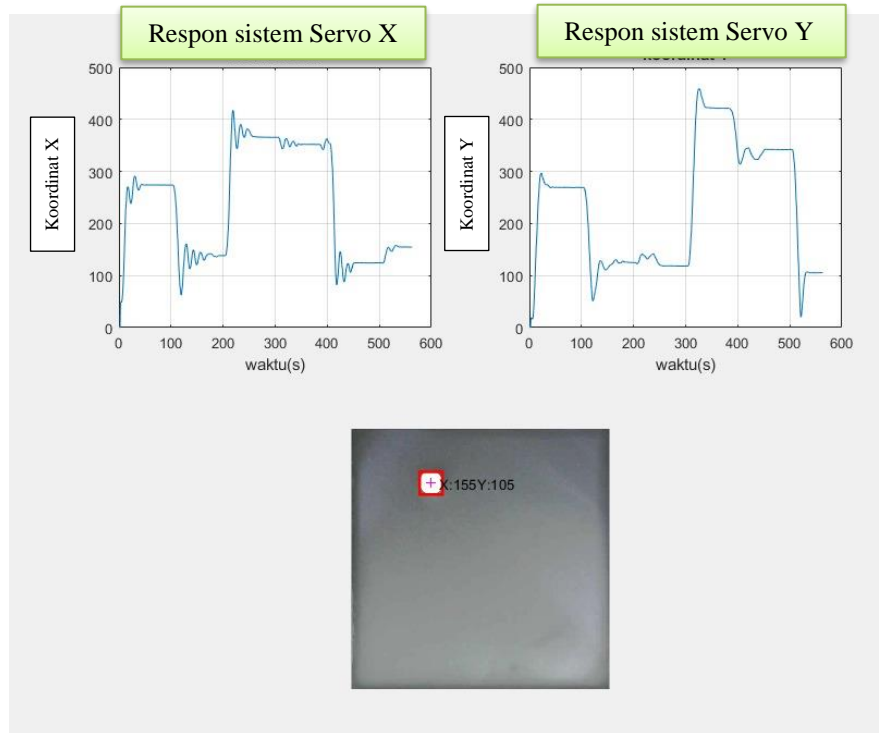
Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui *error* ketika *set point* berbeda. Respon yang dihasilkan oleh sistem dan pergerakan derajat servo terhadap nilai *set point* yang telah ditentukan. Pengujian dilakukan dengan cara meletakkan bola pada posisi acak pada *plate*. Bola akan stabil pada *set point* yang telah ditentukan. *Error* dihitung dari selisih *set point* dengan koordinat bola yang didapatkan derajat servo akan dilihat dari nilai sudut yang dikirim ke aktuaktor. Respon sistem hasil pengujian dan grafik hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar IV-3 dan Gambar IV-4. Tabel hasil pengujian terdapat pada lampiran.



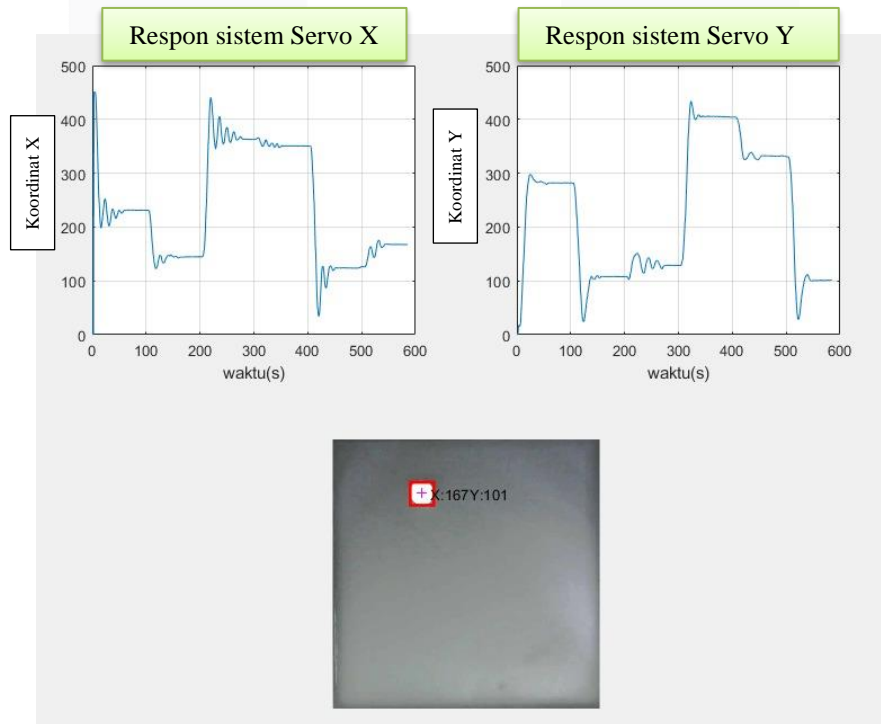
Pada pengujian respon saat *set point* beda memiliki rata-rata *error* pada sumbu x sebesar 2,52% dan rata-rata *error* pada sumbu y sebesar 3,15%. Grafik sistem dapat dilihat secara *real time* saat alat dijalankan. Respon sistem yang dihasilkan memiliki pengaruh dari posisi awal bola diletakkan hingga mencapai *set point*. Sehingga bisa saja grafik yang dihasilkan tidak dimulai dari 0. Saat *set point* berada di 140 maka derajat yang akan dikirim untuk servo x 110 dan sumbu Y 80.

4.4 Pengujian Respon saat *Set Point* Berpindah 4 Koordinat

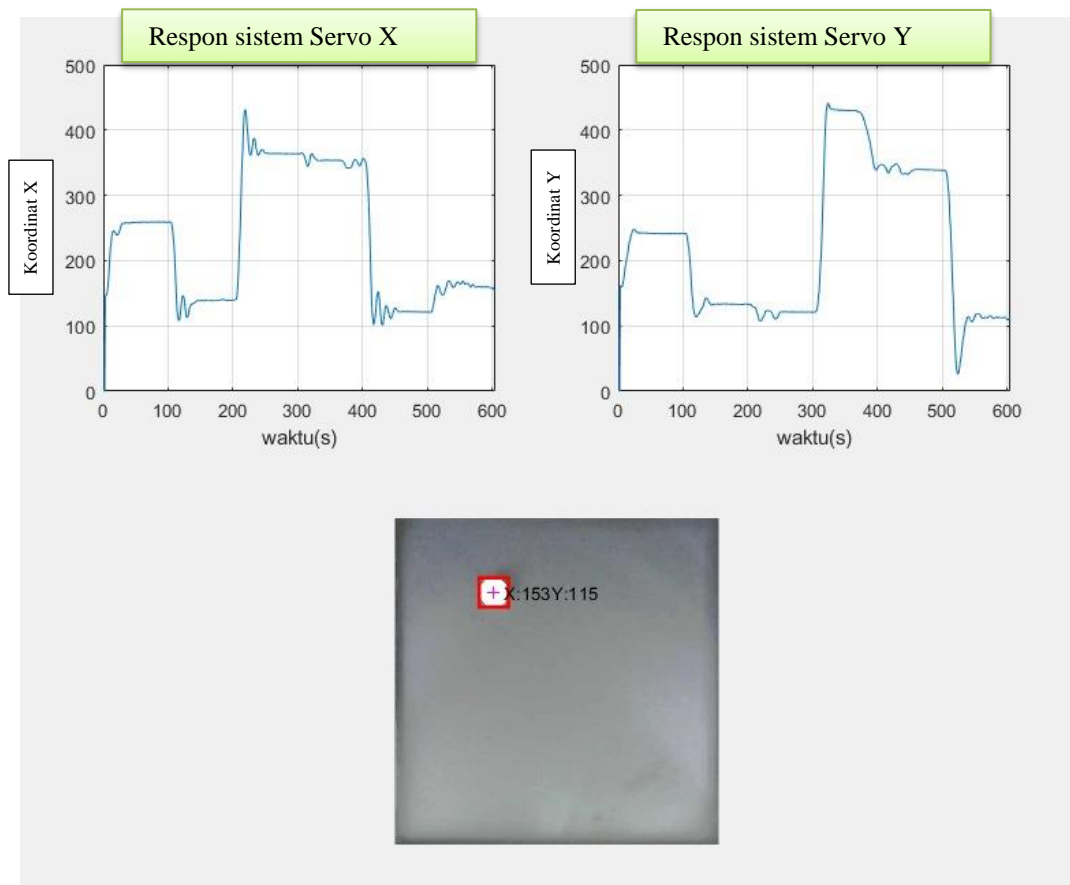
Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui *error* saat *set point* berpindah 4 titik koordinat dan bola dapat berpindah sesuai *set point* yang telah ditentukan. *Error* dihitung dari selisih *set point* dengan koordinat bola yang didapatkan. melihat respon yang dihasilkan secara *real time*. Respon sistem hasil pengujian percobaan pertama dapat dilihat pada Gambar IV-5, Gambar IV-6, dan Gambar IV-7. Tabel hasil pengujian terdapat pada lampiran.



Pada pengujian pertama bola sudah dapat berpindah sesuai *set point* yang ditentukan. Hasil respon saat *set point* berpindah 4 koordinat memiliki rata-rata *error* pada sumbu x sebesar 2,84% dan rata-rata *error* pada sumbu y sebesar 1,48%. Untuk sumbu x memiliki osilasi yang lebih dari sumbu y sebelum sistem memasuki keadaan stabil.



Pada pengujian kedua respon saat *set point* berpindah 4 koordinat memiliki rata-rata *error* pada sumbu x sebesar 3,08% dan rata-rata *error* pada sumbu y sebesar 2,83%. Untuk sumbu x masih memiliki *error* yang lebih dari sumbu y sebelum sistem memasuki keadaan stabil.



Pada pengujian ketiga respon saat *set point* berpindah 4 koordinat memiliki rata-rata *error* pada sumbu x sebesar 2,33% dan rata-rata *error* pada sumbu y sebesar 1,45%. Untuk sumbu x masih memiliki osilasi dan *error* yang lebih dari sumbu y sebelum sistem memasuki keadaan stabil. Keadaan ini dipengaruhi oleh masukan tegangan yang diberikan ke aktuator.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian dan pengambilan data pada tugas akhir ini dapat disimpulkan :

1. Pengujian respon saat *set point* tetap dan diberikan gangguan memiliki *error* yang kecil yaitu 1,84% pada sumbu x dan *error* 2,72% pada sumbu y. *Settling time* pada percobaan saat *set point* tetap memiliki nilai rata-rata 94,46 detik.
2. Respon sistem dan hasil pergerakan bola dapat dilihat melalui *interface* pada MATLAB dan dapat dilihat secara *real time*.
3. Metode kendali *Fuzzy Logic* berhasil direalisasikan dengan tambahan *integrator* pada sistem *Ball On Plate*, sehingga dapat mengatur koordinat bola sesuai *set point*.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil dari perancangan, pengujian dan analisis dari tugas akhir ini maka penulis memberi saran :

1. Sebaiknya menggunakan motor servo dengan kualitas yang lebih baik agar *error* lebih kecil dan pergerakan bola lebih akurat.
2. Membuat tampilan GUI agar lebih mudah digunakan.
3. Menggunakan raspberrypi untuk komputasi data agar dapat mengurangi 2 kontroller pc dan arduino.
4. Nilai *set point* dapat di ubah melalui GUI yang telah dibuat.
5. Metode *image processing* menggunakan pendeteksi lingkaran agar tidak memiliki pengaruh dari warna yg ada di sekitar tangkapan kamera.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] insinyoer.com, "Cara Kerja Motor Servo," [Online]. Available: <http://www.insinyoer.com/cara-kerja-motor-servo/>.
- [2] rhydolabz, "Servo Motors," [Online]. Available: https://www.rhydolabz.com/robotics-servo-motors-c-155_157/.
- [3] webstudi.site, "Motor DC Vs Motor Servo, Apa Perbedaannya?," [Online]. Available: <http://www.webstudi.site/>.
- [4] Weblog gw, "Tahap Pemodelan Logika Fuzzy," [Online]. Available: <https://ajjexku.wordpress.com/2012/01/22/tahap-pemodelan-logika-fuzzy/>.
- [5] N. Nieyoul, "Citra Digital," [Online]. Available: <http://niaidris.blogspot.com/2018/05/citra-digital-1.html>.
- [6] logitech, "C270," [Online]. Available: <https://www.logitech.com/id-id/product/hd-webcam-c270>.
- [7] nanopowerbd.com, [Online]. Available: nanopowerbd.com.
- [8] G. F. Franklin, J. D. Powell and A. Emami-Naeni, Digital Control of Dynamical System, 3rd Ed, Kanada, 1998.
- [9] N. Monita, "Perancangan Sistem Kendali dengan PID untuk Keseimbangan Bola," 2018.
- [10] Hasan, K. Mahmud, A. Al-Hamid, K. J. Reza, S. Khatun and R. M. Basar, "Sensor Based Autonomous Color Line Follower Robot with Obstacle Avoidance," *IEEE Business Engineering and Industrial Application Colloquium (BEIAC)*, 2013.
- [11] J. Bruce, C. Keeling and R. Rodriguez, "Four Degree of Freedom Control System Using a Ball on Plate," 2011.
- [12] H. Jafari, A. Rahimpour, M. Pourrahim and F. Hashemzadeh, "Linear Quadratic Gaussian Control for Ball and Plate System".
- [13] "Pengantar Dasar Sistem Kontrol," [Online]. Available: <http://dosen.narotama.ac.id/wp-content/uploads/2012/12/modul-1-PENGANTAR-SISTEM-KONTROL.doc> .
- [14] J. Jantzen, "Design of Fuzzy Controllers," *Tech. report no 98-E 864*, 1998.
- [15] H. Yang, "Fuzzy Systems Technology: A Brief Overview".
- [16] M. Amjad, M. I. Kashif, S. S. Abdullah and Z. Shareed, "A Simplified Intelligent Controller for Ball and Beam System," *2nd International Conference on Education Technology and Computer (ICETC)*, 2010.
- [17] H. Muhammad, M. Ramdhani and A. S. Wibowo, "DESAIN DAN IMPELEMENTASI KENDALI PID PADA BEAM AND BALL SYSTEM," *e-Proceeding of Engineering* , vol. 4, p. 3286, 2017.
- [18] A. Adiprasetya and A. S. Wibowo, "Implementation of PID Controller and Pre-Filter to Control Non-Linear Ball and Plate System," *2016 International conference on control, electronics, renewable energy and communications (ICCEREC)*, pp. 174-178, 2016.