

PERANCANGAN SISTEM KESEIMBANGAN BALL AND BEAM MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK LABVIEW BERBASIS FUZZY LOGIC CONTROLLER

Nurma Orfa Dewi

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
email : nurmadewi@mhs.unesa.ac.id

Puput Wanarti Rusimanto

Dosen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
email: puputwanarti@unesa.ac.id

Abstrak

Ball and beam merupakan sebuah alat peraga atau pemodelan pada sistem kendali mengenai keseimbangan yang terdiri dari sebuah bola (*ball*) dan sebuah bidang segi empat atau balok (*beam*) dengan sensor diletakkan di salah satu sisi dari balok untuk mendeteksi posisi bola yang sulit untuk mencapai seimbang bila tanpa pengendali atau kontroler. Tujuan dari penelitian ini adalah menghasilkan sistem *ball and beam* agar berada dalam keadaan seimbang dengan menggunakan *Fuzzy Logic Controller*, kemudian dilakukan analisis respon dinamikanya. Masukan dari sistem ini adalah jarak yang diukur oleh sensor ultrasonik kemudian data dikirim ke NI ELVIS II sebagai *data acquisition* dan diteruskan ke perangkat lunak LabVIEW untuk memproses program dengan pengendali logika *fuzzy* dan menampilkan keluarannya berupa putaran motor servo pada *Graphical User Interface* (GUI). Hasil yang diperoleh adalah sistem mampu menghasilkan *error* paling kecil 0.079 pada *set point* 25 cm dan paling besar 8.973 pada *set point* 10 cm.

Kata-kata Kunci: *Ball and Beam*, Pengendali Logika *Fuzzy*, NI ELVIS II, LabVIEW

Abstract

Ball and beam is a control system model about balance that consists of a ball and a rectangular beam with a sensor placed on one side of the beam to detect the ball position that is difficult to reach balance position without a controller. The purpose of this research is to product ball and beam system to be in balance condition using Fuzzy Logic Controller, then analyz its dinamic respon. This research takes input from ultrasonic sensor then the data is sent to NI ELVIS II as the data acquisition and forwarded to the LabVIEW software to process the fuzzy logic controller. The servo motor rotation as the output will display on the *Graphical User Interface* (GUI). The results of this research obtained that the smallest error steady state (*Ess*) is in the system with 25 cm set point, which is 0.079, while the biggest *Ess* is in the system with 25 cm set point, which is 8.973.

Keywords: Ball and Beam, Fuzzy Logic Controller, NI ELVIS II, LabVIEW

PENDAHULUAN

Menjaga keseimbangan suatu benda terhadap benda lain sering menjadi acuan dalam menerapkan sistem kendali pada aspek keseimbangan, hal ini sangat penting dalam aplikasi yang berkaitan dengan gerakan seperti gerakan robot (Subrata dkk, 2015). Sistem semacam itu terbukti berbahaya untuk dilakukan percobaan dalam kendali vertikal pesawat ruang angkasa dan pesawat udara sehingga hanya dapat dipelajari dalam laboratorium dengan memodelkan sistem tersebut (Ali dkk, 2017). Pemodelan sistem kendali keseimbangan yang dapat dilakukan dengan menggunakan sistem *ball and beam*.

Sistem keseimbangan *ball and beam* sering digunakan sebagai alat peraga karena dianggap mudah dimengerti dan dipahami sebagai sistem dan berbagai metode dapat diterapkan pada sistem ini (Muhammad dkk, 2017).

Ball and beam adalah sebuah sistem yang terdiri dari sebuah bola (*ball*) dan sebuah bidang segi empat atau balok (*beam*) dengan sensor diletakkan di salah satu sisi dari balok untuk mendeteksi posisi dari bola. Aktuator menggerakkan balok ke sudut yang diinginkan dengan

menerapkan torsi pada ujung balok (Keshmiri dkk, 2012). Pengendali logika *fuzzy* dalam hal ini menjaga posisi bola dengan menggerakkan balok menggunakan motor agar tetap pada posisi yang diinginkan walaupun diberi gangguan.

Penelitian dengan judul “Perancangan Sistem Keseimbangan *Ball and Beam* Menggunakan Perangkat Lunak LabVIEW Berbasis *Fuzzy Logic Controller*” ini dilakukan dengan mengembangkan penelitian dari Else Orlanda Merti Wijaya (2017) berdasarkan saran yang telah diberikan pada penelitian yang berjudul “Perancangan Sistem Keseimbangan *Ball and Beam* dengan Menggunakan Pengendali PID Berbasis Arduino UNO”, yaitu mengubah jenis metode pengendalian untuk mengurangi nilai *error steady state* dan atau melakukan penambahan atau penggantian sensor yang lebih akurat agar pembacaan posisi bola lebih presisi.

Metode pengendali logika *fuzzy* diaplikasikan melalui piranti akuisisi data NI ELVIS II dan perangkat lunak LabVIEW 2014 untuk mengendalikan putaran motor servo yang masukannya berdasarkan pembacaan sensor ultrasonik.

KAJIAN PUSTAKA

Ball and Beam

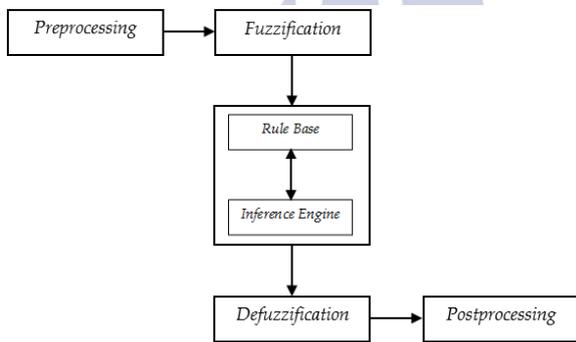
Ball and beam merupakan salah satu contoh klasik mengenai keseimbangan berupa sebuah sistem yang terdiri dari sebuah bola (ball) dan sebuah bidang segi empat atau balok (beam) dengan sensor diletakkan di salah satu sisi dari balok untuk mendeteksi posisi dari bola. Aktuator menggerakkan balok ke sudut yang diinginkan dengan menerapkan torsi pada ujung balok (Keshmiri dkk, 2012).. Salah satu pengembangan yang dapat dilihat secara nyata adalah pada bidang robotika di mana sistem ball and beam menjadi dasar kesetimbangan dari setiap mekanisme pergerakan robot (Wijaya, 2017).

Pengendali Logika Fuzzy

Salah satu sistem kendali cerdas yang banyak digunakan adalah logika fuzzy, pertama kali diperkenalkan oleh Lotfi Zadeh pada tahun 1965 (Wati, 2011).

1. Struktur Fuzzy

Gambar 1 menunjukkan diagram blok dari sistem pengendali logika fuzzy.



Gambar 1. Diagram Blok Pengendali Logika Fuzzy (Sumber: Kumar, 2014)

Preprocessing, masukan merupakan pengukuran yang paling sulit diubah menjadi nilai fuzzy untuk setiap set masukan fuzzy dengan blok fuzzification (Saat, 2014).

Fuzzification, fuzzification atau fuzifikasi adalah proses mengubah nilai variabel yang berupa angka ke dalam nilai variabel linguistik (Wati, 2011).

Rule base, merupakan kumpulan aturan “if then” di mana anteseden dan konsekuennya berupa variabel linguistik (Wati, 2011).

Inference engine, dalam hal ini berarti menangani aturan inference yang di mana pengalaman-pengalaman manusia dengan mudah dimasukkan melalui kaidah linguistik.

2. Metode Mamdani

Metode Mamdani dikenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975.

Pembentukan himpunan fuzzy, variabel masukan maupun variabel keluaran dibagi menjadi satu atau lebih himpunan fuzzy. Aplikasi fungsi implikasi, fungsi implikasi yang digunakan adalah Min (minimum). Fungsi implikasi Min ini akan memotong keluaran himpunan fuzzy. Komposisi aturan, berbeda

dengan penalaran monoton, apabila sistem terdiri dari beberapa aturan, maka inferensi didapatkan dari kumpulan dan korelasi antar aturan. Penegasan, masukan dari proses defuzzifikasi adalah himpunan fuzzy yang didapatkan dari komposisi aturan fuzzy. Keluaran yang dihasilkan merupakan bilangan pada domain himpunan fuzzy tersebut (Kusumadewi dkk, 2010).

Analisis Karakteristik Sistem Orde Dua

Model sistem orde dua secara matematis dapat dituliskan seperti pada persamaan 1 (Ogata, 2010).

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{(\omega_n)^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + (\omega_n)^2} \tag{1}$$

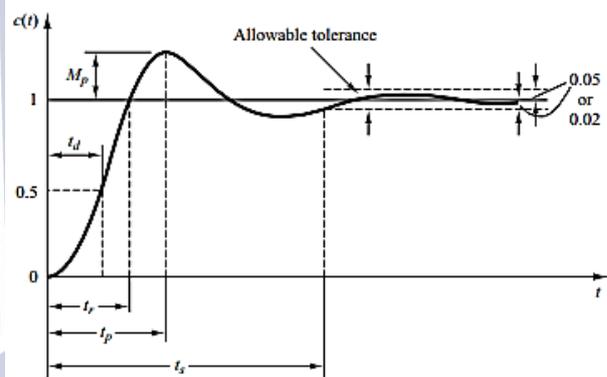
Keterangan:

$C(s)$ = keluaran

$R(s)$ = masukan

ω_n = frekuensi alami tidak teredam

ζ = rasio redaman



Gambar 2. Kurva Respon Orde Dua (Sumber: Ogata, 2010)

Kurva respon unit-step orde dua ditunjukkan pada Gambar 2.

1. Waktu tunda, t_d : waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai setengah dari respon steady state pada pertama kali (Ogata, 2010).

$$c(t_d) = \frac{c(t_r)}{2} \tag{2}$$

2. Waktu naik, t_r : waktu yang dibutuhkan respon untuk naik dari 10% sampai 90%, 5% sampai 95%, atau 0% sampai 100% dari respon steady state (Ogata, 2010).

$$t_r = \frac{1}{\omega_d} \tan^{-1} \frac{\omega_d}{\sigma} \tag{3}$$

Keterangan:

ω_d = frekuensi alami teredam

σ = pelemahan

3. Waktu puncak, t_p : waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai nilai puncak *overshoot* pertama kali (Ogata, 2010).

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} \quad (4)$$

4. *Maximum (percent) overshoot*, M_p : nilai puncak maksimal kurva respon yang dihitung dari persatuan (Ogata, 2010).

$$M_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (5)$$

Keterangan:
 $c(\infty)$ = nilai akhir

5. Waktu tunak, t_s : waktu yang dibutuhkan oleh kurva respon untuk mencapai dan tetap dalam rentang nilai *steady state* yang ditentukan dengan persen absolut (Ogata, 2010).

$$t_s(2\%) = \frac{4}{\sigma} = \frac{4}{\zeta \cdot \omega_n} \quad (6)$$

$$t_s(5\%) = \frac{3}{\sigma} = \frac{3}{\zeta \cdot \omega_n} \quad (7)$$

dengan

$$\zeta = \frac{\ln(M_p)^2}{\sqrt{\ln(M_p)^2 + \pi^2}} \quad (8)$$

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (9)$$

Respon dari *steady state* diukur berdasarkan kesalahan atau *error* relatif pada keadaan tunak (*steady state*) (Ogata, 2010).

$$Ess\% = \frac{Y_{ss} - X_{ss}}{X_{ss}} \times 100\% \quad (10)$$

Keterangan:

Ess = kesalahan pada keadaan tunak
 Y_{ss} = rata-rata respon
 X_{ss} = rata-rata *set point*

NI ELVIS II

National Instruments Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite (NI ELVIS) II adalah suatu modul solusi laboratorium pendidikan teknik yang dikembangkan khusus untuk kalangan akademis. Dengan pendekatan langsung, pendidik dapat membantu peserta didik untuk belajar praktis, ketrampilan eksperimental.

NI ELVIS II terdiri dari *prototyping board*, piranti *data acquisition* (DAQ) multifungsi, dan instrumen virtual berbasis LabVIEW seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. NI ELVIS II
 (Sumber: www.ni.com)

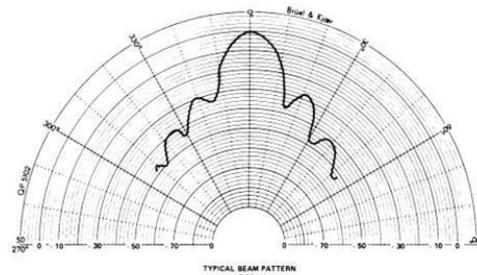
LabVIEW

LabVIEW merupakan sebuah perangkat lunak yang diproduksi oleh National Instruments yang mempunyai fungsi yang sama seperti Matlab maupun Visual Basic namun menggunakan bahasa pemrograman yang berbeda, yaitu menggunakan bahasa pemrograman berbasis grafis atau diagram blok, sementara bahasa pemrograman lainnya berbasis *text*.

Perangkat lunak LabVIEW terdiri dari tiga komponen utama, yaitu *front panel*, diagram blok Vi, dan *control* dan *functions palette*.

Sensor Ultrasonik

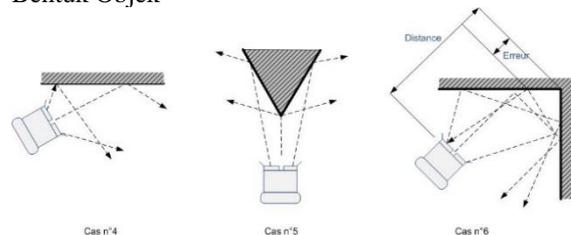
Sensor ultrasonik adalah komponen yang memiliki prinsip kerja dari pantulan gelombang suara dan digunakan untuk mendeteksi keberadaan suatu benda yang ada dalam frekuensinya. Sensor ultrasonik terbentuk dari unit penerima dan unit pemancar. Unit pemancar memancarkan gelombang frekuensi (umumnya sekitar 40 kHz) dan unit penerima menerima gelombang tersebut berdasarkan pantulannya dari benda. Jarak antara waktu pancar dan waktu terima adalah representasi dari jarak objek (*Generation Robots*). Gambar 4 menunjukkan sorotan dari ultrasonik.



Gambar 4. Sorotan Ultrasonik
 (Sumber: www.generationrobots.com, 2017)

Berikut ini terdapat beberapa batasan dari sensor ultrasonik.

1. Bentuk Objek



Gambar 5. Pembacaan Sensor Ultrasonik Berdasarkan Bentuk Objek

(Sumber: www.generationrobots.com, 2017)

2. Tekstur Objek

Tekstur juga mempunyai peran yang penting. Sebuah tembok berkarpet akan menghasilkan gelombang yang lebih buruk dari tembok biasa.

Penelitian ini digunakan sensor ultrasonik HC-SR04. Sensor yang mempunyai empat *pin* ini sangat populer digunakan pada berbagai aplikasi yang mengukur jarak. Sensor ultrasonik HC-SR04 yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Gambar 6 di bawah ini.



Gambar 6. Sensor Ultrasonik HC-SR04
(Sumber: www.electroschematics.com, 2013)

Motor Servo

Menurut Dipraj dan Pandey (2012) motor servo adalah motor yang digunakan untuk pengendalian posisi dan kecepatan pada sistem kontrol *loop* tertutup.

Pada penelitian ini digunakan satu jenis motor servo, yaitu motor servo yang ditunjukkan pada Gambar 7 merupakan motor servo SG90.



Gambar 7. Motor Servo SG90
(Sumber: components101.com, 2017)

Arduino UNO

Arduino UNO merupakan sebuah papan mikrokontroler berbasis ATmega328P yang memiliki 14 masukan/keluaran digital, 6 masukan analog, sambungan USB, *power jack*, *header ICSP*, dan tombol *reset*.

Arduino UNO, seperti pada Gambar 8, pada penelitian ini digunakan untuk menangani salah satu permasalahan yang timbul akibat kekurangan *channel* pada NI ELVIS II.



Gambar 8. Arduino UNO
(Sumber: www.robotistan.com)

METODE PENELITIAN

Instrumen Pengumpulan Data

Instrumen pengumpulan data yang digunakan adalah laptop (PC) dan perangkat lunak LabVIEW yang digunakan untuk menganalisis data keluaran sensor.

Prosedur Penelitian

1. Studi Literatur

Hal yang pertama dilakukan adalah menelaah beberapa penelitian yang masih berhubungan. Sebagai bahan literatur, buku-buku manual, jurnal-jurnal tentang pengendali logika *fuzzy*, dan juga melalui situs yang masih relevan dengan penelitian dipelajari.

2. Pengumpulan Bahan

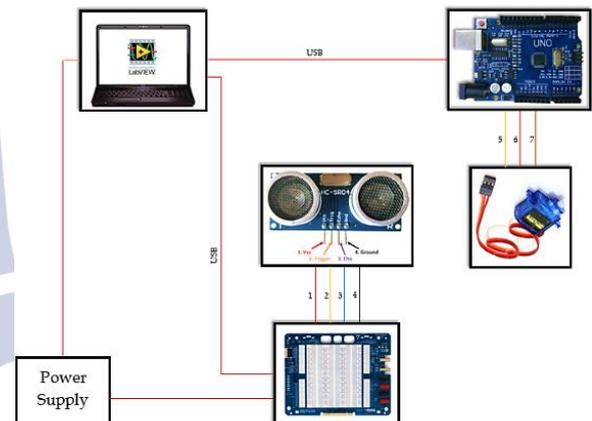
Pengumpulan bahan pada penelitian ini berupa informasi atau referensi yang akan digunakan sebagai metode dalam pembuatan sistem serta komponen yang akan digunakan dan desain sistem yang paling baik.

3. Desain Sistem

Desain sistem keseimbangan *ball and beam* menggunakan pengendali logika *fuzzy* berbasis LabVIEW yang terdiri dari blok rancangan perangkat keras dan blok rancangan pengolahan data sebagai pengolahan data yang dihasilkan sistem yang terintegrasi menjadi sistem yang utuh.

4. Rancang Bangun Perangkat Keras

Gambar desain rancang bangun perangkat keras ditunjukkan pada Gambar 9 dan *ball and beam* yang digunakan pada Gambar 10.



Gambar 9. Skema Rangkaian Perangkat Keras
(Sumber: Dokumen Pribadi, 2018)



Gambar 10. Desain *Ball and Beam*
(Sumber: Dokumen Pribadi, 2018)

Perancangan Sistem Kendali

1. Fuzzification

Sistem kendali dirancang dengan menggunakan dua masukan yaitu pertama *Error* yang merupakan selisih antara nilai *set point* dengan pembacaan sensor, dan ke dua adalah *Delta Error* yang merupakan turunan pertama dari *Error*. Fungsi keanggotaan menggunakan representasi kurva segitiga dan trapesium. Penentuan

himpunan variabel masukan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Penentuan Himpunan Variabel Masukan

Fungsi	Variabel	Himpunan Variabel				
Masukan	Error	nl	ns	z	ps	pl
Masukan	Delta Error	n		z1		p

(Sumber: Dokumen Pribadi, 2018)

Keterangan:

- | | |
|---------------------|---------------------|
| nl = negative large | pl = positive large |
| ns = negative small | n = negative |
| z = zero | z1 = zero1 |
| ps = positive small | p = positive |

2. Rule Base

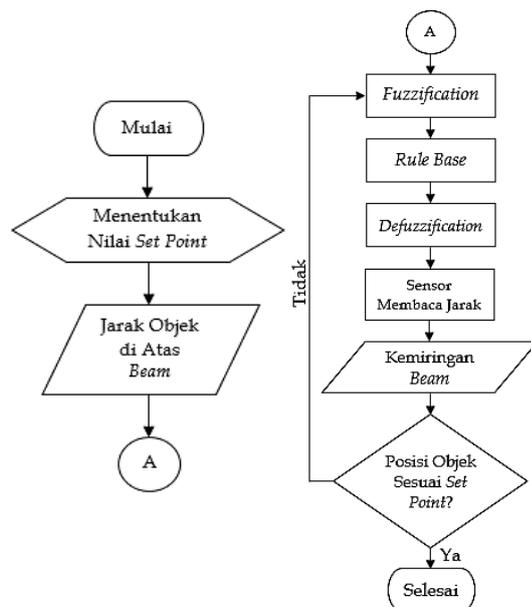
Rule base yang digunakan adalah fungsi implikasi "IF THEN" yang menyatakan hubungan masukan dengan keluaran dengan metode Max yaitu mengambil nilai maksimum aturan sebagai solusi himpunan pengendali logika fuzzy.

3. Defuzzification

Masukan dari proses defuzzification adalah himpunan fuzzy yang diperoleh dari komposisi aturan fuzzy. Keluarannya berupa bilangan pada domain himpunan fuzzy tersebut. Metode defuzzification yang digunakan adalah metode Centroid.

Rancangan Perangkat Lunak

Garis besar proses jalannya program ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Diagram Alir Perangkat Lunak (Sumber: Dokumen Pribadi, 2018)

Algoritma dari sistem diawali dengan menentukan nilai set point berupa jarak objek dari sensor. Kemudian meletakkan objek secara manual pada jarak 0 cm sebagai posisi awal. Sistem akan memproses data masukan tersebut

menggunakan perangkat lunak LabVIEW. Sensor membaca jarak objek, kemudian data dikirimkan ke LabVIEW. LabVIEW akan mengolah data masukan dengan kaidah-kaidah pengendali logika fuzzy mulai dari fuzzification, rule based, dan defuzzification dan akan mengubah kemiringan dari beam.

Apabila posisi objek terdeteksi sesuai dengan set point, maka tidak akan ada aksi dari motor servo. Jika tidak sesuai, maka akan terbaca sebagai nilai error dan delta error yang akan menjadi acuan dari pengendali logika fuzzy untuk menggerakkan motor servo dan akan begitu seterusnya sampai menuju ke set point yang diinginkan.

Pengujian

Pengujian dilakukan dalam tiga bagian antara lain pengujian rangkaian sistem keseimbangan ball and beam untuk fuzzy, pengimplementasian konfigurasi pengendali logika fuzzy pada plant, dan analisis hasil pengujian.

Analisis dan Pembahasan

Analisis data keluran dari sensor ultrasonik untuk mengetahui respon sistem pengendalian ball and beam dengan menggunakan pengendali logika fuzzy apakah sudah sesuai dengan set point yang diberikan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tampilan Perangkat Keras Ball and Beam

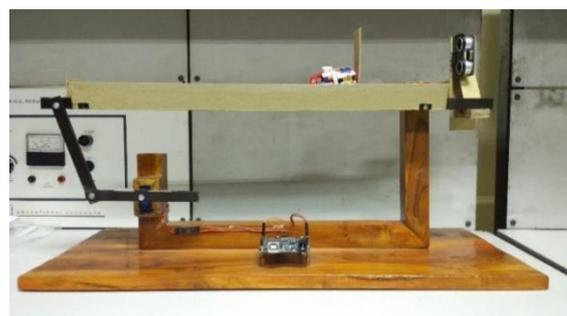
Seperti yang sudah dijelaskan pada Pendahuluan bahwa penelitian ini mengembangkan penelitian yang telah ada. Dengan mengacu pada saran dari penelitian yang sebelumnya dan pertimbangan lainnya, maka dilakukan beberapa perubahan seperti yang dijelaskan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Perbandingan Ball and Beam Lama dengan Ball and Beam Baru

No.	Ball and Beam Lama	Ball and Beam Baru
1.	Tanpa sensor bracket	Dengan sensor bracket
2.	Bola tenis meja	Kertas karton di atas mobil mainan
3.	Beam berupa batang stainless berbentuk U	Beam berupa jalur papan selancar

(Sumber: Dokumen Pribadi, 2018)

1. Tampak Depan



Gambar 12. Tampilan Ball and Beam dari Sisi Depan (Sumber: Dokumen Pribadi, 2018)

2. Tampak Belakang



Gambar 13. Tampilan *Ball and Beam* dari Sisi Belakang
(Sumber: Dokumen Pribadi, 2018)

3. Tampak Atas

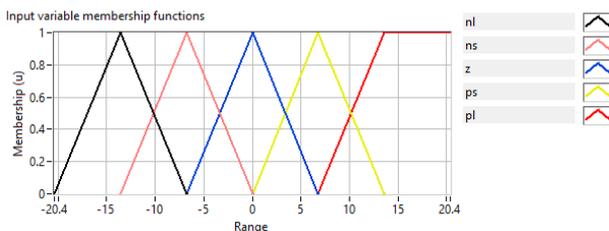


Gambar 14. Tampilan *Ball and Beam* dari Sisi Atas
(Sumber: Dokumen Pribadi, 2018)

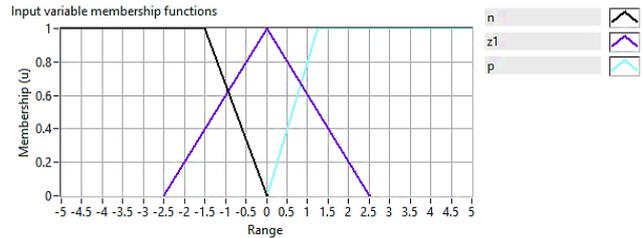
Perancangan Pengendali Logika Fuzzy

Perancangan pengendali logika *fuzzy* didasarkan pada pengetahuan dan pengalaman peneliti terhadap sistem. Untuk dapat merancang pengendali logika *fuzzy*, hal-hal yang harus diperhatikan adalah karakteristik sistem, masukan sistem, dan keluaran sistem.

Nilai rentang semesta pembicaraan pada masukan sistem yang digunakan adalah berupa jarak -20.4 cm sampai 20.4 cm untuk *Error* dan -5 cm sampai 5 cm untuk *Delta Error*. Kurva fungsi keanggotaan masukan *Error* dan *Delta Error* masing-masing ditunjukkan pada Gambar 15 dan Gambar 16.



Gambar 15. Fungsi Keanggotaan Masukan *Error*
(Sumber: Dokumen Pribadi, 2018)



Gambar 16. Fungsi Keanggotaan Masukan *Delta Error*
(Sumber: Dokumen Pribadi, 2018)

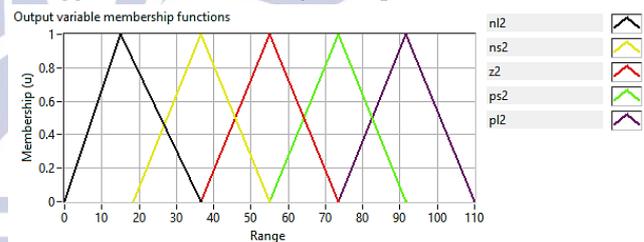
Dengan menggunakan *rule base* atau basis aturan *IF-THEN* metode implikasi MIN yang kemudian hasil dari setiap aturan *fuzzy* diintegrasikan menggunakan metode MAX, maka matrik *rule base* yang didapatkan adalah seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Matrik *Rule Base Ball and Beam* dengan Pengendali Logika Fuzzy

de \ e	nl	ns	z	ps	pl
n	nl2	nl2	ns2	ps2	ps2
z1	nl2	ns2	z2	nl2	pl2
p	ns2	ns2	ps2	pl2	pl2

(Sumber: Dokumen Pribadi, 2018)

Keluaran dari sistem *ball and beam* ini berupa sudut putaran motor servo dengan rentang nilai semesta pembicaraannya 0° sampai 110°. Kurva fungsi keanggotaan keluaran ditunjukkan pada Gambar 17.



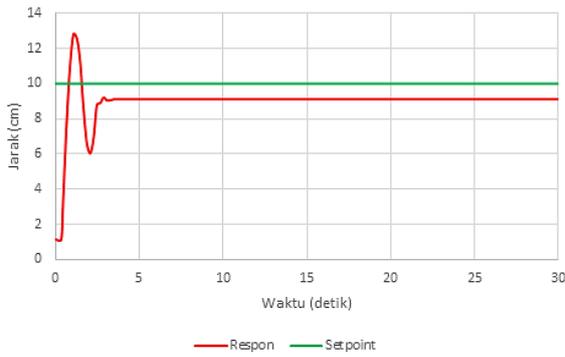
Gambar 17. Fungsi Keanggotaan Keluaran
(Sumber: Dokumen Pribadi, 2018)

Pengujian Respon Sistem dengan Pengendali Logika Fuzzy pada Real Plant

Pengujian yang dilakukan dengan menerapkan pengendali logika *fuzzy* yang telah dibuat. Pengujian respon pada *plant ball and beam* dilakukan dengan memberikan berbagai nilai *set point* untuk kemudian dianalisis bagaimana respon *ball and beam*.

1. Pengujian *Real Plant* Sistem *Ball and Beam* dengan *Set Point* 10 cm

Pengujian sistem *ball and beam* dilakukan dengan memberikan *set point* tetap bernilai 10 cm. Hasil respon sistem ditunjukkan pada Gambar 18.



Gambar 18. Respon Sistem *Real Plant* Sistem *Ball and Beam* dengan *Set Point* 10 cm
(Sumber: Dokumen Pribadi, 2018)

Berdasarkan persamaan (2) sampai persamaan (10), maka didapatkan nilai-nilai berikut.

$$c(t_p) = 12.797$$

$$t_p = 1.067 \text{ s}$$

$$t_r = \frac{1}{\omega_d} \tan^{-1} \frac{\omega_d}{\sigma} = \frac{1}{2.943} \tan^{-1} \frac{2.943}{0.483} = 0.628 \text{ s}$$

$$c(t_d) = \frac{c(t_r)}{2} = \frac{5.694}{2} = 2.847$$

$$t_d = 0.403 \text{ s}$$

$$t_s(2\%) = \frac{4}{\sigma} = \frac{4}{0.844} = 4.736 \text{ s}$$

$$t_s(5\%) = \frac{3}{\sigma} = \frac{3}{0.844} = 3.552 \text{ s}$$

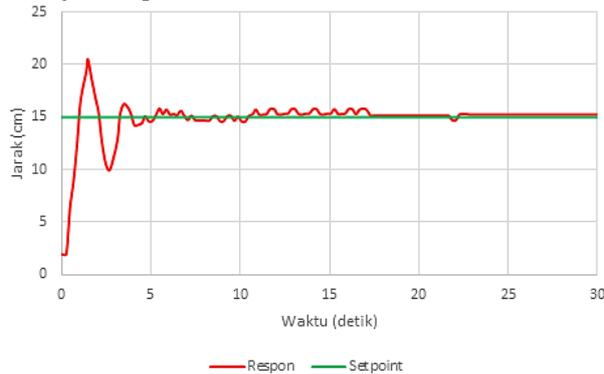
$$Ess = \frac{Y_{ss} - X_{ss}}{X_{ss}} = \frac{9.102 - 10}{10} = 8.973$$

Dari perhitungan di atas, maka didapatkan fungsi alihnya, yaitu:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{9.375}{s^2 + 1.684s + 9.375}$$

2. Pengujian *Real Plant* Sistem *Ball and Beam* dengan *Set Point* 15 cm

Pengujian kedua dilakukan dengan memberikan *set point* tetap bernilai 15 cm. Hasil respon sistem ditunjukkan pada Gambar 19.



Gambar 19. Respon Sistem *Real Plant* Sistem *Ball and Beam* dengan *Set Point* 15 cm
(Sumber: Dokumen Pribadi, 2018)

Berdasarkan persamaan (2) sampai persamaan (10), maka didapatkan nilai-nilai berikut.

$$c(t_p) = 20.503$$

$$t_p = 1.461 \text{ s}$$

$$t_r = \frac{1}{\omega_d} \tan^{-1} \frac{\omega_d}{\sigma} = \frac{1}{2.150} \tan^{-1} \frac{2.150}{0.579} = 0.884 \text{ s}$$

$$c(t_d) = \frac{c(t_r)}{2} = \frac{14.542}{2} = 7.271$$

$$t_d = 0.562 \text{ s}$$

$$t_s(2\%) = \frac{4}{\sigma} = \frac{4}{0.737} = 5.423 \text{ s}$$

$$t_s(5\%) = \frac{3}{\sigma} = \frac{3}{0.737} = 4.067 \text{ s}$$

$$Ess = \frac{Y_{ss} - X_{ss}}{X_{ss}} = \frac{15.298 - 15}{15} = 1.989$$

Dari perhitungan di atas, maka didapatkan fungsi alihnya, yaitu:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{5.166}{s^2 + 1.472s + 5.166}$$

3. Pengujian *Real Plant* Sistem *Ball and Beam* dengan *Set Point* 20 cm

Pengujian ketiga dilakukan dengan memberikan *set point* tetap bernilai 20 cm. Hasil respon sistem ditunjukkan pada Gambar 20.



Gambar 20. Respon Sistem *Real Plant* Sistem *Ball and Beam* dengan *Set Point* 20 cm
(Sumber: Dokumen Pribadi, 2018)

Berdasarkan persamaan (2) sampai persamaan (10), maka didapatkan nilai-nilai berikut.

$$c(t_p) = 33.414$$

$$t_p = 1.659 \text{ s}$$

$$t_r = \frac{1}{\omega_d} \tan^{-1} \frac{\omega_d}{\sigma} = \frac{1}{1.893} \tan^{-1} \frac{1.893}{0.287} = 0.909 \text{ s}$$

$$c(t_d) = \frac{c(t_r)}{2} = \frac{6.046}{2} = 3.023$$

$$t_d = 0.959 \text{ s}$$

$$t_s(2\%) = \frac{4}{\sigma} = \frac{4}{0.287} = 13.915 \text{ s}$$

$$t_s(5\%) = \frac{3}{\sigma} = \frac{3}{0.287} = 10.436 \text{ s}$$

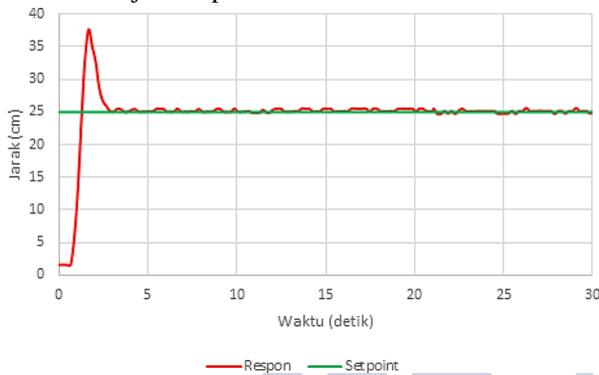
$$Ess = \frac{Y_{ss} - X_{ss}}{X_{ss}} = \frac{20.618 - 20}{20} = 3.091$$

Dari perhitungan di atas, maka didapatkan fungsi alihnya, yaitu:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{3.667}{s^2 + 1.099s + 3.667}$$

4. Pengujian *Real Plant* Sistem *Ball and Beam* dengan *Set Point* 25 cm

Pengujian keempat dilakukan dengan memberikan set point tetap bernilai 25 cm. Hasil respon sistem ditunjukkan pada Gambar 21.



Gambar 21. Respon Sistem *Real Plant* Sistem *Ball and Beam* dengan *Set Point* 25 cm (Sumber: Dokumen Pribadi, 2018)

Berdasarkan persamaan (2) sampai persamaan (10), maka didapatkan nilai-nilai berikut.

$$c(t_p) = 37.626$$

$$t_p = 1.661 \text{ s}$$

$$t_r = \frac{1}{\omega_d} \tan^{-1} \frac{\omega_d}{\sigma} = \frac{1}{1.891} \tan^{-1} \frac{1.891}{0.368} = 0.944 \text{ s}$$

$$c(t_d) = \frac{c(t_r)}{2} = \frac{9.547}{2} = 4.773$$

$$t_d = 0.760 \text{ s}$$

$$t_s(2\%) = \frac{4}{\sigma} = \frac{4}{0.412} = 9.700 \text{ s}$$

$$t_s(5\%) = \frac{3}{\sigma} = \frac{3}{0.412} = 7.275 \text{ s}$$

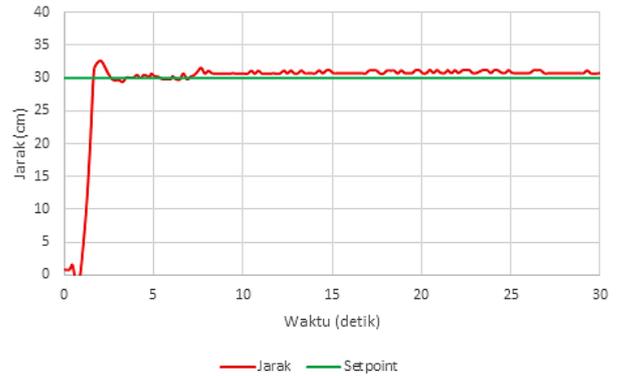
$$Ess = \frac{Y_{SS} - X_{SS}}{X_{SS}} = \frac{25.018 - 25}{25} = 0.074$$

Dari perhitungan di atas, maka didapatkan fungsi alihnya, yaitu:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{3.744}{s^2 + 1.594s + 3.744}$$

5. Pengujian *Real Plant* Sistem *Ball and Beam* dengan *Set Point* 30 cm

Pengujian kelima dilakukan dengan memberikan *set point* tetap bernilai 30 cm untuk mengetahui kestabilan sistem. Hasil respon sistem ditunjukkan pada Gambar 22.



Gambar 22. Respon Sistem *Real Plant* Sistem *Ball and Beam* dengan *Set Point* 30 cm (Sumber: Dokumen Pribadi, 2018)

Berdasarkan persamaan (2) sampai persamaan (10), maka didapatkan nilai-nilai berikut.

$$c(t_p) = 32.596$$

$$t_p = 2.059 \text{ s}$$

$$t_r = \frac{1}{\omega_d} \tan^{-1} \frac{\omega_d}{\sigma} = \frac{1}{1.525} \tan^{-1} \frac{1.525}{1.391} = 1.515 \text{ s}$$

$$c(t_d) = \frac{c(t_r)}{2} = \frac{25.852}{2} = 12.926$$

$$t_d = 1.357 \text{ s}$$

$$t_s(2\%) = \frac{4}{\sigma} = \frac{4}{1.391} = 2.873 \text{ s}$$

$$t_s(5\%) = \frac{3}{\sigma} = \frac{3}{1.391} = 2.155 \text{ s}$$

$$Ess = \frac{Y_{SS} - X_{SS}}{X_{SS}} = \frac{30.842 - 30}{30} = 2.807$$

Dari perhitungan di atas, maka didapatkan fungsi alihnya, yaitu:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{4.264}{s^2 + 5.744s + 4.264}$$

Dari semua perhitungan yang telah dilakukan, dapat diringkas dan dibandingkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Sistem Keseimbangan *Ball and Beam* Menggunakan *Fuzzy Logic Controller*

Set Point	t_p	t_r	t_d	$t_s(2\%)$	$t_s(5\%)$	Ess
10	1.067 s	0.628 s	0.403 s	4.736 s	3.552 s	8.973
15	1.461 s	0.884 s	0.562 s	5.423 s	4.067 s	1.989
20	1.659 s	0.909 s	0.959 s	13.915 s	10.436 s	3.091
25	1.661 s	0.944 s	0.760 s	9.700 s	7.275 s	0.074
30	2.059 s	1.515 s	1.357 s	2.873 s	2.155 s	2.807

(Sumber: Dokumen Pribadi, 2018)

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil simpulan bahwaancangan sistem pengendali keseimbangan *ball and beam* menggunakan pengendali logika *fuzzy* 5x3 dengan dilakukan penggantian bola menjadi bidang datar berupa karton pada mobil mainan pada perangkat keras untuk menghasilkan respon dinamik yang lebih stabil.

Selain itu penerapan pengendali logika *fuzzy* yang telah dirancang menghasilkan respon dinamik yang stabil. Berdasarkan Tabel 4, nilai kesalahan untuk mencapai keadaan tunak (*Ess*) paling kecil pada sistem dengan *set point* 25 cm yaitu 0.079 sedangkan nilai *Ess* paling besar ada ketika sistem diberikan *set point* 10 cm yaitu 8.973 namun memiliki respon yang paling stabil. Nilai t_r yang dibutuhkan sistem untuk *set point* 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, dan 30 cm antara 0.6 s sampai 1.5 s yaitu berturut-turut 0.628 s, 0.884 s, 0.909 s, 0.944 s, dan 1.515 s.

Saran

Setelah penelitian dilakukan, terdapat saran yang diberikan untuk perbaikan maupun pengembangan sistem kendali *ball and beam* selanjutnya yakni menggunakan metode pengendalian yang lain seperti PI-Fuzzy, LQR, dan lain sebagainya untuk mendapatkan nilai kesalahan yang lebih rendah dan menggunakan jenis sensor jarak yang lebih akurat dan presisi agar pembacaan lebih baik sehingga *error* yang dihasilkan lebih rendah; seperti infra merah, kamera, dan lain-lain.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, A. Taifour, *et al.* 2017. "Design and implementation of ball and beam system using pid controller". *Automatic Control and Information Sciences*. Vol. 3 (1): hal. 1-4. DOI: 10.12691/acis-3-1-1.
- Components 101. 2017. *Servo Motor SG-90*, (Online), (<https://components101.com/servo-motor-basics-pinout-datasheet>, diakses 8 Januari 2019).
- Dipraj dan A. K. Pandey. 2012. "Speed control of d. c. servo motor by fuzzy controller". *International Journal Of Scientific & Technology Research*. Vol. 1 (8): hal. 139-142.
- Keshmiri, Mohammad, *et al.* 2012. "Modeling and control of ball and beam system using model based and non-model based control approaches". *International Journal On Smart Sensing and Intelligent Systems*. Vol. 5 (1): hal. 14-35.
- Kumar, Shashi Bhushan, *et al.* 2014. "Design and simulation of speed control of dc motor by fuzzy logic technique with matlab/simulink". *International Journal of Scientific and Research Publications*. Vol. 4 (7).
- Kusumadewi, Sri, dan Hari Purnomo. 2010. *Aplikasi logika fuzzy untuk pendukung keputusan edisi 2*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Marian, P. 2013. *Hc-sr04 datasheet*, (Online), (<https://www.electroschematics.com/8902/hc-sr04-datasheet/>, diakses pada 12 Desember 2018).
- Mazzari, Vanessa. 2017. *Ultrasound sensor ? high quality ultrasound sensors available now*, (Online), (<http://generationrobots.com/blog/en/ultrasound-sensor-high-quality-ultrasound-sensors-available-now/>, diakses pada 12 November 2018).
- Muhammad, Hindami, *et al.* 2017. "Desain dan implemnetasi kendali pid pada beam and ball system". *e-Proceeding of Engineering*. Vol. 4 (3): hal. 3286-3294.
- National Instruments. *Ni elvis ii: ni elvis engineering lab workstation*, (Online), (<http://www.ni.com/en-id/support/model.ni-elvis-ii.html>, diakses pada 22 Maret 2018).
- Ogata, Katsuhiko. 2010. *Modern control engineering: fifth edition*. New Jersey: Pearson Education.
- Robotistan. *Arduino UNO R3 Clone - With USB Cable - (USB Chip CH340)*, (Online), (<https://www.robotistan.com/arduino-uno-r3-clone-with-usb-cable-usb-chip-ch340>, diakses pada 8 Januari 2019).
- Saat, Shahrizal Bin. 2014. *Dc motor speed control using fuzzy logic controller*. Malaysia: Universiti Tun Hussein Onn Malaysia.
- Subrata, Rosalia H dan Richard R. Ligiato. 2015. *Pengendalian keseimbangan ball and plate menggunakan pengendali pid dan pengolahan citra digital*. Jakarta: Universitas Kristen Maranatha.
- Wati, Dwi Ana Ratna. 2011. *Sistem kendali cerdas: fuzzy logic controller (flc), jaringan syaraf tiruan ust), algoritma genetik (ag) dan algoritma particle swarm aptimization (psa)*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Wijaya, Else Orlanda Merti. 2017. *Perancangan sistem keseimbangan ball and beam dengan menggunakan pengendali pid berbasis arduino uno*. Skripsi tidak diterbitkan. Surabaya: Universitas Negeri Surabaya.