



**APLIKASI *FUZZY LOGIC* UNTUK PENGENDALI
MOTOR DC BERBASIS MIKROKONTROLER
ATMEGA8535 DENGAN SENSOR *PHOTODIODA***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Sarjana Pendidikan Program Studi
Pendidikan Teknik Elektro

Oleh

Mohamad Nadhif

NIM.5301411030

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG**

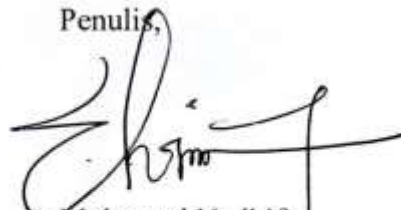
2015

PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa yang tertulis dalam skripsi ini adalah benar-benar hasil karya sendiri, bukan jiplakan dari hasil karya orang lain. Pendapat atau temuan orang lain yang terdapat dalam skripsi ini dikutip atau di rujuk berdasarkan kode etik ilmiah.

Semarang, Oktober 2015

Penulis,



Mohamad Nadhif
NIM. 5301411030/

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Nama : Mohamad Nadhif

NIM : 5301411030

Program Studi : S1 Pendidikan Teknik Elektro

Judul Skripsi : Aplikasi *Fuzzy Logic* untuk Pengendali Motor DC Berbasis Mikrokontroler Atmega8535 Dengan Sensor *Photodiode*

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian skripsi Program Studi S1 Pendidikan Teknik Elektro Universitas Negeri Semarang

Semarang, Oktober 2015

Pembimbing,



Drs. Suryono, M.T.
NIP. 195503161985031001

LEMBAR PENGESAHAN

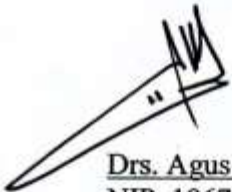
Skripsi ini telah dipertahankan di hadapan sidang panitia ujian skripsi Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang pada tanggal 22 September 2015.

Panitia Ujian:

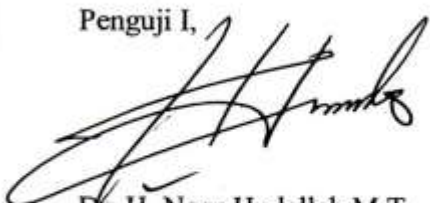
Ketua,


Drs. Suryono, M.T.
NIP. 195503161985031001

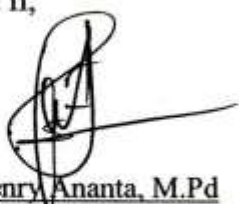
Sekretaris,


Drs. Agus Suryanto, M.T.
NIP. 196708181992031004


Penguji I,


Dr. H. Noor Hudallah M.T.
NIP. 196110161959011001

Penguji II,


Drs. Henry Ananta, M.Pd.
NIP. 195907051986011002

Penguji III/Pembimbing,


Drs. Suryono, M.T.
NIP. 195503161985031001

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik


Dr. H. Muhammad Harlanu, M.Pd.
NIP. 196602151991021001

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO

“Allah tidak akan merubah nasib suatu kaum jika bukan kaum itu sendiri yang merubah ”

(QS. Ar-Ra'du :11)

“Orang-orang yang berhasil di dunia ini adalah orang-orang yang bangun dan mencari situasi yang mereka inginkan dan jika tidak dapat menemukannya, mereka menciptakannya”

(George Bernard Shaw)

PERSEMBAHAN

Kupersembahkan karya ini teruntuk :

- ❖ Bapak dan Ibu ku tercinta terima kasih atas do'a, dukungan, kasih sayang dan perhatian yang tak pernah pudar.
- ❖ Kakak ku, adik-adik ku, dan semua keluarga besarku yang senantiasa memberiku nasihat dalam setiap langkahku.
- ❖ Teman – teman Robotika yang telah memberikan ilmunya
- ❖ Teman – teman satu angkatan PTE 2011

ABSTRAK

Nadhif, Mohamad. 2015. **Aplikasi *Fuzzy Logic* untuk Pengendali Motor DC Berbasis Mikrokontroler Atmega8535 Dengan Sensor *Photodiode***. Pembimbing Drs. Suryono, M.T. Skripsi, Pendidikan Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.

Kata kunci: **kontrol, logika *fuzzy*, motor DC**

Motor DC termasuk dalam kategori jenis motor yang paling banyak digunakan baik dalam lingkungan industri, peralatan rumah tangga hingga ke mainan anak-anak. Perkembangan teknologi kontrol juga mengalami banyak kemajuan dari kontrol konvensional ke kontrol otomatis sampai ke kontrol cerdas. Logika *fuzzy* digunakan sebagai sistem kontrol, karena proses kendali ini relatif mudah dan fleksibel dirancang dengan tidak melibatkan model matematis yang rumit dari sistem yang akan dikendalikan. Tujuan dari penelitian ini adalah mempelajari dan mengaplikasikan metode logika *fuzzy* pada mikrokontroler ATmega8535, untuk mengendalikan kecepatan motor DC serta sebagai kontrol gerak Robot *Line Follower*.

Metode penelitian yang digunakan adalah metode Penelitian dan Pengembangan (*R&D*). Pengujian secara global terbagi menjadi tiga yaitu pengujian sensor, pengujian PWM dan pengujian kontrol logika *fuzzy*. Output *fuzzy* kontroler adalah perintah kendali yang diberikan ke motor DC. Pada sistem pengendalian motor DC ini menggunakan metode Mamdani. Sistem kendali dirancang dengan menggunakan dua buah masukan yang berupa *Error* dan *Delta Error*. Kedua input akan diproses oleh *fuzzy logic controller* (FLC) untuk mendapatkan nilai output berupa sinyal PWM untuk mengontrol motor DC.

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa sistem kendali logika *fuzzy* dengan mikrokontroler ATmega8535 dengan sensor *photodiode* dapat mengontrol kecepatan putar motor DC. Selain itu, metode logika *fuzzy* dapat diimplementasikan pada kontrol gerak Robot *Line Follower*. Saran untuk peneliti selanjutnya agar menggunakan himpunan output lebih banyak sehingga output yang dihasilkan menjadi lebih halus.

KATA PENGANTAR

Puji syukur Penulis haturkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan hidayahNya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul: *“Aplikasi Fuzzy Logic untuk Pengendali Motor DC Berbasis Mikrokontroler Atmega8535 Dengan Sensor Photodiode”*.

Terselesaikannya skripsi ini tidak lepas dari dukungan oleh pihak-pihak yang telah membantu baik secara materiil maupun spiritual. Oleh karena itu penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada:

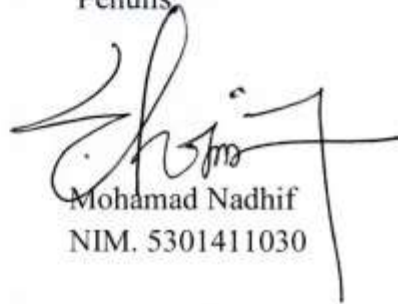
1. Prof. Dr. Fathur Rokhman M.Hum , Rektor Universitas Negeri Semarang.
2. Dr. H. Muhammad Harlanu M.Pd. Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.
3. Drs. Suryono, M.T, Ketua Jurusan Teknik Elektro sekaligus Dosen Pembimbing yang telah memberikan arahan, saran, ilmu dan motivasi dalam penyusunan skripsi.
4. Drs. Henry Ananta, M.Pd. dosen wali yang telah memberikan arahan dan motivasi selama menempuh studi.
5. Dosen penguji yang telah memberikan arahan dan bimbingan.
6. Dosen-dosen Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu dan pengalaman selama menempuh studi.
7. Jurusan Teknik Elektro Universitas Negeri Semarang yang telah memberikan fasilitas untuk tempat penelitian dan pengujian.
8. Sekolah Robotik Pusat Semarang (Fornext) yang telah memberikan fasilitas untuk tempat penelitian dan pengujian.

9. Teman-teman Jurusan Teknik Elektro yang menginspirasi dan memotivasi.
10. Pihak-pihak yang memberikan fasilitas alat dan bahan.
11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, atas motivasi dan doanya.

Semoga karya ini dapat bermanfaat dan bisa dikembangkan.

Semarang, Oktober 2015

Penulis



Mohamad Nadhif
NIM. 5301411030

DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL	i
PERNYATAAN	ii
PERSETUJUAN PEMBIMBING	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
MOTO DAN PERSEMBAHAN	v
ABSTRAK	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Pembatasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
1.6 Penegasan Istilah	5
BAB II LANDASAN TEORI	
2.1 Logika <i>Fuzzy</i>	7
2.2 Himpunan <i>Fuzzy</i>	7

	Halaman
2.3 Fungsi Keanggotaan.....	10
2.4 Operator Logika <i>Fuzzy</i>	14
2.5 Cara Kerja Kontrol Logika <i>Fuzzy</i>	15
2.5.1 Fuzzifikasi.....	17
2.5.2 Aturan Dasar Logika <i>Fuzzy</i>	17
2.5.3 Mesin Penalaran Kontrol Logika <i>Fuzzy</i>	17
2.5.4 Defuzzifikasi	17
2.6 <i>Fuzzy Interference Sistem</i>	17
2.7 Jaringan Terbuka dan Tertutup	21
2.8 Sistem Minimum.....	23
2.9 Motor DC	27
2.10 <i>H-Bridge</i> Mosfet	27
2.11 <i>Liquid Cristal Display (LCD)</i>	30
2.12 Sensor <i>Photodiode</i>	32
2.13 <i>Pulse Width Modulation (PWM)</i>	33
 BAB III METODE PENELITIAN	
3.1 Metode Penelitian	36
3.2 Tempat Penelitian	37
3.3 Alur Penelitian	37
3.4 Alat dan Bahan.....	38
3.5 diagram blok sistem	39
3.6 Perancangan Perangkat Keras.....	40

	Halaman
3.7 Perancangan Perangkat Lunak	45
3.8 Perancangan Kontroler <i>Fuzzy</i> (FLC)	47
3.9 Pengujian Alat.....	52
3.10 Pengambilan Data	52
3.11 Analisis Data.....	53
 BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Hasil Penelitian	54
4.1.1 Pengujian Sensor <i>Photodiode</i>	54
4.1.2 Pengujian Nilai Pwm Terhadap Tegangan Output Dan Kecepatan Motor	56
4.1.3 Pengujian Kontrol Logika <i>Fuzzy</i>	58
4.1.3.1 Program Kontrol Logika <i>Fuzzy</i>	58
4.1.3.2 Pengujian Perangkat Secara Keseluruhan.....	59
4.2 Pembahasan.....	59
4.2.1 Pembahasan Sensor <i>Photodiode</i>	60
4.2.2 Pembahasan Nilai Pwm Terhadap Tegangan Output Dan Kecepatan Motor.....	62
4.2.3 Pembahasan Kontrol Logika <i>Fuzzy</i>	63
4.2.3.1 Program Kontrol Logika <i>Fuzzy</i>	63
4.2.3.2 Pembahasan Perangkat Secara Keseluruhan.....	74

	Halaman
4.3 Pengembangan (<i>Development</i>)	75
BAB V PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	78
5.2 Saran	79
DAFTAR PUSTAKA	80
LAMPIRAN	82

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Fungsi pin out ATmega8535	25
Tabel 2. Tabel Pin output LCD dan deskripsi masing-masing PIN.....	32
Tabel 3. Variabel dan semesta pembicaraan <i>input</i> dan <i>output</i>	47
Tabel 4. Fuzzifikasi <i>input Error</i>	48
Tabel 5. Fuzzifikasi <i>input Delta Error</i>	48
Tabel 6. Fuzzifikasi <i>output PWM</i>	48
Tabel 7. Data Pengukuran Sensor <i>Photodiode</i>	56
Tabel 8. Hasil Pengujian Pengalamatan <i>Input</i> dan <i>Output</i> pada Sismin	57
Tabel 9. Data Hasil Pengujian Proses <i>Fuzzy</i>	58
Tabel 10. Data Hasil Pengujian Proses Keseluruhan.....	59
Tabel 11. Perbandingan hasil pengujian secara program, matematis dan MATLAB	64
Tabel 12. Variabel <i>Error</i>	65
Tabel 13. Variabel <i>Delta Error</i>	66
Tabel 14. Variabel Output PWM.....	67
Tabel 15. Basis Aturan Kendali Logika <i>Fuzzy</i> yang digunakan.	76
Tabel 16. Hasil output pengujian robot pengikut garis.....	77

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Representasi Linear Naik.....	10
Gambar 2. Representasi Linear Turun.....	11
Gambar 3. Representasi Kurva Segitiga.....	12
Gambar 4. Representasi Kurva Trapesium.....	12
Gambar 5. Representasi Kurva Bahu	14
Gambar 6. Blok diagram kontrol logika <i>fuzzy</i>	16
Gambar 7. Kerangka kerja kontrol logika <i>fuzzy</i>	16
Gambar 8. <i>Closed-loop control system</i>	22
Gambar 9. <i>Open-loop control system</i>	23
Gambar 10. Konfigurasi Pin ATmega 8535	25
Gambar 11. Motor DC	27
Gambar 12. Konfigurasi <i>H-Bridge</i> MOSFET	28
Gambar 13. <i>H-bridge</i> konfigurasi MOSFET A&D <i>on</i> , B&C <i>off</i>	29
Gambar 14. <i>H-bridge</i> konfigurasi MOSFET A&D <i>off</i> , B&C <i>on</i>	29
Gambar 15. LCD M1632.....	31
Gambar 16. Simbol dan bentuk <i>photodiode</i>	32
Gambar 17. Gelombang kotak yang memiliki y_{max}, y_{min} dan D.....	34
Gambar 18. Diagram Alur Penelitian.....	38
Gambar 19. Diagram blok sistem.....	39
Gambar 20. Blok diagram sistem perancangan perangkat keras.....	40
Gambar 21. Skematik Rangkaian sistem minimum ATmega 8535.....	41

Gambar 22. Skematik Rangkaian <i>H-bridge</i> Mosfet	42
Gambar 23. Skematik Rangkaian <i>Photodiode</i>	43
Gambar 24. Skematik Rangkaian LCD 2x16	44
Gambar 25. Skematik Rangkaian <i>Switch push button</i>	44
Gambar 26. Diagram alir program utama.....	46
Gambar 27. Fuzzifikasi <i>input error</i>	49
Gambar 28. Fuzzifikasi <i>input delta error</i>	49
Gambar 29. Fuzzifikasi <i>output PWM</i>	50
Gambar 30. Proses <i>defuzzy</i>	51
Gambar 31. Konsep Pemantulan LED di Lapangan	54
Gambar 32. Sistem Pembacaan ADC pada Sensor	55
Gambar 33. Himpunan <i>Fuzzy Error</i>	65
Gambar 34. Himpunan <i>Fuzzy Delta Error</i>	66
Gambar 35. Himpunan <i>Fuzzy Output PWM</i>	67
Gambar 36. Aplikasi fungsi implikasi untuk R1	68
Gambar 37. Aplikasi fungsi implikasi untuk R2.....	68
Gambar 38. Aplikasi fungsi implikasi untuk R3.....	69
Gambar 39. Aplikasi fungsi implikasi untuk R4.....	69
Gambar 40. Daerah hasil komposisi.....	70
Gambar 41. Tampilan awal program.....	71
Gambar 42. Tampilan <i>Membership Funtion Error</i>	71
Gambar 43. Tampilan <i>Membership Funtion Delta Error</i>	72

	Halaman
Gambar 44. Tampilan <i>Membership Funtion</i> Output PWM.....	72
Gambar 45. Tampilan <i>Rule Editor</i>	73
Gambar 46. Tampilan <i>Rule Viewer</i>	73

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Surat Keputusan Pembimbing	83
Lampiran 2. Desain Rangkaian Alat	84
Lampiran 3. Hasil perhitungan logika <i>fuzzy</i> secara matematis program kontrol	85
Lampiran 4. Hasil pengujian dengan MATLAB program kontrol	106
Lampiran 5. Hasil perhitungan logika <i>fuzzy</i> secara matematis perangkat secara keseluruhan	111
Lampiran 6. Hasil pengujian dengan MATLAB perangkat secara keseluruhan	136
Lampiran 7. Listing program	142
Lampiran 8. Surat penelitian di Laboratorium Teknik Elektro UNNES	149
Lampiran 9. Lembar Evaluasi	150
Lampiran 10. Surat Keterangan hasil evaluasi perangkat Penelitian di Fornext Semarang	153
Lampiran 11. Dokumentasi	154

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Motor DC (*Direct Current*) atau motor arus searah termasuk dalam kategori jenis motor yang paling banyak digunakan baik dalam lingkungan industri, peralatan rumah tangga hingga ke mainan anak-anak ataupun sebagai piranti pendukung sistem instrumen elektronik. Motor DC memiliki jenis yang beragam mulai dari tipe magnet permanen, seri, shunt ataupun jenis magnet kompon. Tipe motor DC diimplementasikan berdasarkan jenis magnet yang digunakan. Kelebihan motor DC memiliki torsi yang tinggi, tidak memiliki kerugian daya reaktif dan tidak menimbulkan harmonisa pada sistem tenaga listrik yang mensuplainya. Selain torsi motor DC juga memiliki akurasi kontrol yang tinggi sehingga motor DC sering digunakan untuk aplikasi servo seperti pengendali kecepatan pemintal benang atau pengendali posisi antena penerima satelit (Sukmadi, 2006: 28).

Perkembangan teknologi komputer baik *hardware* maupun *software* terus berkembang seiring perkembangan teknologi elektronika yang semakin maju, demikian juga teknologi kontrol yang mengalami banyak kemajuan dari kontrol konvensional ke kontrol otomatis sampai ke kontrol cerdas (Ali, 2004: 1). Kontrol otomatis memainkan peranan penting dalam sains dan rekayasa modern. Disamping untuk kepentingan khusus seperti *space-vehicle system*, *missile-*

guidance system, robotic system, kontrol otomatis telah menjadi bagian integral yang penting dalam manufaktur modern dan industri proses (Rizal, 2012: 1).

Dalam suatu sistem kontrol kita mengenal adanya beberapa macam aksi kontrol, diantaranya yaitu aksi kontrol proporsional, aksi kontrol integral dan aksi kontrol derivative. Masing-masing aksi kontrol ini mempunyai keunggulan-keunggulan tertentu, dimana aksi kontrol proporsional mempunyai keunggulan risetime yang cepat, aksi kontrol integral mempunyai keunggulan untuk memperkecil *error*, dan aksi kontrol derivative mempunyai keunggulan untuk memperkecil *derror* atau meredam *overshot/undershot*. Untuk itu agar kita dapat menghasilkan output dengan risetime yang tinggi dan error yang kecil kita dapat menggabungkan ketiga aksi kontrol ini menjadi aksi kontrol PID (Bachri M., 2004: 25).

Salah satu implementasi PID dalam kontrol kecepatan putar motor DC yaitu pada robot pengikut garis (*line follower robot*). Ada beberapa rangkaian utama yang diperlukan dalam robot line follower, rangkain tersebut adalah *photodiode* sebagai sensor, driver motor sebagai penggerak motor dan ATmega8535 sebagai otak dari robot. Mikrokontroler ATmega8535 akan membaca data masukan dari sensor kemudian mengolah data tersebut dan meneruskan ke driver motor sebagai penggerak pergerakan robot. Hanya disini diperlukan untuk mengetahui model matematika dari system atau membuat beberapa eksperimen untuk penyetelan (*tunning*) parameter PID. Bagaimanapun, telah diketahui bahwa pengontrol konvensional PID biasanya tidak bekerja dengan baik untuk system non-linear, dan pada system yang rumit dan kompleks,

tidak punya model matematika yang tepat (Winarno, 2009: E-42). Dengan demikian diperlukan adanya suatu system kendali yang tidak perlu membuat beberapa eksperimen untuk penyetelan (*tunning*) dalam kontrol kecepatan putar motor DC.

Di lain pihak juga berkembang suatu teknologi kontrol yang tidak lagi memakai cara konvensional untuk mendapatkan suatu hasil yang diinginkan melalui persamaan matematika. Tetapi dengan menerapkan suatu sistem kemampuan manusia untuk mengendalikan sesuatu, yaitu dalam bentuk aturan-aturan jika-maka (*If-Then Rules*), sehingga proses pengendalian akan mengikuti pendekatan secara linguistik, sistem ini disebut dengan sistem kendali logika *fuzzy*, yang mana sistem kendali logika *fuzzy* merupakan sistem kendali yang tidak memiliki ketergantungan pada variabel-variabel proses kendali (Bachri M., 2004: 25-26).

Telah banyak aplikasi sistem kontrol dengan menggunakan sistem *fuzzy*, karena proses kendali ini relatif mudah dan fleksibel dirancang dengan tidak melibatkan model matematis yang rumit dari sistem yang akan dikendalikan. Pengontrolan dengan sistem kendali logika *fuzzy* memiliki keuntungan dalam mengatasi permasalahan pada pengontrolan non linier dan adaptif. Sistem kendali logika *fuzzy* menggunakan pendekatan berdasarkan sifat dan perasaan manusia, sehingga algoritma perancangan yang digunakan pada sistem kendali logika *fuzzy* mudah dimengerti oleh setiap orang dan respon pengontrolannya menjadi lebih halus.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, permasalahan yang menjadi fokus dalam kajian ini adalah:

1. Bagaimana mengontrol kecepatan putar motor DC dengan sistem kendali logika *fuzzy* dengan mikrokontroler ATmega8535 dan menggunakan sensor *photodiode*?
2. Apakah metode logika *fuzzy* dapat di implementasikan pada kontrol gerak Robot *Line Follower*?

1.3 Pembatasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menggunakan mikrokontroler ATmega8535, sensor *photodiode* sebagai data masukan dan PWM sebagai penggerak motor DC.
2. Inputan sensor *photodiode* hanya menggunakan dua variabel (kecil dan besar) dengan nilai 0 sampai 255.
3. Outputan PWM juga menggunakan dua variabel (pelan dan cepat) dengan nilai 0 sampai 1000.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mempelajari dan mengaplikasikan metode logika *fuzzy* pada mikrokontroler ATmega8535.
2. Mempelajari dan mengaplikasikan metode logika *fuzzy* untuk mengendalikan kecepatan motor DC.

3. Mempelajari dan mengaplikasikan metode logika *fuzzy* sebagai kontrol gerak Robot *Line Follower*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui sistem kontrol logika *fuzzy* dapat di aplikasikan pada mikrokontroler ATmega8535.
2. Mengetahui sistem kendali logika *fuzzy* dapat digunakan sebagai kontrol pada motor DC.
3. Mengetahui metode logika *fuzzy* dapat di implementasikan sebagai kontrol gerak Robot *Line Follower*.

1.6 Penegasan Istilah

Untuk memudahkan pemahaman dan menghindari kesalahan penafsiran terhadap penelitian ini, maka perlu dijabarkan beberapa istilah pokok dalam penelitian ini antara lain:

1.6.1 Mikrokontroler

Sistem mikroprosesor lengkap yang terkandung di dalam sebuah chip. Mikrokontroler berbeda dari mikroprosesor serba guna yang digunakan dalam sebuah PC, karena di dalam sebuah mikrokontroler umumnya juga telah berisi komponen pendukung sistem minimal mikroprosesor, yakni memori dan antarmuka I/O, sedangkan di dalam mikroprosesor umumnya hanya berisi CPU saja.

1.6.2 Sistem Kontrol

Suatu alat (kumpulan alat) untuk mengendalikan, memerintah, dan mengatur keadaan dari suatu sistem.

1.6.3 Robot Line Follower

Robot yang dapat bergerak mengikuti garis secara otomatis.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Logika *Fuzzy*

Logika *Fuzzy* (*Fuzzy Logic*) adalah metodologi sistem kontrol pemecahan masalah, yang cocok untuk diimplementasikan pada sistem, mulai dari sistem yang sederhana, sistem kecil, *embedded system*, jaringan PC, multi channel atau *workstation* berbasis akuisisi data, dan sistem kontrol. Metodologi ini dapat diterapkan pada perangkat keras, perangkat lunak, atau kombinasi keduanya (Widiyantoro, 2014: 70).

Logika *Fuzzy* pertama kali diperkenalkan oleh Prof. Lotfi A. Zadeh dari California University pada tahun 1965 sebagai cara matematis untuk merepresentasikan ketidakpastian linguistik. Dasar logika *fuzzy* adalah teori himpunan *fuzzy*. Pada teori himpunan *fuzzy*, peranan derajat keanggotaan atau nilai keanggotaan sebagai penentu keberadaan elemen dalam suatu himpunan sangatlah penting. Logika *fuzzy* sangat berguna untuk menyelesaikan banyak permasalahan dalam berbagai bidang yang biasanya memuat derajat ketidakpastian (Suwintana, 2013: 39).

2.2 Himpunan *Fuzzy*

Himpunan *fuzzy* adalah bentuk umum dari himpunan biasa yang memiliki tingkat keanggotaan dari tiap-tiap elemen yang dibatasi dengan interval $[0,1]$, oleh karena itu, fungsi keanggotaan himpunan *fuzzy* memetakan setiap elemen dari

semesta dalam batas ruang yang dalam kebanyakan kasus diasumsikan sebagai unit interval.

Menurut Kusumadewi (2004) perbedaan antara himpunan *crisp* dan himpunan *fuzzy* adalah himpunan *crisp* nilai keanggotaan hanya ada 2 kemungkinan, yaitu 0 atau 1, pada himpunan *fuzzy* nilai keanggotaan terletak pada rentang 0 sampai 1. Apabila x memiliki nilai keanggotaan *fuzzy* $\mu_A[x]=0$ berarti x tidak menjadi anggota himpunan A , demikian pula apabila x memiliki nilai keanggotaan *fuzzy* $\mu_A[x]=1$ berarti x menjadi anggota penuh himpunan A .

Himpunan *fuzzy* memiliki 2 atribut, yaitu:

- a. Linguistik, yaitu penamaan suatu grup yang mewakili suatu keadaan atau kondisi tertentu dengan menggunakan bahasa alami, seperti: MUDA, PAROBAYA, TUA.
- b. Numeris, yaitu suatu nilai (angka) yang menunjukkan ukuran dari suatu variabel seperti: 40, 25, 50, dan sebagainya.

Ada beberapa hal yang perlu diketahui dalam memahami sistem *fuzzy*, yaitu:

- a. Variabel *fuzzy*

Variabel *fuzzy* merupakan variabel yang hendak dibahas dalam suatu sistem *fuzzy*. Contoh: umur, temperatur, permintaan, dan sebagainya.

- b. Himpunan *fuzzy*

Himpunan *fuzzy* merupakan suatu grup yang mewakili suatu kondisi atau keadaan tertentu dalam suatu variabel *fuzzy*.

Contoh:

Variabel umur, terbagi menjadi 3 himpunan *fuzzy* yaitu: MUDA, PAROBAYA, dan TUA.

c. Semesta Pembicaraan

Semesta pembicaraan adalah keseluruhan nilai yang diperbolehkan untuk dioperasikan dalam suatu variabel *fuzzy*. Semesta pembicaraan merupakan himpunan bilangan real yang senantiasa naik (bertambah) secara monoton dari kiri ke kanan. Nilai semesta pembicaraan dapat berupa bilangan positif maupun negatif. Adakalanya nilai semesta pembicaraan ini tidak dibatasi batas atasnya.

Contoh:

- 1) Semesta pembicaraan untuk variabel umur: $[0 +\infty)$
- 2) Semesta pembicaraan untuk variabel temperatur: $[0 40]$

d. Domain

Domain himpunan *fuzzy* adalah keseluruhan nilai yang diijinkan dalam semesta pembicaraan dan boleh dioperasikan dalam suatu himpunan *fuzzy*. Seperti halnya semesta pembicaraan, domain merupakan himpunan bilangan real yang senantiasa naik (bertambah) secara monoton dari kiri ke kanan. Nilai domain dapat berupa bilangan positif maupun negatif.

Contoh domain himpunan *fuzzy*:

- 1) MUDA = $[0 45]$
- 2) PAROBAYA = $[35 55]$
- 3) TUA = $[45 +\infty]$

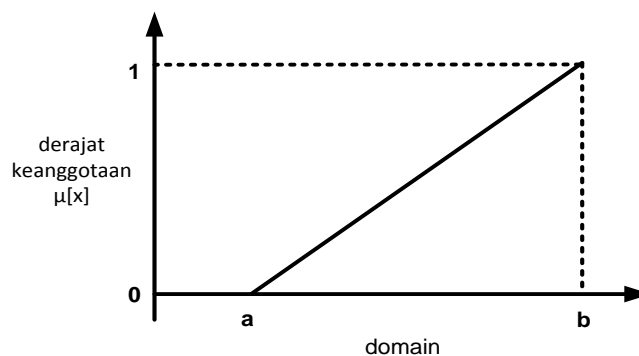
2.3 Fungsi Keanggotaan

Menurut Kusumadewi (2004) Fungsi Keanggotaan (*membership function*) adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik input data ke dalam nilai keanggotaannya (sering juga disebut dengan derajat keanggotaan) yang memiliki interval antara 0 sampai 1. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai keanggotaan adalah dengan melalui pendekatan fungsi. Ada beberapa fungsi yang bisa digunakan.

a. Representasi Linear

Pada representasi linear, pemetaan *input* ke derajat keanggotaannya digambarkan sebagai suatu garis lurus. Bentuk ini paling sederhana dan menjadi pilihan yang baik untuk mendekati suatu konsep yang kurang jelas.

Ada 2 keadaan himpunan *fuzzy* yang linear. Pertama, kenaikan himpunan dimulai pada nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan nol [0] bergerak ke kanan menuju ke nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih tinggi seperti pada Gambar 1.

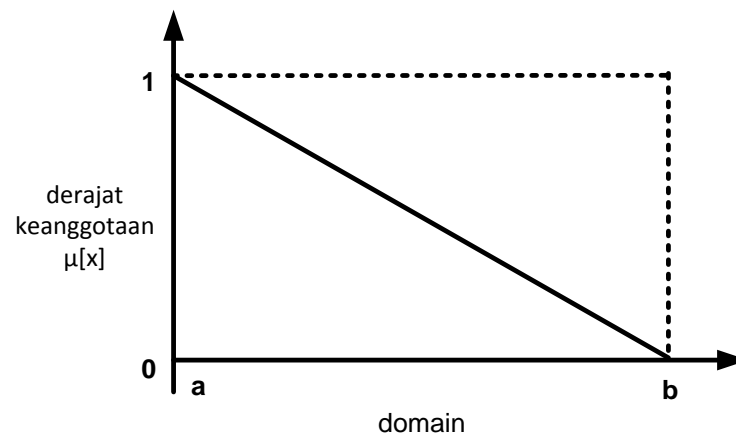


Gambar 1. Representasi Linear Naik

Persamaan fungsi keanggotaan linear naik:

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ 1; & x \geq b \end{cases}$$

Kedua, merupakan kebalikan yang pertama. Garis lurus dimulai dari nilai domain dengan derajat keanggotaan tertinggi pada sisi kiri, kemudian bergerak menurun ke nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih rendah seperti pada Gambar 2.



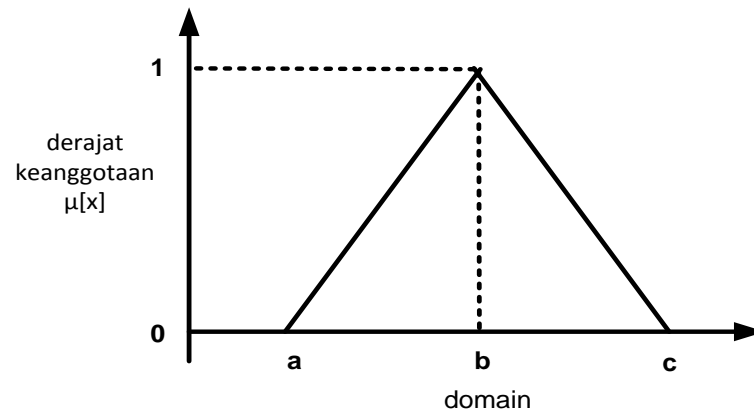
Gambar 2. Representasi Linear Turun

Fungsi keanggotaan linear turun :

$$\mu[x] = \begin{cases} (b - x)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ 0; & x \geq b \end{cases}$$

b. Representasi Kurva Segitiga

Kurva Segitiga pada dasarnya merupakan gabungan antara 2 garis (linear) seperti terlihat pada Gambar 3.



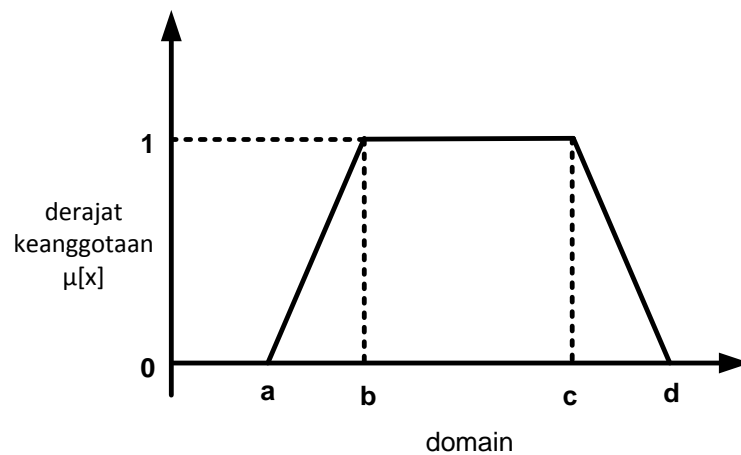
Gambar 3. Representasi Kurva Segitiga

Persamaan fungsi keanggotaan kurva segitiga:

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ (a-x)/(b-a); & a \leq x \leq b \\ (c-x)/(c-b); & b \leq x \leq c \end{cases}$$

c. Representasi Kurva Trapesium

Kurva Segitiga pada dasarnya seperti bentuk segitiga, hanya saja ada beberapa titik yang memiliki nilai keanggotaan 1 seperti pada Gambar 4.



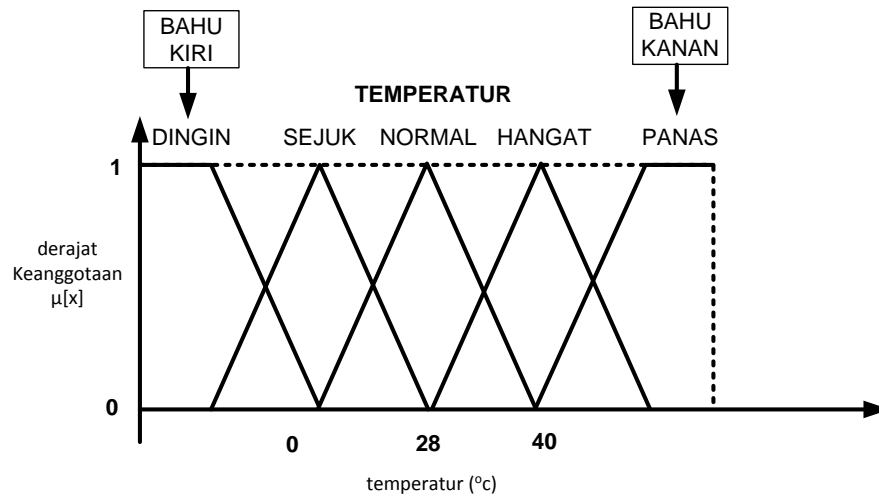
Gambar 4. Representasi Kurva Trapesium

Persamaan fungsi keanggotaan Kurva Trapesium :

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \leq a \text{ atau } x \geq d \\ \left(\frac{x-a}{b-a}\right); & a \leq x \leq b \\ 1; & b \leq x \leq c \\ \left(\frac{d-x}{d-c}\right); & c \leq x \leq d \end{cases}$$

d. Representasi Kurva Bentuk Bahu

Daerah yang terletak di tengah-tengah suatu variabel yang direpresentasikan dalam bentuk segitiga, pada sisi kanan dan kirinya akan naik dan turun (misalkan: DINGIN bergerak ke SEJUK bergerak ke HANGAT dan bergerak ke PANAS). Tetapi terkadang salah satu sisi dari variabel tersebut tidak mengalami perubahan. Sebagai contoh, apabila telah mencapai kondisi PANAS, kenaikan temperatur akan tetap berada pada kondisi PANAS. Himpunan *fuzzy* ‘bahu’, bukan segitiga, digunakan untuk mengakhiri variabel suatu daerah *fuzzy*. Bahu kiri bergerak dari benar ke salah, demikian juga bahu kanan bergerak dari salah ke benar. Gambar 5 menunjukkan variabel TEMPERATUR dengan daerah bahunya.



Gambar 5. Representasi Kurva Bahu

2.4 Operator Logika Fuzzy

Seperti halnya himpunan konvensional, ada beberapa operasi yang didefinisikan secara khusus untuk mengkombinasi dan memodifikasi himpunan *fuzzy*. Nilai keanggotaan sebagai hasil dari operasi 2 himpunan sering dikenal dengan nama *fire strength* atau α -predikat. Ada 3 operator dasar yang diciptakan oleh Zadeh, yaitu:

a) Operator AND

Operator ini berhubungan dengan operasi interseksi pada himpunan. α -predikat sebagai hasil operasi dengan operator AND diperoleh dengan mengambil nilai keanggotaan terkecil antar elemen pada himpunan- himpunan yang bersangkutan.

$$\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A[x], \mu_B[y])$$

b) Operator OR

Operator ini berhubungan dengan operasi union pada himpunan. α -predikat sebagai hasil operasi dengan operator OR diperoleh dengan mengambil nilai keanggotaan terbesar antar elemen pada himpunan- himpunan yang bersangkutan.

$$\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A[x], \mu_B[y])$$

c) Operator NOT

Operator ini berhubungan dengan operasi komplemen pada himpunan. α -predikat sebagai hasil operasi dengan operator NOT diperoleh dengan mengurangi nilai keanggotaan elemen pada himpunan yang bersangkutan dari 1.

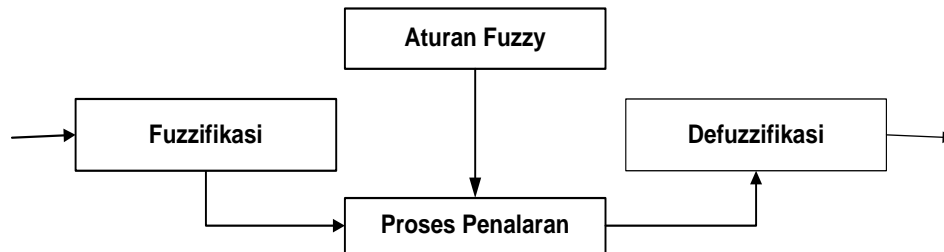
$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A[x]$$

2.5 Cara Kerja Kontrol Logika *Fuzzy*

Dalam sistem kontrol logika *fuzzy* terdapat beberapa tahapan operasional meliputi:

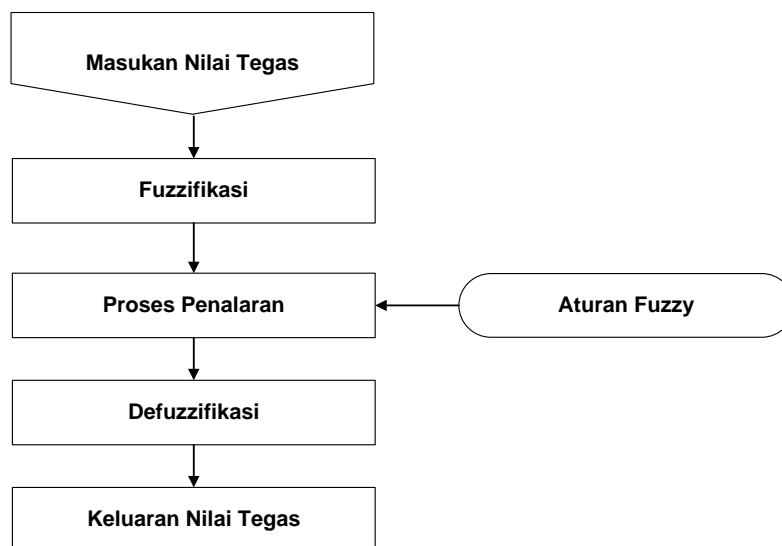
- 1) Fuzzifikasi.
- 2) Mesin Penalaran atau Inference Engine.
- 3) Aturan Dasar (*Fuzzy Rule*).
- 4) Defuzzifikasi.

Blok diagram kontrol logika *fuzzy* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Blok diagram kontrol logika *fuzzy*

Kerangka operasional kontrol logika *fuzzy* ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Kerangka kerja kontrol logika *fuzzy*

Dari Gambar 7 sinyal masukan dari kontrol logika *fuzzy* dapat berupa nilai tegas. Sinyal masukan kontrol logika *fuzzy* dapat diambilkan dari.

1. Selisih antara nilai rujukan (*reference*) dengan nilai keluaran nyata dari kontrol logika *fuzzy* yang berupa nilai kesalahan ($error = E$).
2. Turunan pertama dari nilai error yang dikenal dengan delta error = dE

2.5.1 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi yaitu suatu proses untuk mengubah suatu masukan dari bentuk tegas (*crisp*) menjadi *fuzzy* (variabel linguistik) yang biasanya disajikan dalam bentuk himpunan-himpunan *fuzzy* dengan suatu fungsi keanggotaannya masing-masing.

2.5.2 Aturan Dasar Logika Fuzzy

Aturan dasar atau *rule base* pada kontrol logika *fuzzy* merupakan suatu bentuk aturan relasi/implikasi “Jika-Maka” atau “*If-Then*” seperti pada pernyataan berikut:

“*if x is A then y is B*” dimana A dan B adalah *linguistic values* yang didefinisikan dalam rentang variabel X dan Y. Pernyataan “x is A” disebut *antecedent* atau premis. Pernyataan “y is B” disebut *consequent* atau kesimpulan.

2.5.3 Mesin Penalaran Kontrol Logika Fuzzy (*Inference Engine*)

Mesin penalaran (*Inference Engine*) adalah proses implikasi dalam menalar nilai masukan guna penentuan nilai keluar sebagai bentuk pengambil keputusan.

2.5.4 Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan proses pemetaan himpunan *fuzzy* kemampuan tegas (*crisp*) proses ini merupakan kebalikan dari proses fuzzifikasi.

2.6 Fuzzy Inference Sistem

Salah satu aplikasi logika *fuzzy* yang telah berkembang amat luas dewasa ini adalah sistem inferensi *fuzzy* (*Fuzzy Inference System / FIS*), yaitu kerangka komputasi yang didasarkan pada teori himpunan *fuzzy*, aturan *fuzzy* berbentuk

IFTHEN, dan penalaran *fuzzy*. Misalnya dalam penentuan status gizi, produksi barang, sistem pendukung keputusan, penentuan kebutuhan kalori harian, dan sebagainya. Terdapat beberapa metode dalam sistem inferensi *fuzzy* yang sering digunakan, yaitu metode Tsukamoto, metode Mamdani, dan metode Takagi Sugeno (Suwintana, 2013: 39-40).

Menurut Kusumadewi (2004), metode Mamdani sering juga dikenal dengan nama Metode Max-Min. Metode ini diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975. Untuk mendapatkan output, diperlukan 4 tahapan:

1. Pembentukan himpunan *fuzzy*

Pada Metode Mamdani, baik variabel *input* maupun variabel output dibagi menjadi satu atau lebih himpunan *fuzzy*.

2. Aplikasi fungsi implikasi

Pada Metode Mamdani, fungsi implikasi yang digunakan adalah Min.

3. Komposisi Aturan

Tidak seperti penalaran monoton, apabila sistem terdiri-dari beberapa aturan, maka inferensi diperoleh dari kumpulan dan korelasi antar aturan. Ada 3 metode yang digunakan dalam melakukan inferensi sistem fuzzy, yaitu: max, additive dan probabilistik OR (probor).

- a) Metode Max (*Maximum*)

Pada metode ini, solusi himpunan *fuzzy* diperoleh dengan cara mengambil nilai maksimum aturan, kemudian menggunakannya untuk memodifikasi daerah *fuzzy*, dan mengaplikasikannya ke output dengan menggunakan operator OR (union). Jika semua proposisi telah

dievaluasi, maka output akan berisi suatu himpunan *fuzzy* yang merefleksikan kontribusi dari tiap-tiap proposisi. Secara umum dapat dituliskan:

$$\mu_{sf}[x_i] \leftarrow \max(\mu_{sf}[x_i], \mu_{kf}[x_i])$$

dengan:

$$\mu_{sf}[x_i] = \text{nilai keanggotaan solusi } \textit{fuzzy} \text{ sampai aturan ke-}i;$$

$$\mu_{kf}[x_i] = \text{nilai keanggotaan konsekuen } \textit{fuzzy} \text{ aturan ke-}i;$$

Apabila digunakan fungsi implikasi MIN, maka metode komposisi ini sering disebut dengan nama MAX-MIN atau MIN-MAX atau MAMDANI.

b) Metode Additive (*Sum*)

Pada metode ini, solusi himpunan *fuzzy* diperoleh dengan cara melakukan bounded-sum terhadap semua output daerah *fuzzy*. Secara umum dituliskan:

$$\mu_{sf}[x_i] \leftarrow \min(1, \mu_{sf}[x_i] + \mu_{kf}[x_i])$$

dengan:

$$\mu_{sf}[x_i] = \text{nilai keanggotaan solusi } \textit{fuzzy} \text{ sampai aturan ke-}i;$$

$$\mu_{kf}[x_i] = \text{nilai keanggotaan konsekuen } \textit{fuzzy} \text{ aturan ke-}i;$$

c) Metode Probabilistik OR (*probor*)

Pada metode ini, solusi himpunan *fuzzy* diperoleh dengan cara melakukan product terhadap semua output daerah *fuzzy*. Secara umum dituliskan:

$$\mu_{sf}[xi] \leftarrow (\mu_{sf}[x_i] + \mu_{kf}[x_i]) - (\mu_{sf}[x_i] - \mu_{kf}[x_i])$$

dengan:

$$\mu_{sf}[x_i] = \text{nilai keanggotaan solusi fuzzy sampai aturan ke-}i;$$

$$\mu_{kf}[x_i] = \text{nilai keanggotaan konsekuen fuzzy aturan ke-}i;$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

Input dari proses defuzzifikasi adalah suatu himpunan *fuzzy* yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan *fuzzy*, sedangkan output yang dihasilkan merupakan suatu bilangan pada domain himpunan *fuzzy* tersebut. Sehingga jika diberikan suatu himpunan *fuzzy* dalam range tertentu, maka harus dapat diambil suatu nilai *crisp* tertentu sebagai output.

Ada beberapa metode defuzzifikasi pada komposisi aturan MAMDANI, antara lain:

a. Metode Centroid (*Composite Moment*)

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil titik pusat (z^*) daerah *fuzzy*. Secara umum dirumuskan:

$$z^* = \frac{\int_z z\mu(z)dz}{\int_z \mu(z)dz} \text{ untuk variabel kontinu}$$

$$z^* = \frac{\sum_{j=i}^n z_j \mu(z_j)}{\sum_{j=i}^n \mu(z_j)} \text{ untuk variabel diskrit}$$

b. Metode Bisektor

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai pada domain *fuzzy* yang memiliki nilai keanggotaan setengah dari jumlah total nilai keanggotaan pada daerah *fuzzy*. Secara umum dituliskan:

$$z_p \text{ sedemikian sehingga } \int_{R_i}^p \mu(z) dz = \int_p^{R_n} \mu(z) dz$$

c. Metode *Mean of Maximum* (MOM)

Pada metode ini, solusi crisp diperoleh dengan cara mengambil nilai rata-rata domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.

d. Metode *Largest of Maximum* (LOM)

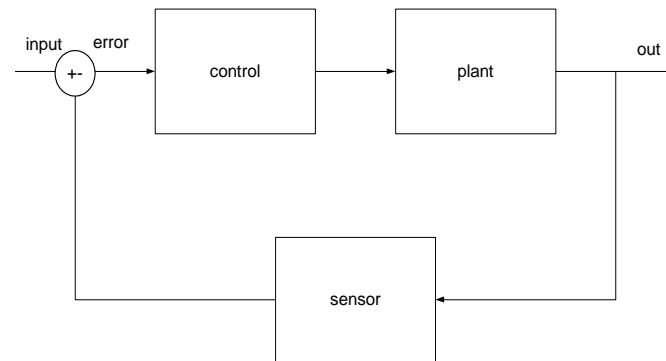
Pada metode ini, solusi crisp diperoleh dengan cara mengambil nilai terbesar dari domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.

e. Metode *Smallest of Maximum* (SOM)

Pada metode ini, solusi crisp diperoleh dengan cara mengambil nilai terkecil dari domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.

2.7 Jaringan Terbuka dan Tertutup

Sistem kontrol dengan jaringan tertutup (*closed-loop control system*) adalah sistem pengontrolan dimana besaran keluaran memberikan efek terhadap besaran masukan sehingga besaran yang dikontrol dapat dibandingkan terhadap harga yang diinginkan melalui alat pencatat (indikator atau recorder). Selanjutnya perbedaan harga yang terjadi antara besaran yang dikontrol dan penunjukkan alat pencatat digunakan sebagai koreksi yang pada gilirannya akan merupakan sasaran pengontrolan.



Gambar 8. *Closed-loop control system*

Parameter pada *closed loop* kontrol sistem secara umum terdiri dari:

1. Input

Elemen ini berfungsi untuk mengubah besaran yang dikontrol menjadi sinyal masukan acuan bagi sistem *control*.

2. Error

Sinyal umpan balik, bisa merupakan selisih antara input setpoint dan output yang dijadikan sebagai sinyal umpan balik.

3. Control

Berfungsi untuk memproses kesalahan (*error*) yang terjadi setelah kesalahan tersebut dilewatkan (dimasukkan) melalui elemen pengontrol, akan dihasilkan sinyal yang berfungsi sebagai pegontrol proses.

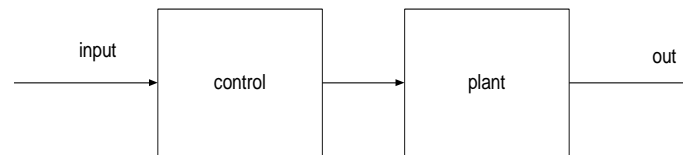
4. Plant

Elemen ini dapat berupa proses mekanis, listrik, hidaulis, pneumatic maupun kombinasinya.

5. Sensor

Bagian sistem yang mengukur keluaran yang dikontrol dan kemudian mengubahnya menjadi umpan balik (*feedback signal*).

Sistem terbuka (*open-loop control system*) adalah kontrol dimana keluaran tidak memberikan efek terhadap saluran masukan, sehingga variabel yang dikontrol tidak dibandingkan terhadap harga yang diinginkan.



Gambar 9. *Open-loop control system*

Parameter dari *system*:

1. Input adalah sebagai sinyal masukan bagi control.
2. Control adalah bagian dari sistem yang berfungsi mengontrol dari masukan dari input.
3. Plant adalah elemen yang dikontrol, bisa berupa mekanis, elektris, dan sebagainya.

2.8 Sistem Minimum

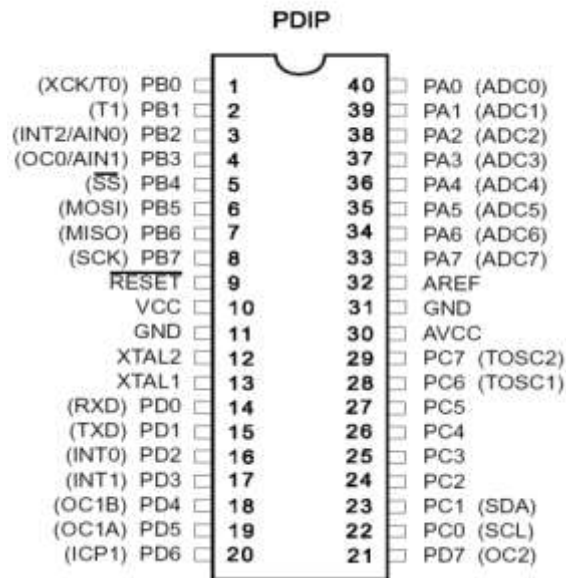
Sistem minimum ATmega8535 merupakan sistem yang terdiri dari komponen utama yaitu ATmega8535 dan X-tal sebagai sumber Clock. ATmega8535 merupakan salah satu produk dari ATMEL yang memiliki arsitektur Harvard yaitu memisahkan memori untuk kode program dan memori untuk data sehingga dapat memaksimalkan kinerja mikrokontrol tersebut. Instruksi-instruksi dalam memori program dieksekusi dalam satu alur tunggal (setiap satu *siklus clock*), dimana pada saat instruksi dikerjakan instruksi berikutnya sudah diambil (*pre-fetched*) dari memori program.

Fitur yang dimiliki mikrokontroler ATmega8535 memiliki keunggulan

yang lebih dibandingkan dengan keluarga mikrokontroler sebelumnya.

Mikrokontroler ATmega8535 memiliki fitur-fitur utama, seperti berikut:

- 1) 130 macam instruksi, yang hamper semuanya dieksekusi dalam satu siklus clock.
- 2) 32 x 8-bit register serba guna.
- 3) Kecepatan mencapai 16 MIPS dengan clock 16 MHz.
- 4) 8 *kbytes Flash Memori*, yang memiliki fasilitas in-system programming.
- 5) 512 byte internal EEPROM.
- 6) 512 byte internal SRAM.
- 7) Program lock, fasilitas untuk mengamankan kode program.
- 8) 2 buah timer/counter 8-bit dan 1 buah timer / counter 16-bit.
- 9) 4 channel output PWM.
- 10) 8-channel ADC 10-bit.
- 11) Serial USART.
- 12) Master/slave SPI serial interface.
- 13) Serial TWI atau I2C
- 14) On-Chip Analog Comparator.



Gambar 10. Konfigurasi Pin ATmega 8535

Adapun fungsi dari pinout ATmega 8535 tersebut adalah sebagai berikut:

Tabel 1.

Fungsi pinout ATmega8535

PIN	KETERANGAN
(1)	(2)
1.8	<p>Port B, merupakan port i/o 8-bit dua arah (bi-directional) dengan resistor pull-up internal. selain sebagai port i/o 8-bit port B juga dapat difungsikan secara individu sebagai berikut</p> <p>PB7: SCK (SPI bus serial Clock)</p> <p>PB6: MISO (SPI bus Master Input/Slave Output)</p> <p>PB5: MOSI (SPI bus Master output/Slave input)</p> <p>PB4: SS (SPI Slave Select input)</p> <p>PB3: AIN1 (Analog Comparrator Negatif Input) output compare timer/counter 0)</p> <p>PB2: AIN0 (Analog Comparrator Positif Input) (external interrupt 2 input)</p> <p>PB1: T1 (Timer/Counter 1 External Counter Input)</p> <p>PB0: T0 (Timer/Counter 0 External Counter Input)</p> <p>XCK (USART External Clock Input/Output)</p>

9	RESET ,merupakan pin reset yang akan bekerja bila diberi pulsa rendah (aktif low) selama minimal 1.5 us.
10	VCC, catu daya digital
11	GND, ground untuk catu daya digital
12	XTAL2, merupakan output dari penguat osilator pembalik
13	XTAL1, merupakan input dari penguat osilator pembalik dan input ke internal clock
14.21	Port D, merupakan port i/o 8-bit dua arah (bi-directional) dengan resistor pull-up internal. selain sebagai port i/o 8-bit port D juga dapat difungsikan secara individu sebagai berikut PD7: OC2 (Output Compare Timer/counter2) PD6: ICP1 (Timer/counter1 Input Capture) PD5: OC1A (Output Compare A Timer/counter1) PD4: OC1B (Output Compare B Timer/counter1) PD3: INT1 (External Interrup 1 Input) PD2: INT0 (External Interrup 0 Input) PD1: TXD (USART Transmit) PD0: RXD (USART Recive)
22.29	Port C, merupakan port i/o 8-bit dua arah (bi-directional) dengan
	resistor pull-up internal. selain sebagai port i/o 8-bit 4 bit port C juga dapat difungsikan secara individu sebagai berikut PD7: TOSC2 (Timer Osillator 2) PD6: TOSC1 (Timer Osillator 1) PD1: SDA (Serial data Input/Output, I2C) PD0: SCL (Serial Clock, I2C)
30	AVCC, merupakan catu daya yang digunakan untuk masukan analog ADC yang terhubung ke Port A.
31	GND, ground untuk catu daya analog.
32	AREF, merupakan tegangan referensi analog untuk ADC.
33.40	Port A, merupakan port i/o 8-bit dua arah (bi-directional) dengan resistor pull-up internal. selain sebagai port i/o 8-bit port A juga dapat difungsikan sebagai masukan 8 channel ADC.

(Sumber : Bejo, 2008)

2.9 Motor DC

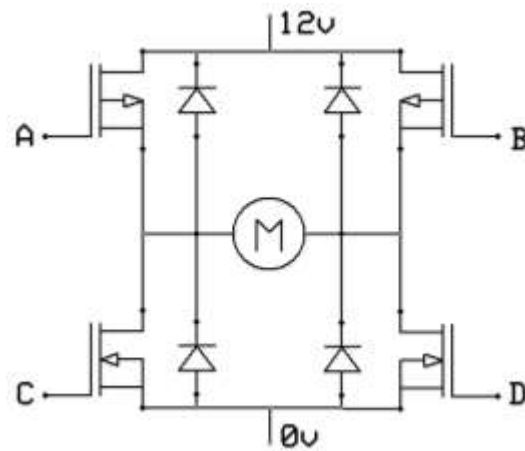
Motor listrik merupakan perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik (Renreng, 2012: 351). Motor DC merupakan jenis motor yang menggunakan tegangan searah sebagai sumber tenaganya. Dengan memberikan beda tegangan pada kedua terminal tersebut, motor akan berputar pada satu arah, dan bila polaritas dari tegangan tersebut dibalik maka arah putaran motor akan terbalik pula. Polaritas dari tegangan yang diberikan pada dua terminal menentukan arah putaran motor sedangkan besar dari beda tegangan pada kedua terminal menentukan kecepatan motor (Yohannes, 2011: 66-67).



Gambar 11. Motor DC

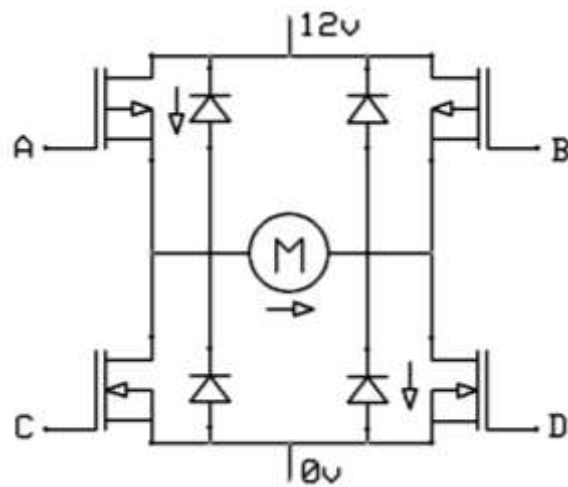
2.10 *H-Bridge* Mosfet

H-bridge adalah sebuah perangkat keras berupa rangkaian yang berfungsi untuk menggerakkan motor. Rangkaian ini diberi nama *H-bridge* karena bentuk rangkaiannya yang menyerupai huruf H seperti pada Gambar 12 berikut.



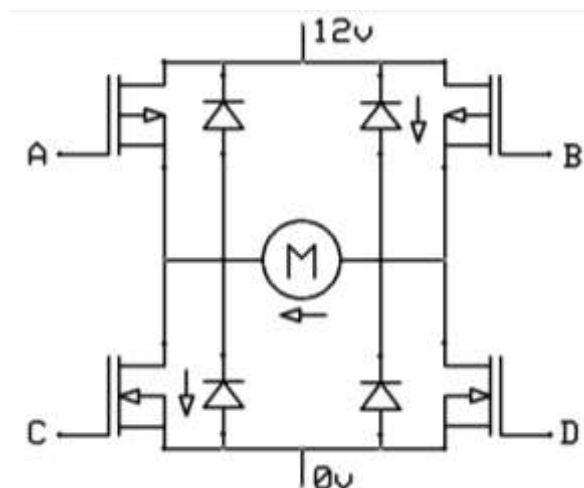
Gambar 12. Konfigurasi *H-Bridge* MOSFET

Rangkaian ini terdiri dari dua buah MOSFET kanal P dan dua buah MOSFET kanal N. Prinsip kerja rangkaian ini adalah dengan mengatur mati-hidupnya ke empat MOSFET tersebut. Huruf M pada gambar adalah motor DC yang akan dikendalikan. Bagian atas rangkaian akan dihubungkan dengan sumber daya kutub positif, sedangkan bagian bawah rangkaian akan dihubungkan dengan sumber daya kutub negatif. Pada saat MOSFET A dan MOSFET D *on* sedangkan MOSFET B dan MOSFET C *off*, maka sisi kiri dari gambar motor akan terhubung dengan kutub positif dari catu daya, sedangkan sisi sebelah kanan motor akan terhubung dengan kutub negatif dari catu daya sehingga motor akan bergerak searah jarum jam dijelaskan pada Gambar 13 berikut.



Gambar 13. *H-bridge* konfigurasi MOSFET A&D *on*, B&C *off*

Sebaliknya, jika MOSFET B dan MOSFET C *on* sedangkan MOSFET A dan MOSFET D *off*, maka sisi kanan motor akan terhubung dengan kutub positif dari catu daya sedangkan sisi kiri motor akan terhubung dengan kutub negatif dari catu daya. Maka motor akan bergerak berlawanan arah jarum jam dijelaskan pada gambar 14 berikut.



Gambar 14. *H-bridge* konfigurasi MOSFET A&D *off*, B&C *on*

Konfigurasi lainnya adalah apabila MOSFET A dan MOSFET B sedangkan MOSFET C dan MOSFET D *off*. Konfigurasi ini akan menyebabkan sisi kiri dan kanan motor terhubung pada kutub yang sama yaitu kutub positif sehingga tidak ada perbedaan tegangan diantara dua buah polaritas motor, sehingga motor akan diam. Begitu pula jika MOSFET C dan MOSFET D saklar on, sedangkan MOSFET A dan MOSFET C off, kedua polaritas motor akan terhubung pada kutub negatif dari catu daya. Maka tidak ada perbedaan tegangan pada kedua polaritas motor, dan motor akan diam. Konfigurasi yang harus dihindari adalah pada saat MOSFET A dan MOSFET C *on* secara bersamaan atau MOSFET B dan MOSFET D *on* secara bersamaan. Pada konfigurasi ini akan terjadi hubungan arus singkat antara kutub positif catu daya dengan kutub negatif catu daya.

2.11 *Liquid Cristal Display (LCD)*

Liquid Crystal Display (LCD) adalah modul tampilan berkonsumsi daya yang relatif rendah dan terdapat sebuah kontroller CMOS didalamnya. Kontroler tersebut sebagai pembangkit karakter dari ROM/RAM dan display data RAM. Semua fungsi tampilan dikontrol oleh suatu intruksi dan modul LCD dapat dengan mudah untuk diinterfacekan dengan mikroprosesor/mikrokontroler. Input yang diperlukan untuk mengendalikan modul ini berupa bus data yang termultipleks dengan bus alamat dan 3bit sinyal kontrol. Pengendali dot matrik LCD dilakukan secara internal pada modul LCD sendiri.

LCD merupakan suatu bentuk kristal cair yang akan beremulsi apabila dikenakan tegangan padanya. Tampilannya ini berupa dot matrik 5 x LCD

sehingga jenis huruf yang dapat ditampilkan akan lebih banyak dan lebih baik resolusinya jika dibandingkan dengan 7 segment. LCD tipe M1632 memiliki ciri-ciri sebagai berikut (Ashari, 2011: 167) :

- a) LCD ini terdiri dari 32 karakter dengan 2 baris masingmasing 16 karakter dengan display dot matrik 5 x 7
- b) Karakter generator Rom dengan 192 tipe karakter
- c) Karakter generator RAM dengan 8 tipe karakter
- d) 80 x 8 display data RAM
- e) Dapat diantarmukakan ke MPU 8 atau 4
- f) Dilengkapi fungsi tambahan : *display clear, cursor home, display ON/OFF, cursor ON/OFF, display character blink, cursor shift, dan display shift.*
- g) Internal Otomatis, reset pada saat power ON
- h) +5 volt PSU Tunggal



Gambar 15. LCD M1632

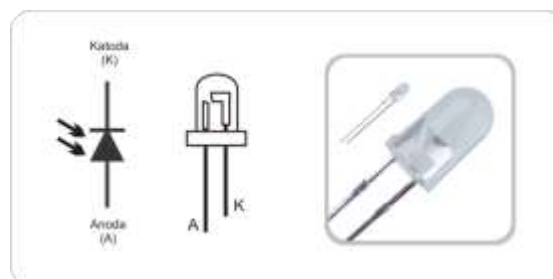
Tabel 2.
Pin output LCD dan deskripsi masing-masing PIN

No Pin	Nama Pin	Fungsi Pin
Pin 1	V _{ss} /GND	Sebagai tegangan 0 volt atau ground
Pin 2	VCC	Sebagai tegangan Vcc
Pin 3	VEE/Vcontrast	Sebagai tegangan pengatur kontras pada LCD
Pin 4	RS	RS (Register Select) "0" : input instruksi "1" : input data
Pin 5	R/W	Sebagai signal yang digunakan untuk memilih mode membaca atau menulis "0" : menulis "1" : membaca
Pin 6	E (enable)	Untuk mulai pengiriman data atau instruksi
Pin 7 – 14	DB 0 s/d DB 7	Untuk mengirimkan data karakter
Pin 15 – 16	Anode dan Katode	Untuk mengatur cahaya pada background LCD atau instruksi

(Sumber : Zain, 2013: 152)

2.12 Sensor Photodiode

Photodiode adalah suatu jenis dioda yang bekerja berdasarkan intensitas cahaya, dimana jika terkena cahaya maka bekerja seperti dioda pada umumnya, tetapi jika tidak mendapat cahaya maka akan berperan seperti resistor dengan nilai tahanan yang besar sehingga arus listrik tidak dapat mengalir. Simbol dan bentuk *Photodiode* dapat dilihat pada Gambar 16 (Mulyana, 2014: 103).



Gambar 16. Simbol dan bentuk *photodiode*.

Photodiode dibuat dari *semikonduktor* dengan bahan yang populer adalah silicon (Si) atau galium arsenida (GaAs), dan yang lain meliputi InSb, InAs, PbSe. Material ini menyerap cahaya dengan karakteristik panjang gelombang mencakup: 2500 Å - 11000 Å untuk silicon, 8000 Å – 20,000 Å untuk GaAs. Ketika sebuah *photon* (satu satuan energi dalam cahaya) dari sumber cahaya diserap, hal tersebut membangkitkan suatu *elektron* dan menghasilkan sepasang pembawa muatan tunggal, sebuah *elektron* dan sebuah *hole*, di mana suatu *hole* adalah bagian dari kisi-kisi *semikonduktor* yang kehilangan *elektron*. Arah Arus yang melalui sebuah *semikonduktor* adalah kebalikan dengan gerak muatan pembawa. cara tersebut didalam sebuah *Photodiode* digunakan untuk mengumpulkan *photon* - menyebabkan pembawa muatan (seperti arus atau tegangan) mengalir/terbentuk di bagian-bagian *elektroda*.

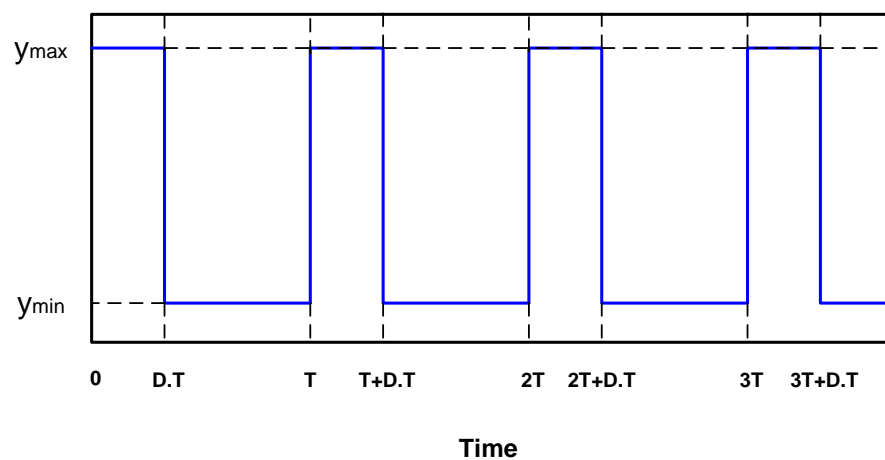
Photodiode digunakan sebagai penangkap gelombang cahaya yang dipancarkan oleh *Infrared*. Besarnya tegangan atau arus listrik yang dihasilkan oleh *photodiode* tergantung besar kecilnya radiasi yang dipancarkan oleh inframerah (Rochayati, 2012: 94).

2.13 Pulse Width Modulation (PWM)

PWM adalah sebuah cara memanipulasi lebar sinyal atau tegangan yang dinyatakan dengan pulsa dalam suatu perioda, yang akan digunakan untuk mentransfer data pada telekomunikasi ataupun mengatur tegangan sumber yang konstan untuk mendapatkan tegangan rata-rata yang berbeda. Penggunaan PWM sangat banyak, mulai dari pemodulasian data untuk telekomunikasi, pengontrolan

daya atau tegangan yang masuk ke beban, regulator tegangan, audio effect dan penguatan, serta aplikasi-aplikasi lainnya.

PWM menggunakan sinyal kotak dengan duty cycle tertentu menghasilkan berbagai nilai rata-rata dari suatu bentuk gelombang kotak $f(t)$ dengan nilai batas bawah y_{\min} , batas atas y_{\max} dan duty cycle D . seperti yang terlihat pada Gambar 17 dibawah.



Gambar 17. Gelombang kotak yang memiliki y_{\max} , y_{\min} dan D

Nilai rata-rata dari bentuk gelombang diatas adalah:

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

Jika $f(t)$ adalah gelombang kotak, maka nilai y_{\max} adalah dari $0 < t < D.T$ dan nilai y_{\min} dari $D.T < t < T$. Dari pernyataan diatas didapat:

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \frac{1}{T} \left(\int_0^{D.T} y_{\max} dt + \int_{D.T}^T y_{\min} dt \right) \\ &= \frac{D.T.y_{\max} + T(1-D)y_{\min}}{T} \\ &= D.y_{\max} + (1-D)y_{\min} \end{aligned}$$

Persamaan diatas dapat disederhanakan dalam berbagai kasus dimana $y_{\min}=0$ sehingga kita mendapat bentuk persamaan akhir . Dari persamaan ini jelas bahwa nilai rata-rata dari sinyal (\bar{y}) secara langsung bergantung pada *duty cycle*.

Cara temudah untuk menghasilkan sinyal PWM yaitu dengan metode intersective. Metode ini hanya membutuhkan sinyal segitiga atau gergaji yang bisa dibangkitkan oleh signal generator dan sebuah komparator. Sinyal gergaji merupakan sinyal input dan sinyal sinusoida merupakan referensi. Jika sinyal input lebih besar dari sinyal referensi, maka tegangan yang dikeluarkan oleh komparator adalah *high*, begitu sebaliknya jika sinyal input lebih kecil dari sinyal referensi, maka tegangan yang dikeluarkan komparator adalah *low*.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Skripsi dengan judul “Aplikasi *Fuzzy Logic* Untuk Pengendali Motor DC Berbasis Mikrokontroler Atmega8535 dengan Sensor *Photodiode*” ini menggunakan metode Penelitian dan Pengembangan (*Research and Development/R&D*). Metode penelitian dan Pengembangan (R&D) digunakan dalam penelitian ini bertujuan mengembangkan logika *fuzzy* sebagai kontrol motor DC pada Mikrokontroler Atmega8535. Metode penelitian dan Pengembangan (R&D) adalah metode penelitian yang digunakan untuk menghasilkan produk tertentu, dan menguji keefektifan produk tersebut. Produk tersebut tidak selalu berbentuk benda atau perangkat keras (*hardware*), seperti buku, alat tulis, dan alat pembelajaran lainnya. Akan tetapi, dapat pula dalam bentuk perangkat lunak (*software*). Dalam pelaksanaan Penelitian dan Pengembangan (R&D), ada beberapa metode yang digunakan yaitu metode *deskriptif*, *evaluatif* dan *eksperimental*. Metode penelitian *deskriptif* digunakan dalam penelitian awal untuk menghimpun data tentang kondisi yang ada. Metode *evaluatif* digunakan untuk mengevaluasi proses uji coba pengembangan suatu produk serta metode *eksperimen* digunakan untuk menguji kemampuan dari produk yang dihasilkan. Dikarenakan penelitian Penelitian dan Pengembangan (R&D) memerlukan waktu yang lama, penulis

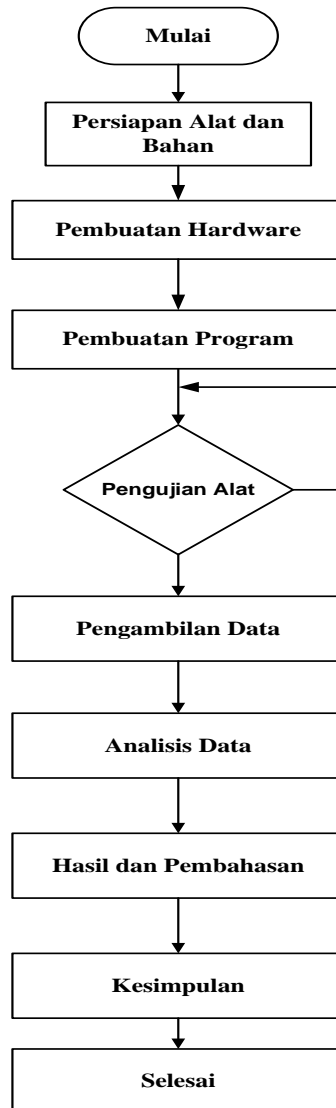
menggunakan metode penelitian *deskriptif* untuk menerapkan kontrol logika *fuzzy* pada motor DC.

3.2 Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di laboratorium Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang dan akan di uji di Fornext Robotics Semarang. Penelitian dilaksanakan pada bulan Juni hingga Agustus 2015.

3.3 Alur Penelitian

Proses penelitian dilakukan melalui beberapa tahap seperti berikut ini:



Gambar 18. Diagram Alur Penelitian

3.4 Alat dan Bahan

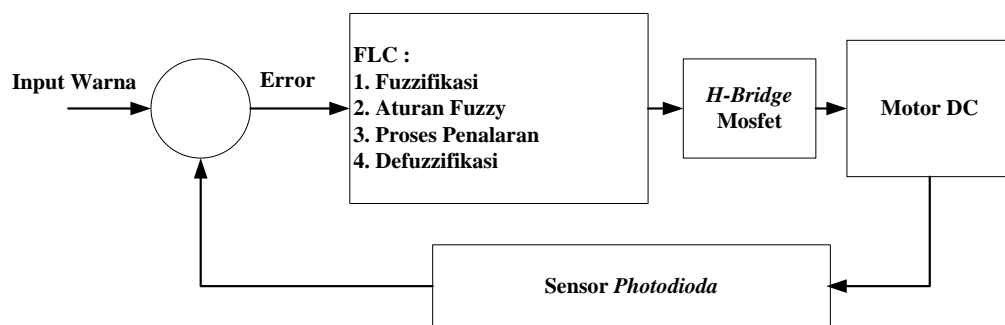
Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- 1) Perangkat Keras (*Hardware*):
 - a. Sensor *Photodiode*
 - b. Sistem minimum ATmega8535
 - c. *H-Bridge* Mosfet

- d. LCD (*Liquid Cristal Display*) 2x16
 - e. Downloader USBASP
 - f. Motor DC
 - g. Switch push button
- 2) Perangkat Lunak (*Software*)
- a. *Software* Codevision AVR
 - b. AvrDude
 - c. ExpressPCB
 - d. Eagle

3.5 Diagram Blok Sistem

Tahapan awal perancangan alat yaitu diperlukan gambaran awal tentang bagaimana sistem kerja dari alat. Sistem pengendalian menggunakan *close loop* dengan aplikasi *fuzzy controller*. Diagram blok dari sistem pengontrolan ini dapat dilihat pada Gambar 19 berikut:

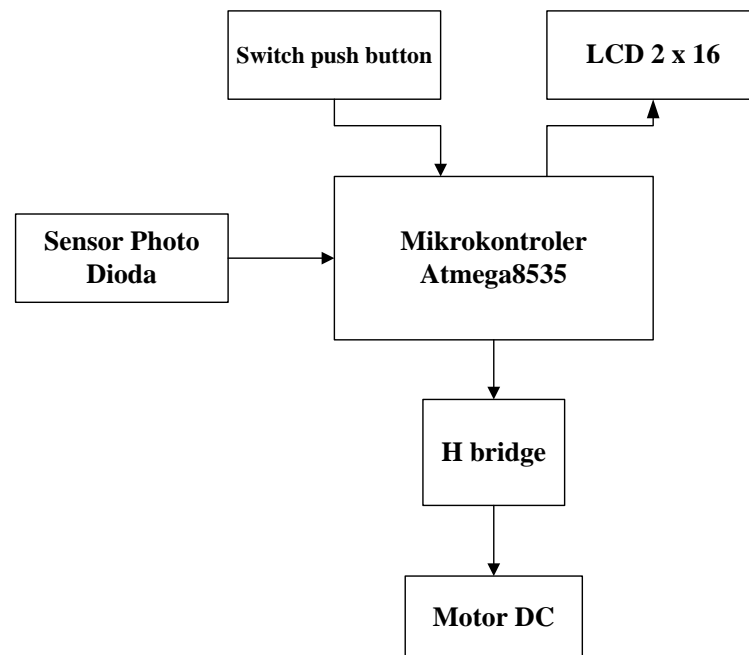


Gambar 19. Diagram blok sistem

3.6 Perancangan Perangkat Keras

Perangkat keras dari sistem yang akan dibangun meliputi sistem minimum ATmega8535, sensor *photodiode*, *Switch push button*, LCD 2x16, *H-bridge* mosfet dan motor DC.

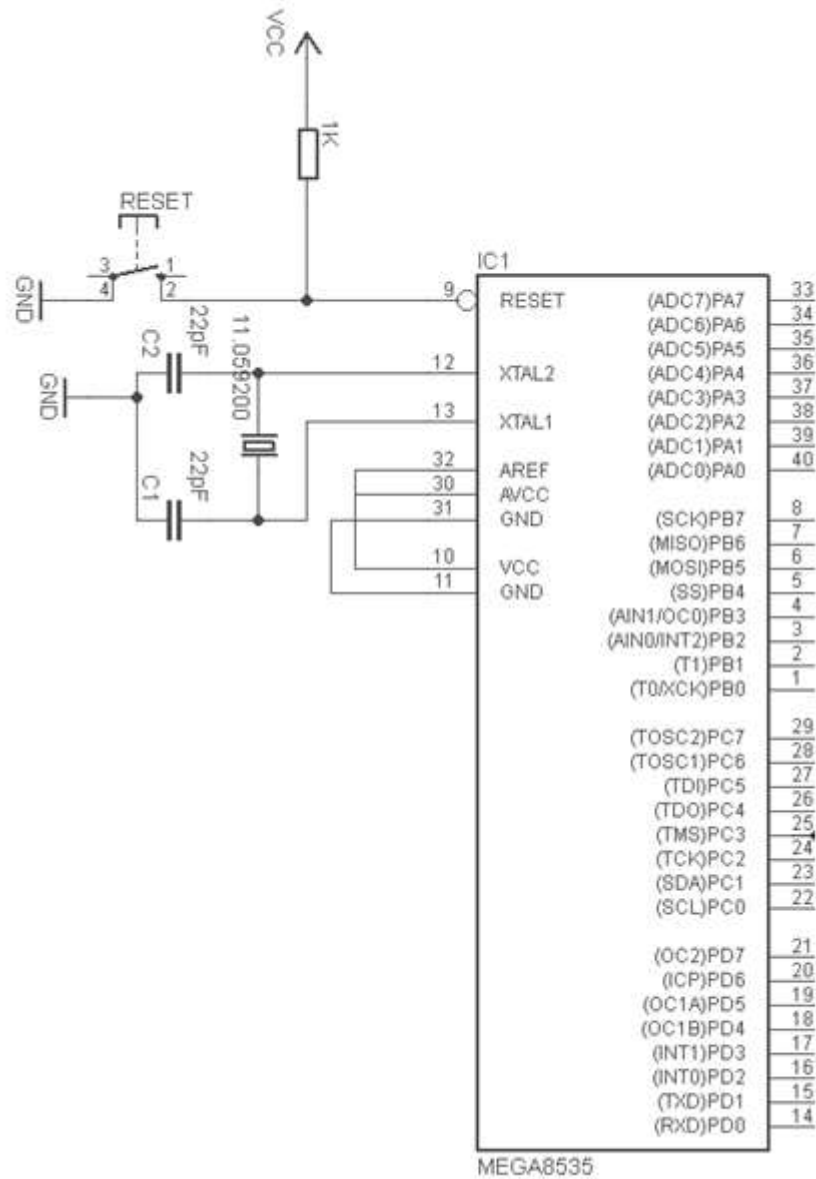
Secara umum perancangan sistem yang akan dibuat dapat dilihat pada Gambar 20.



Gambar 20. Blok diagram sistem perancangan perangkat keras

1) Sistem minimum ATmega8535

Sistem minimum ATmega8535 digunakan sebagai sistem utama atau *main system* dari kontrol logika *fuzzy*. Sistem minimum ini sebagai otak dari alat yang akan menerjemahkan data sensor *photodiode* yang kemudian digunakan untuk menggerakkan motor.

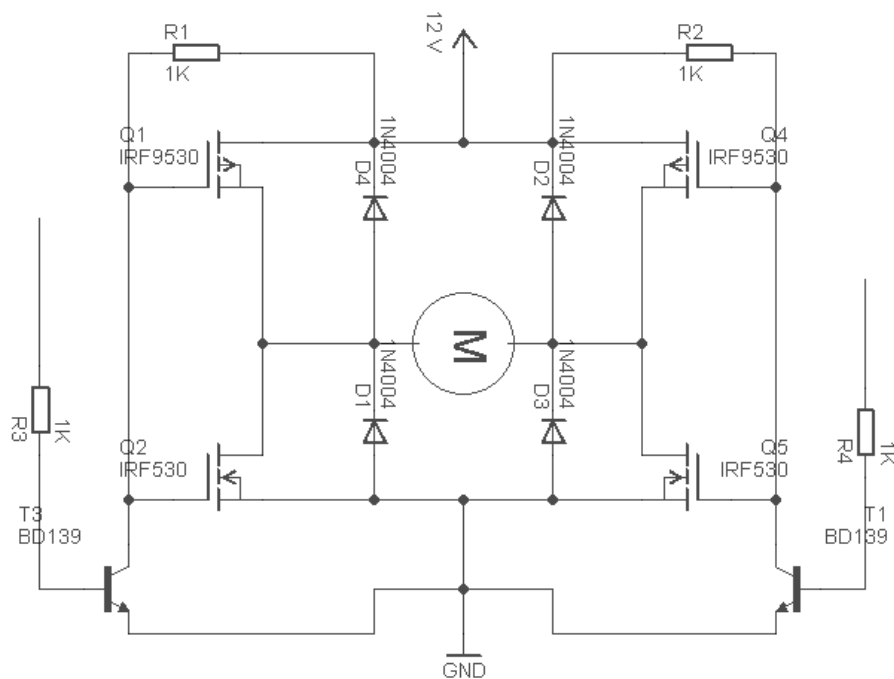


Gambar 21. Skematik Rangkaian sistem minimum ATmega8535

2) *H-Bridge* Mosfet

Rangkaian *H-Bridge* seperti pada Gambar 22 berfungsi sebagai driver atau pengendali dari motor DC, *H-Bridge* yang digunakan dalam instrumen penelitian ini berbasis Mosfet. Rangkaian ini terdiri dari dua buah MOSFET kanal P dan dua buah MOSFET kanal N. Prinsip kerja

rangkaiannya ini adalah dengan mengatur mati-hidupnya ke delapan MOSFET tersebut. *H-Bridge* tersebut terdiri dari dua Pin masukan yang terhubung ke Pin sistem minimum ATMeg8535, dua buah pin keluaran yang dihubungkan ke motor. Dari kedua pin masukan tersebut terdapat pin *enable* yang terhubung pada pin ATMeg8535 yang difungsikan untuk mengeluarkan sinyal PWM.

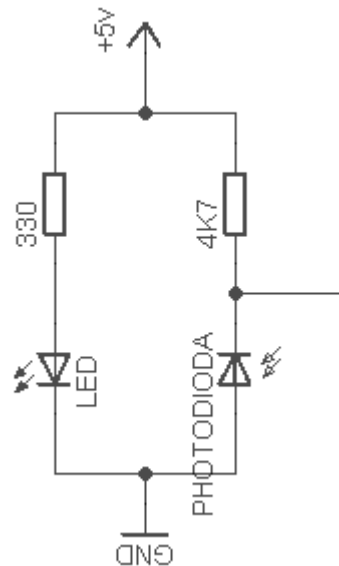


Gambar 22. Skematik Rangkaian *H-bridge* Mosfet.

3) Photodioda

Photodioda digunakan sebagai data masukan alat untuk menggerakkan motor. Saat *photodioda* terkena cahaya, maka akan bersifat sebagai sumber tegangan dan nilai resistansinya akan menjadi kecil dan saat *photodioda* tidak terkena cahaya, maka nilai resistansinya akan besar atau dapat diasumsikan tak hingga. Dari nilai tersebut akan masuk

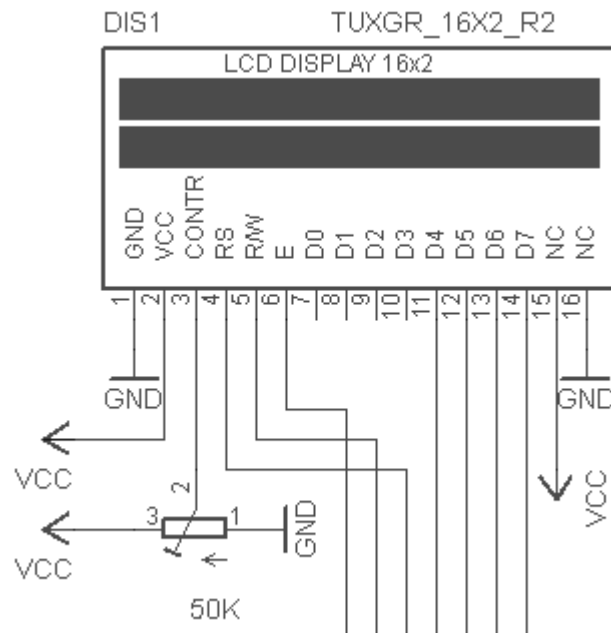
kedalam ADC mikrokontroler ATmega8535 yang kemudian akan diolah sebagai data masukan.



Gambar 23. Skematik Rangkaian *Photodiode*.

4) LCD (*Liquid Cristal Display*)

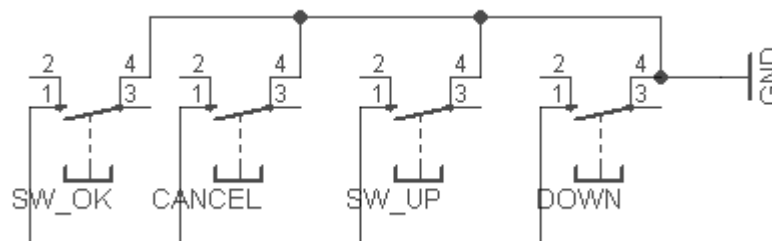
LCD (*Liquid Cristal Display*) berfungsi untuk menampilkan karakter yang mewakili data-data yang diperlukan. Dimana LCD ini nantinya menampilkan informasi mengenai data-data sensor dan hasil dari proses *fuzzy*. Untuk menampilkan karakter-karakter yang diperlukan, dalam bahasa C pada program CV-AVR telah dipermudah dengan adanya fasilitas *codewizard* dan *library* yang disediakan sehingga tidak perlu menghafalkan register-register atau alamat akses setiap karakternya.



Gambar 24. Skematik Rangkaian LCD 2x16.

5) *Switch push button*

Rangkaian *Switch push button* pada Gambar 25 yang terhubung ke PORTC ATmega8535 bekerja membuat logik pada PORTC sehingga logika yang dihasilkan menjadi masukan bagi program untuk menjalankan sub-rutin program yang diarahkannya. Rangkaian ini merupakan rangkaian aktif low karena limit *switch* terhubung langsung dengan ground.



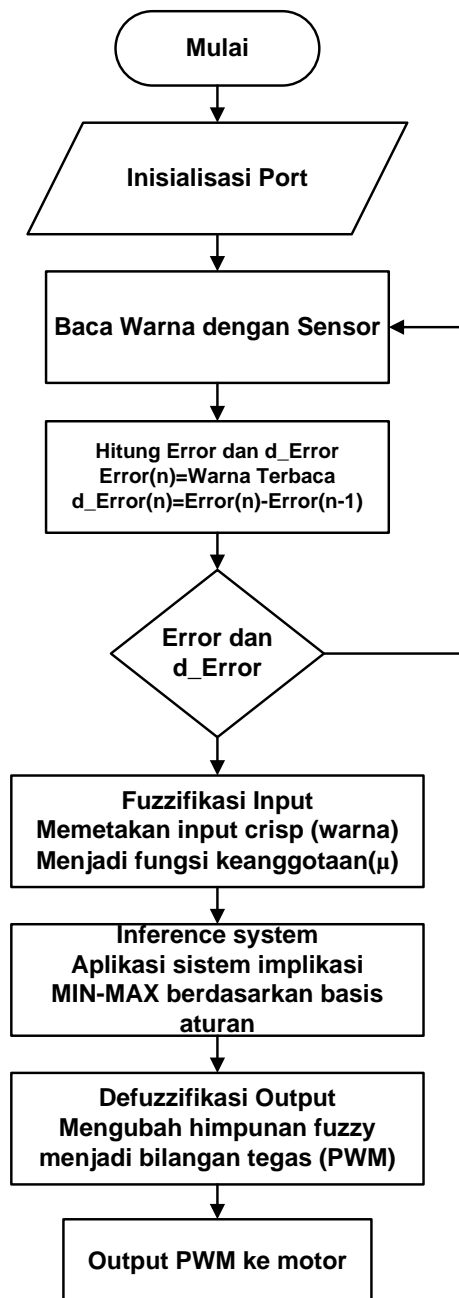
Gambar 25. Skematik Rangkaian *Switch push button*.

6) Motor DC

Motor DC adalah suatu mesin yang berfungsi untuk mengubah tenaga listrik arus searah (DC) menjadi tenaga mekanik (putaran) dengan prinsip elektromagnetik. Motor DC ini yang nantinya akan digerakan dengan proses *fuzzy*.

3.7 Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak pada alat ini menggunakan *software* Codevision AVR sebagai *programmer* mikrokontroler ATMega8535. Untuk membuat program yang sesuai dengan tujuan penelitian, maka terlebih dahulu dibuat rancangan program dalam suatu diagram alir (*flow chart*) dari program yang dibuat agar alat bekerja berdasarkan program yang diinginkan. Secara umum diagram alir program utama dapat dilihat pada Gambar 26 dimana program dimulai dengan melakukan inisialisasi semua variabel-variabel utama dari proses pengontrolan dan mikrokontroler.



Gambar 26. Diagram alir program utama

Sensor *photodiode* akan membaca warna dan mengirim sinyal kontrol pada rangkaian kontrol dan rangkaian kontrol akan mengolah sinyal tersebut. Kemudian dari rangkaian kontrol akan mengirim sinyal output yang akan digunakan untuk mengatur kecepatan putar pada motor DC. Kecepatan putar

motor DC dikontrol dengan menggunakan metode *Fuzzy Logic Controller* menggunakan mikrokontroler ATmega8535.

3.8 Perancangan Kontroler *Fuzzy* (FLC)

Untuk merancang pengendali dalam penelitian ini, maka diterapkan logika *fuzzy* pada pengendali motor DC dengan menggunakan metode Mamdani. Sistem kendali dirancang dengan dua buah masukan yang berupa *Error* yang merupakan selisih antara *setpoint* dengan pembacaan sensor *photodiode* dan *Delta Error* yang merupakan turunan pertama dari nilai *Error*. Kedua *input Error* dan *Delta Error* akan diproses oleh *fuzzy logic controller* (FLC) untuk mendapatkan nilai output berupa sinyal PWM untuk mengontrol kecepatan putar motor DC.

a. Pembentukan himpunan *fuzzy*

Pengolahan data dilakukan dengan menentukan variabel dan semesta pembicaraan, dilanjutkan dengan pembentukan himpunan *fuzzy*. Penentuan variabel dan semesta pembicaraan dari hasil pengambilan data dapat diperoleh pada Tabel 3 dibawah ini:

Tabel 3.

Variabel dan semesta pembicaraan *input* dan *output*

Fungsi	Nama Variabel	Semesta Pembicaraan	Keterangan
Input	<i>Error</i>	[0 - 255]	<i>Error</i> warna
	<i>Delta Error</i>	[0 - 255]	Turunan pertama dari <i>Error</i>
Output	Motor DC	[0 - 1000]	Kecepatan Motor

Dari data-data yang sudah didapatkan sebagai input untuk mengetahui hasil output, maka data tersebut dibuat sesuai dengan rentang tingkatan *fuzzy*.

Tabel 4.

Fazzifikasi *input Error*

No	Nilai Pembacaan Sensor	Himpunan <i>Fuzzy</i>
1	0 – 255	Kecil
2	0 – 255	Besar

Tabel 5.

Fazzifikasi *input Delta Error*

No	Nilai <i>Delta Error</i>	Himpunan <i>Fuzzy</i>
1	0 – 255	Kecil
2	0 – 255	Besar

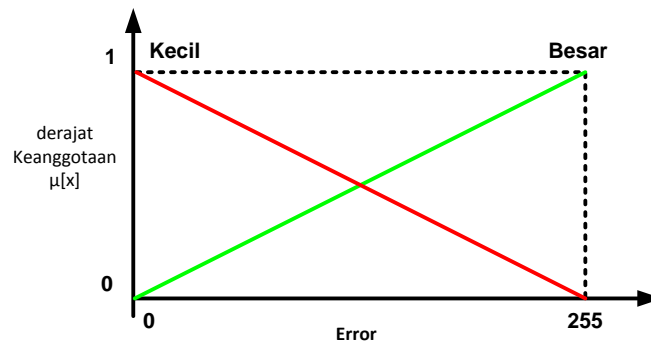
Tabel 6.

Fazzifikasi *Output PWM*

No	Nilai Output PWM	Himpunan <i>Fuzzy</i>
1	0 – 1000	Pelan
2	0 – 1000	Cepat

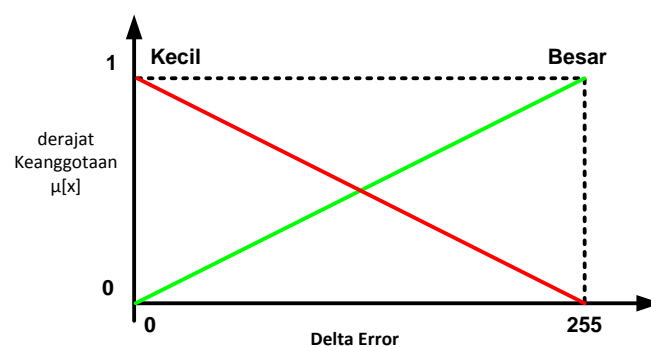
Sinyal *input error* berupa nilai tegas (*crisp*) 0 sampai 255. Nilai tersebut diperoleh dari nilai minimum dan nilai maksimum ADC internal 8

bit pada mikrokontroler ATmega8535. Nilai tegas tersebut diubah menjadi himpunan-himpunan input *fuzzy* kecil dan besar, seperti pada Gambar 27 dibawah ini.



Gambar 27. Fuzzifikasi *input error*

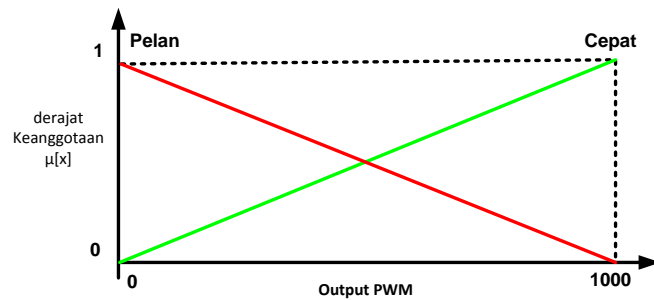
Sinyal *input delta error* berupa nilai tegas (*crisp*) 0 sampai 255. Nilai tersebut diperoleh dari nilai turunan pertama minimum dan nilai maksimum ADC internal 8 bit pada mikrokontroler ATmega8535. Nilai tegas tersebut diubah menjadi himpunan-himpunan *input fuzzy* kecil dan besar, seperti pada Gambar 28 dibawah ini.



Gambar 28. Fuzzifikasi *input delta error*

Sinyal *Output PWM* berupa nilai tegas (*crisp*) 0 sampai 1000. Nilai tersebut diperoleh dari nilai sinyal PWM 10 bit pada mikrokontroler

ATMega8535. Nilai tegas tersebut diubah menjadi himpunan-himpunan *input fuzzy* pelan dan cepat, seperti pada Gambar 29 dibawah ini.



Gambar 29. Fuzzifikasi *output* PWM

b. Aplikasi fungsi implikasi

Menyusun basis aturan, yaitu aturan-aturan berupa implikasi-implikasi *fuzzy* yang menyatakan relasi antara variabel input dengan dengan variabel output. Pada penelitian ini menggunakan metode Mamdani, fungsi implikasi yang digunakan adalah *min* dengan bentuk sebagai berikut:

[R1] IF *Error* KECIL And *Delta Error* KECIL THEN *Output* PWM PELAN.

[R2] IF *Error* KECIL And *Delta Error* BESAR THEN *Output* PWM PELAN.

[R3] IF *Error* BESAR And *Delta Error* KECIL THEN *Output* PWM CEPAT.

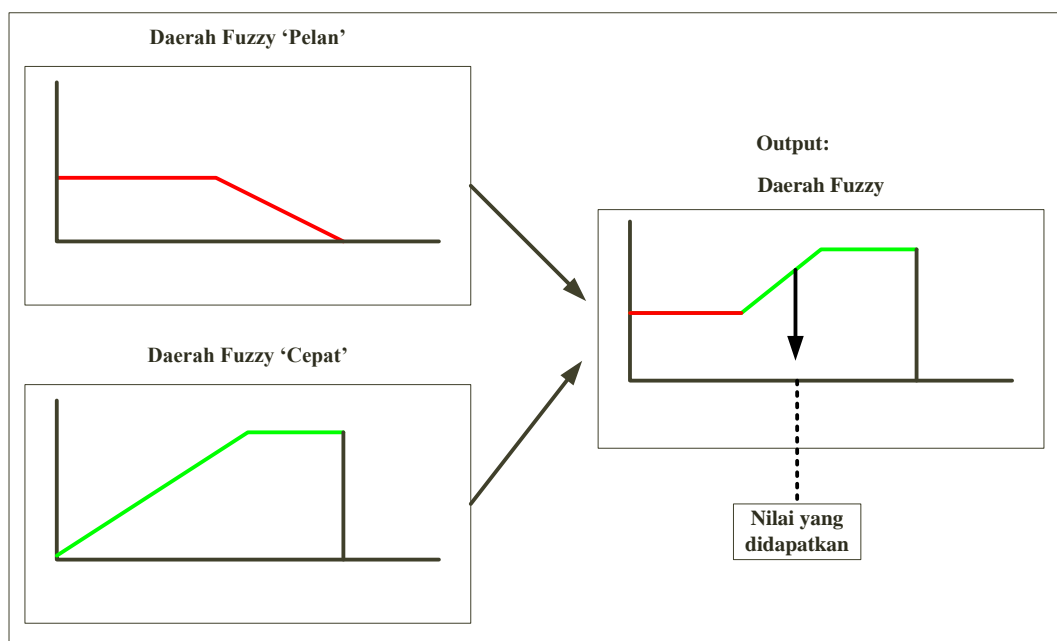
[R4] IF *Error* BESAR And *Delta Error* BESAR THEN *Output* PWM CEPAT.

c. Komposisi Aturan

Apabila sistem terdiri dari beberapa aturan, maka inferensi diperoleh dari kumpulan dan korelasi antar aturan. Metode yang digunakan dalam melakukan inferensi sistem *fuzzy*, yaitu Metode *max* (*maximum*). Pada metode ini, solusi himpunan *fuzzy* diperoleh dengan cara mengambil nilai maksimum aturan, kemudian menggunakan nilai tersebut untuk memodifikasi daerah *fuzzy* dan mengaplikasikannya ke output.

d. Penegasan (*defuzzy*)

Masukan dari proses penegasan adalah suatu himpunan *fuzzy* yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan *fuzzy*, sedangkan output yang dihasilkan merupakan suatu bilangan *real* yang tegas. Sehingga jika diberikan suatu himpunan *fuzzy* dalam range tertentu, maka dapat diambil suatu nilai tegas tertentu sebagai output seperti terlihat pada Gambar 30.



Gambar 30. Proses *defuzzy*

Defuzifikasi menggunakan metode centeroid. Pada metode ini, solusi tegas diperoleh dengan cara mengambil titik pusat daerah *fuzzy*.

3.9 Pengujian Alat

Pengujian alat meliputi pengujian sensor, pengujian aktuator. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja dari *hardware* yang digunakan.

3.10 Pengambilan Data

Pengambilan data penelitian terbagi menjadi tiga bagian yaitu:

1) Data sensor *photodiode*

Data sensor *photodiode* digunakan sebagai data masukan dari bentuk tegas (*crisp*) menjadi *fuzzy* (variabel linguistik) yang disajikan dalam bentuk himpunan-himpunan *fuzzy* dengan suatu fungsi keanggotaannya masing-masing. Data ini yang nantinya akan diolah yang digunakan untuk menggerakkan motor.

2) Data *Pulse Width Modulation* (PWM)

Motor DC membutuhkan sebuah tegangan analog yang bervariasi untuk dapat mengatur putarannya. Sebagaimana dijelaskan pada Bagian 2.9 bahwa PWM menghasilkan efek berupa sinyal analog sebagai akibat dari adanya pelebaran pulsa. Oleh karena tegangan output PWM digunakan sebagai penggerak dari motor DC, maka tegangan output hasil PWM juga perlu dibandingkan dengan kecepatan putaran motor DC sehingga diperoleh hubungan antara tegangan penggerak dengan kecepatan motor DC yang digerakkan.

3) Data kontrol logika *fuzzy*

Data kontrol logika *fuzzy* adalah data akhir yang didapat dari proses keseluruhan. Data ini yang nantinya digunakan sebagai penggerak pada motor. Pada proses pengambilan data kontrol logika *fuzzy* ini terdiri dari dua proses yaitu:

1. Data program kontrol logika *fuzzy*

Tujuan dari pengambilan data ini adalah untuk mengetahui apakah nilai keluaran *fuzzy* hasil dari proses *rule base evaluation* dan proses *defuzzyfikasi* sudah sesuai dengan yang diharapkan pada program.

2. Data perangkat secara keseluruhan

Pengambilan data perangkat secara keseluruhan bertujuan untuk melihat hasil dari masing-masing program setelah diintegrasikan.

3.11 Analisis Data

Analisis data adalah proses mencari dan menyusun secara sistematis data yang diperoleh dari hasil data sensor *photodiode*, data *Pulse Width Modulation* (PWM) dan data kontrol logika *fuzzy*, dengan cara mengorganisasikan data ke dalam kategori, menjabarkan ke dalam unit-unit dan membuat kesimpulan sehingga mudah dipahami oleh diri sendiri dan orang lain.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

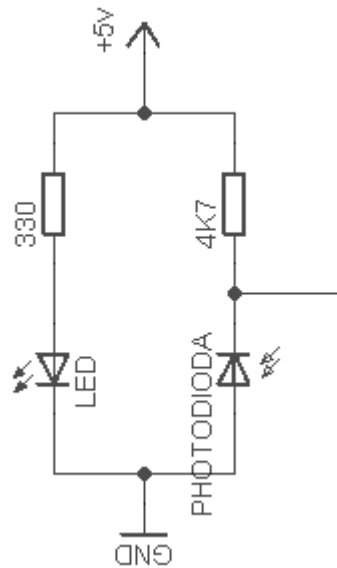
Pada bagian ini akan dilakukan pengujian alat agar diketahui bekerja atau tidaknya fungsi-fungsi yang telah dibuat serta kesesuaian hasil dengan yang sudah direncanakan. Pengujian dilakukan per blok untuk dapat mengetahui permasalahan di tiap blok.

4.1.1 Pengujian Sensor *Photodioda*

Pengujian sensor *photodioda* dilakukan untuk mendapatkan nilai perbandingan antara besarnya tegangan keluaran dari sensor *Photodioda* terhadap warna dari bidang pantul di lapangan. Konsep pemantulan sensor *photodioda* terhadap jalur garis di jelaskan sebagai berikut. Jenis LED yang digunakan yaitu LED *superbright*.



Gambar 31. Konsep Pemantulan LED di Lapangan


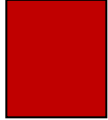
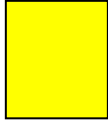

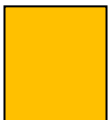
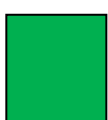
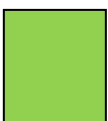

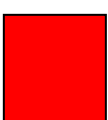

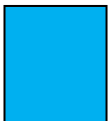



Gambar 32. Sistem Pembacaan ADC pada Sensor

Photodiode adalah dioda yang bekerja berdasarkan intensitas cahaya, dimana jika *photodiode* terkena cahaya maka *photodiode* bekerja seperti dioda pada umumnya, tetapi jika tidak mendapat cahaya maka *photodiode* akan berperan seperti resistor dengan nilai tahanan yang besar sehingga arus listrik tidak dapat mengalir. *Photodiode* digunakan sebagai penangkap gelombang cahaya yang dipancarkan oleh Infrared. Besarnya tegangan atau arus listrik yang dihasilkan oleh *photodiode* tergantung besar kecilnya radiasi yang dipancarkan oleh inframerah. Dari desain tersebut didapatkan data sebagai berikut:

Tabel 7.

Data Pengukuran Sensor *Photodiode*

Warna	Data ADC (Decimal)	Pengukuran (Volt)	Warna	Data ADC (Decimal)	Pengukuran (Volt)
	10	0,217		158	3,095
	44	0,858		166	3,240
	85	1,678		171	3,395
	124	2,424		176	3,441
	129	2,525		190	3,712
	148	2,896		201	3,929

4.1.2 Pengujian Nilai PWM terhadap Tegangan Output dan Kecepatan Motor

Pengujian nilai PWM dilakukan untuk mengetahui hasil tegangan *output* yang mampu dilewatkan oleh rangkaian *driver* dari vcc sumber motor berdasarkan variatif nilai PWM yang diberikan. Pengujian ini dilakukan dengan cara

mengukur titik pengujian pada *output driver* motor menggunakan *voltmeter* dan pengujian dilakukan dengan menggunakan alat ukur berupa *Tachometer* sebagai alat ukur kecepatan rotasi motor per menit (RPM) dengan perubahan nilai pwm. Sumber tegangan yang digunakan sebesar 11,88 Volt DC, hasil pengujian disajikan dalam Table 8 berikut ini :

Tabel 8.

Hasil Pengujian Pengalamatan *Input* dan *Output* pada Sismin

No	Variabel Pematong(VP)	Duty Cycle 10bit(%)	Tegangan Teori (Volt)	Tegangan Motor (Volt)	TT-TM	TT-TM *100%	RPM Motor
1	0	0,00	0	0	0,00	0,00	0
2	50	4,89	0,58	2,20	1,62	278,89	2990
3	100	9,78	1,16	2,90	1,74	149,72	4045
4	150	14,66	1,74	3,49	1,74	99,78	4908
5	200	19,55	2,32	4,04	1,72	73,94	5738
6	250	24,44	2,90	4,59	1,69	58,10	6495
7	300	29,33	3,48	5,13	1,65	47,25	7260
8	350	34,21	4,06	5,65	1,59	39,01	7936
9	400	39,10	4,64	6,05	1,40	30,24	8750
10	450	43,99	5,22	6,71	1,48	28,40	9350
11	500	48,88	5,80	7,31	1,50	25,89	9950
12	550	53,76	6,38	7,88	1,49	23,37	10744
13	600	58,65	6,97	8,43	1,46	20,99	11460
14	650	63,54	7,55	8,96	1,41	18,70	12226
15	700	68,43	8,13	9,5	1,37	16,87	12989
16	750	73,31	8,71	10,05	1,34	15,39	13545
17	800	78,20	9,29	10,54	1,25	13,45	14286
18	850	83,09	9,87	11,13	1,26	12,75	14537
19	900	87,98	10,45	11,53	1,08	10,32	15425
20	950	92,86	11,03	11,46	0,43	3,88	15450
21	1000	97,75	11,61	11,54	0,07	0,62	15492
22	1023	100,00	11,88	11,41	0,47	3,96	15450
Error pengukuran					44,16		

Keterangan:

VP = *Variabel Pemotong*

TT = *Tegangan Teori*

TM = *Tegangan Motor*

4.1.3 Pengujian Kontrol Logika *Fuzzy*

4.1.3.1 Pengujian Program Kontrol Logika *Fuzzy*

Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui apakah nilai keluaran *fuzzy* hasil dari proses *rule base evaluation* dan proses *defuzzyfikasi* sudah sesuai dengan yang diharapkan pada program. Hasil keluaran *fuzzy* diperoleh dari proses penjumlahan keseluruhan momen setiap daerah kemudian dibagi dengan jumlah masing-masing luas setiap daerah. Metode fuzifikasi yang digunakan adalah centroid. Berikut ini disajikan data hasil pengujian proses *fuzzy*.

Tabel 9.

Data hasil pengujian proses *Fuzzy*

No	<i>Error</i>	<i>Delta error</i>	<i>Output</i>
1	0	0	333,33
2	30	20	346,09
3	70	50	394,90
4	105	90	456,34
5	125	140	495,10
6	160	75	562,35
7	180	200	597,12
8	200	100	600,77
9	234	20	660,26
10	250	80	641,42

4.1.3.2 Pengujian Perangkat Secara Keseluruhan

Pengujian perangkat secara keseluruhan bertujuan untuk melihat hasil dari masing-masing program setelah diintegrasikan. Pengujian pada proses ini dilakukan untuk melihat hasil keluaran dari sistem *fuzzy* dengan cara mengatur sinyal masukan kontroler sesuai dengan pembacaan sensor *photodiode*. Pengujian hanya dilakukan dengan menggunakan beberapa warna data sebagai percobaan. Setelah dilakukan pengujian, didapatkan hasil pembacaan keluaran *fuzzy* yang berubah sesuai dengan sinyal masukan.

Tabel 10.

Data Hasil Pengujian Proses Keseluruhan

No	<i>Error</i>	<i>Delta Error</i>	<i>Output PWM</i>	Matematis	MATLAB
1	10	0	334,83	340,79	332
2	44	0	359,68	362,74	358
3	85	0	419,75	420,04	419
4	124	0	493,14	495,10	493
5	129	0	502,94	504,90	503
6	148	0	539,85	538,85	540
7	158	0	558,66	557,62	559
8	166	0	573,20	571,21	574
9	171	0	581,98	579,96	583
10	176	0	590,51	588,44	592
11	190	0	612,73	611,88	614
12	201	0	628,15	625,52	630

4.2 Pembahasan

Data penelitian diatas akan dibahas dan dianalisis berdasarkan teori yang tertera pada BAB II. Hasil analisis tersebut akan diterapkan pada alat untuk

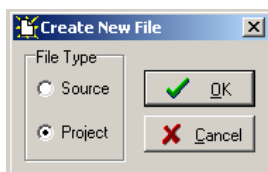
mendapatkan suatu sistem yang handal yang dapat menjawab permasalahan yang ada.

4.2.1 Pembahasan Sensor *Photodiode*

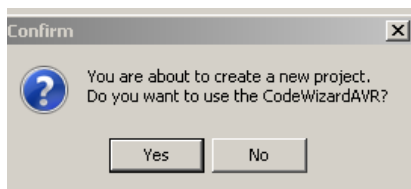
Sensor *photodiode* merupakan sensor yang dapat mendeteksi gelombang cahaya yang dipancarkan oleh Infrared. Data yang dihasilkan merupakan sinyal *analog*. Untuk itu perlu adanya *Analog to Digital Converter* (ADC) untuk merubah sinyal analog tersebut menjadi sinyal digital yang bisa dikenali mikrokontrol ATMga8535.

Mikrokontrol ATMga8535 memiliki fitur *Analog to Digital Converter* (ADC) internal yang dapat digunakan untuk merubah sinyal analog yang dihasilkan sensor *photodiode* tersebut ke sinyal digital. Software *CodeVision AVR* (CVAVR) yang digunakan untuk memprogram ic ATMga8535 memiliki fasilitas *CodeWizardAVR* untuk mengaktifkan fitur *Analog to Digital Converter* (ADC) tersebut. Berikut langkah-langkah untuk mengaktifkan fitur ADC pada CVAVR.

1. Klik New Project → ok



2. Pilih CodeWizardAVR → ok



3. Pilih ADC → klik ADC Enabled → use 8 bit



4. Save Project.

Dengan pengaturan seperti langkah diatas, kita sudah bisa menggunakan fitur ADC internal 8 bit pada Mikrokontroler ATmega8535. Nilai yang dihasilkan merupakan nilai digital 0x00 sampai 0xFF. Nilai tersebut mewakili tegangan 0 volt sampai 5 volt. Untuk lebih jelasnya bisa dilihat Tabel 7.

Pada Tabel 7 tersebut terdapat nilai *photodiode* dari nilai terendah (putih) dan nilai tertinggi (hitam). Untuk menguji nilai ADC tersebut kita dapat melakukan perhitungan sebagai berikut:

Putih

$$x = \left(\frac{y}{k}\right) ref$$

$$x = \left(\frac{0xD0}{0x100}\right) 5 Volt$$

$$x = \left(\frac{10}{256}\right) 5 volt$$

$$x = 0,19 Volt$$

Hitam

$$x = \left(\frac{y}{k}\right) ref$$

$$x = \left(\frac{0xD5}{0x100}\right) 5 Volt$$

$$x = \left(\frac{201}{256}\right) 5 volt$$

$$x = 3,92 Volt$$

Dengan:

x = Nilai perhitungan

y = Nilai Pengukuran

ref = Nilai referensi (5 volt)

Dari pengukuran dan perhitungan tersebut terdapat *error* pengukuran sebesar **0,89 volt**. *Error* sistem ini bisa dilihat dari data minimal dan maksimal dari perhitungan diatas, yaitu sebesar 0,19 volt dan 3,92 volt. Jadi *error* sistem atau *error* mekanik adalah:

$$error\ sistem = Nilai\ atkual(ref) - \sum\ pengukuran$$

$$error\ sistem = ref - (minimal + maksimal)$$

$$error\ sistem = 5 - (0,19 + 3,92)$$

$$error\ sistem = 5 - 4,11$$

$$error\ sistem = 0,89\ volt$$

4.2.2 Pembahasan Nilai PWM terhadap Tegangan Output dan Kecepatan Motor

PWM (*Pulse Width Modulation*), salah satu teknik untuk mengatur kecepatan motor DC yang umum digunakan. Dengan menggunakan PWM dapat mengatur kecepatan dengan mudah. Teknik PWM untuk pengaturan kecepatan motor adalah, pengaturan kecepatan motor dengan cara merubah-ubah besarnya pulsa *duty cycle*. Pulsa yang berubah ubah *duty cycle*-nya inilah yang menentukan kecepatan motor. Besarnya amplitudo dan frekuensi pulsa adalah tetap, sedangkan besarnya *duty cycle* berubah-ubah sesuai dengan kecepatan yang diinginkan, semakin besar *duty cycle* maka semakin cepat pula kecepatan motor, dan sebaliknya semakin kecil *duty cycle* maka semakin pelan pula kecepatan motor. Untu membangkitkan pulsa PWM tersebut, digunakan fasilitas *Timer/counter* internal pada mikrokontrol ATMega8535.

Tegangan output yang didapatkan dari metode PWM digunakan untuk menggerakkan motor DC. Berdasarkan Tabel 8 menunjukkan hubungan antara tegangan output yang dihasilkan melalui metode PWM dengan kecepatan putaran motor DC diperoleh nilai *error* pengukuran sebesar 44,16.

Error pengukuran

$$Error(\%) = \frac{\sum \frac{|TT - TM|}{TT} \times 100\%}{n}$$

$$Error(\%) = \frac{971,53}{22}$$

$$Error(\%) = 44,16\%$$

Berdasarkan hasil data penelitian diperoleh penambahan nilai tegangan *output* linear hampir mendekati nilai ideal, namun kondisi 100% tidak dapat dipenuhi dikarenakan keterbatasan kemampuan *driver* motor dalam mengalirkan tegangan berdasarkan penambahan nilai PWM secara maksimal, terdapat *error* sebesar 44,16 % dari tegangan *output* yang seharusnya diharapkan. Berdasarkan hasil tersebut didapatkan pula bahwa nilai PWM juga mempengaruhi kecepatan perputaran motor.

4.2.3 Pembahasan Kontrol Logika *Fuzzy*

4.2.3.1 Pembahasan Program Kontrol Logika *Fuzzy*

Metode Mamdani yang digunakan dalam perancangan kontrol logika *fuzzy* untuk mendapatkan output diperlukan 4 tahapan yaitu Pembentukan himpunan *fuzzy*, Aplikasi fungsi implikasi, Komposisi Aturan dan *defuzzifikasi* (Kusumadewi , 2004). Seiring dengan perkembangan zaman, Metode Mamdani telah dapat di aplikasikan dalam bentuk bahasa pemograman yang disebut

MATLAB. Tahapan dalam pemograman MATLAB terdiri dari Membership Function, Rule Editor dan rule viewer. Kedua jenis Metode Mamdani tersebut memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Pemograman MATLAB mempermudah dalam penyusunan penerapan logika *fuzzy* namun jika secara matematis akan lebih valid dalam hasil perhitungannya. Berikut ini disajikan hasil perhitungan penerapan logika *fuzzy* yang beserta perhitungan secara matematis dan MATLAB.

Tabel 11.

Perbandingan hasil pengujian secara program, matematis dan MATLAB

No	Error	Delta error	Output	matematis	MATLAB
1	0	0	333,33	340,00	330
2	30	20	346,09	351,11	344
3	70	50	394,90	395,57	394
4	105	90	456,34	456,40	456
5	125	140	495,10	495,10	495
6	160	75	562,35	562,21	563
7	180	200	597,12	596,60	598
8	200	100	600,77	598,01	602
9	234	20	660,26	656,50	663
10	250	80	641,42	637,67	644

Berdasarkan Tabel 11 diatas, diperoleh hasil pengujian metode Mamdani secara program, matematis dan MATLAB. Masing-masing output memiliki nilai selisih pada tiap hasil. Tiap hasil tersebut dapat diketahui melalui tahapan untuk memperoleh hasil outputnya. Dalam penyusunan penerapan logika *fuzzy* mamdani untuk menentukan output PWM dilakukan beberapa langkah untuk mendapatkan

data yang valid dalam penyusunannya. Berikut adalah langkah-langkah memperoleh hasil akhir secara matematis dan MATLAB.

1. Secara Matematis

1) Menentukan Himpunan *Fuzzy*

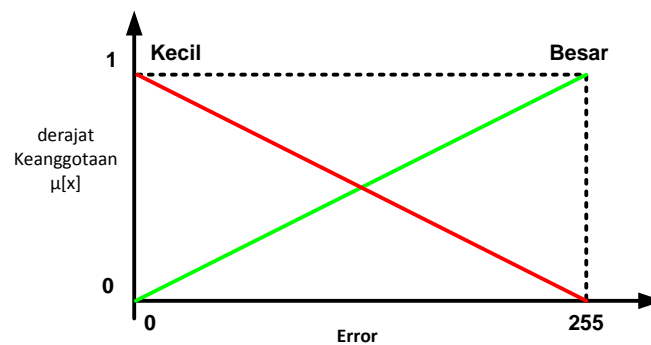
a. Variabel *Error*

Variabel *error* dipakai untuk menyatakan nilai inputan dari sensor *photodiode*. Variabel *error* dibagi menjadi dua sub variabel, Berikut himpunan *fuzzy* pada *error* :

Tabel 12.

Variabel *Error*

No	Nilai Pembacaan Sensor	Himpunan <i>Fuzzy</i>
1	0 – 255	Kecil
2	0 – 255	Besar



Gambar 33. Himpunan *Fuzzy Error*

Error; terdiri-atas 2 himpunan *fuzzy*, yaitu: KECIL dan BESAR

Kita bisa mencari nilai keanggotaan:

$$\mu_{ErrorKECIL}[0] = (255-0)/255 = 1$$

$$\mu_{ErrorBESAR}[0] = (0-0)/255 = 0$$

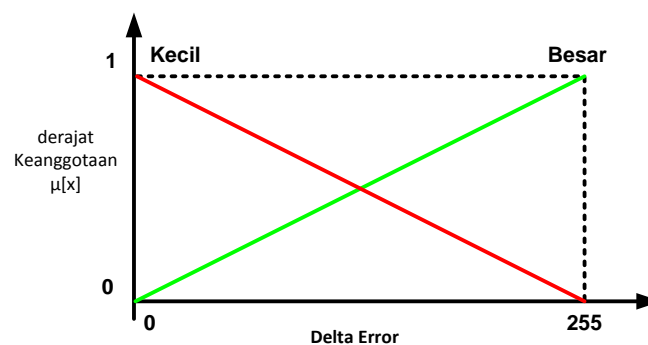
b. Variabel *Delta Error*

Variabel *Delta Error* dipakai untuk menyatakan turunan pertama nilai inputan dari sensor *photodiode*. Variabel *Delta error* dibagi menjadi dua sub variabel, Berikut himpunan *fuzzy* pada *Delta error* :

Tabel 13.

Variabel *Delta Error*

No	Nilai <i>Delta Error</i>	Himpunan <i>Fuzzy</i>
1	0 – 255	Kecil
2	0 – 255	Besar



Gambar 34. Himpunan *Fuzzy Delta Error*

Delta Error; terdiri-atas 2 himpunan *fuzzy* juga, yaitu: KECIL dan BESAR

Kita bisa mencari nilai keanggotaan:

$$\mu_{DeltaErrorKECIL}[0] = (255-0)/255 = 1$$

$$\mu_{DeltaErrorBESAR}[0] = (0-0)/255 = 0$$

c. Variabel *Output PWM*

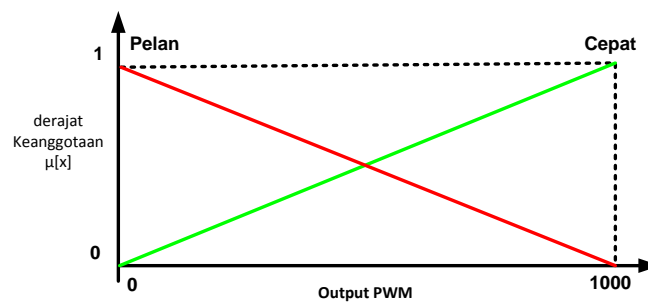
Variabel PWM merupakan output yang diharapkan dalam sistem ini. Kriterianya dibuat berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, hasil yang diharapkan disini adalah agar *output PWM* yang dihasilkan sesuai

dengan dengan yang diharapkan, sehingga motor dapat berputar dengan halus.

Tabel 14.

Variabel Output PWM

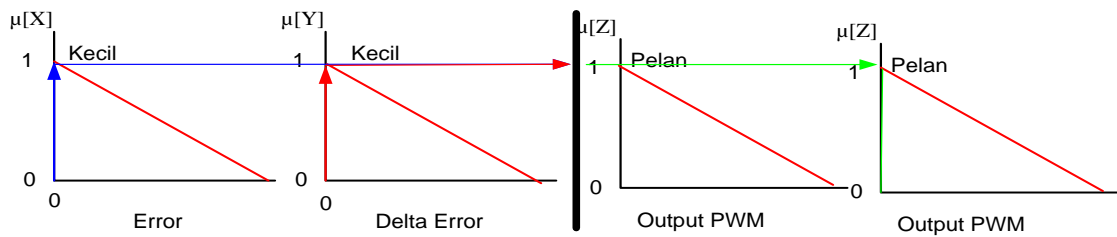
No	Nilai Output PWM	Himpunan <i>Fuzzy</i>
1	0 – 1000	Pelan
2	0 – 1000	Cepat

Gambar 35. Himpunan *Fuzzy* Output PWM

2) Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF *Error* KECIL And *Delta Error* KECIL THEN *Output* PWM PELAN.

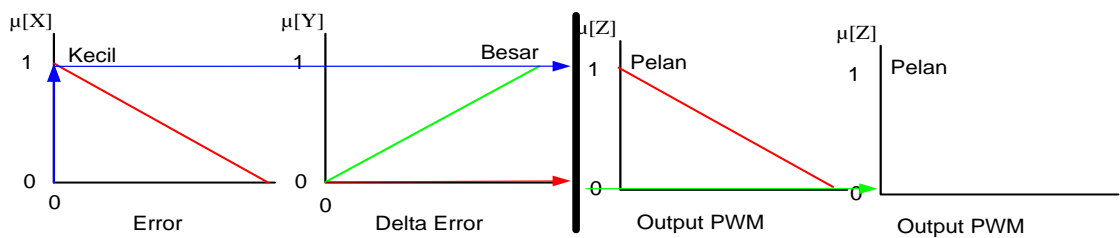
$$\begin{aligned}
 \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{ErrorKECIL} \cap \mu_{DeltaErrorKECIL} \\
 &= \min(\mu_{ErrorKECIL} [0], \mu_{DeltaErrorKECIL} [0]) \\
 &= \min(1;1) \\
 &= 1
 \end{aligned}$$



Gambar 36. Aplikasi fungsi implikasi untuk R1.

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

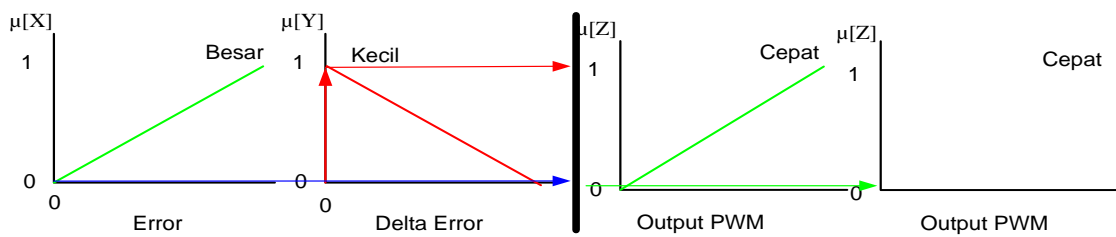
$$\begin{aligned}
 \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorKECIL}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\
 &= \min(\mu_{\text{ErrorKECIL}} [0], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [0]) \\
 &= \min(1;0) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$



Gambar 37. Aplikasi fungsi implikasi untuk R2.

[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

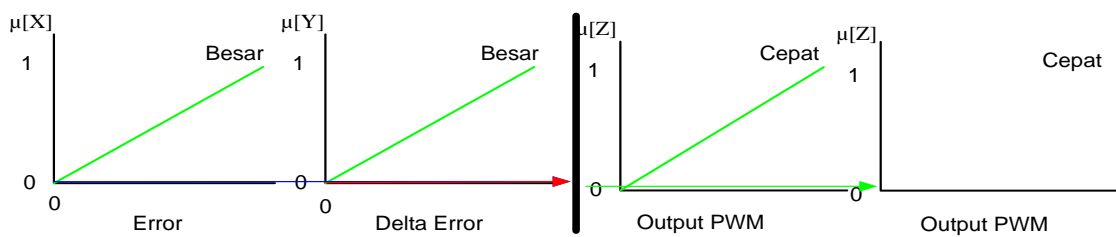
$$\begin{aligned}
 \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorKECIL}} \\
 &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [0], \mu_{\text{DeltaErrorKECIL}} [0]) \\
 &= \min(0;1) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$



Gambar 38. Aplikasi fungsi implikasi untuk R3.

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

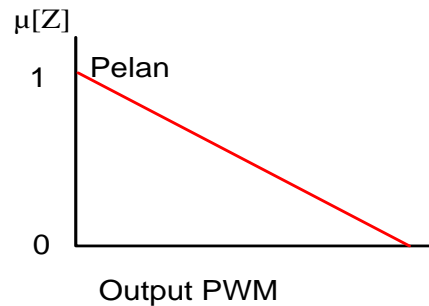
$$\begin{aligned}
 \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\
 &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [0], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [0]) \\
 &= \min(0;0) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$



Gambar 39. Aplikasi fungsi implikasi untuk R4.

3) Komposisi antar aturan

Dari hasil aplikasi fungsi implikasi dari setiap aturan, digunakan metode MAX untuk melakukan komposisi antar semua aturan. Hasilnya seperti pada Gambar 40.



Gambar 40. Daerah hasil komposisi.

4) Penegasan (*defuzzy*)

Metode penegasan yang akan digunakan adalah metode centroid. Untuk itu, pertama-tama dihitung terlebih dahulu momen untuk setiap daerah.

$$M = \int_0^{1000} \frac{(1000 - z)}{1000} z dz = \int_0^{1000} (1z - 0,001z^2) dz = 0,5z^2 - 0,00033z^3 \Big|_0^{1000} = 170000$$

Kemudian dihitung luas daerah:

$$A = (1) * (1000) / 2 = 500$$

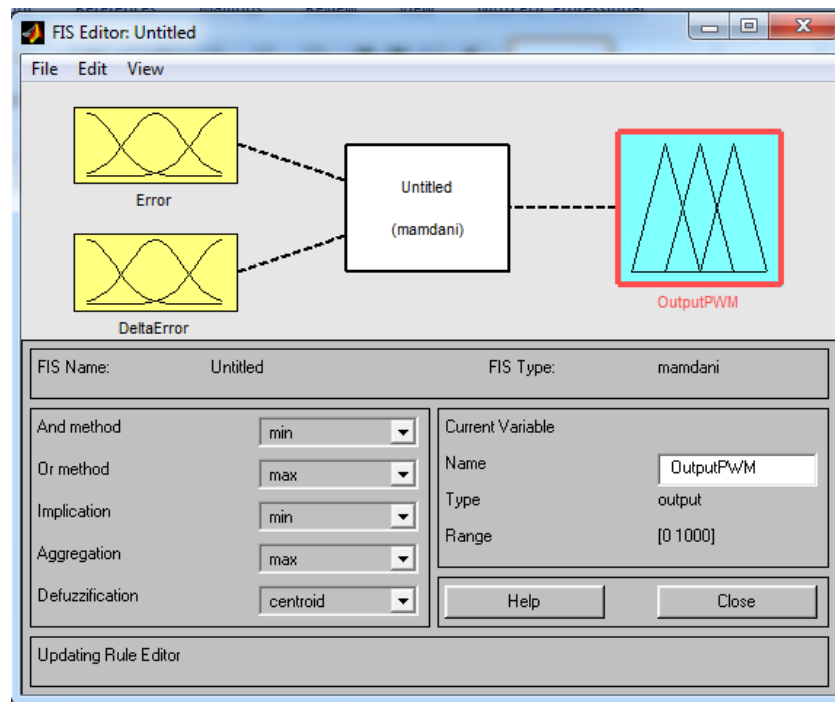
Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{170000}{500} = 340$$

Jadi output PWM yang dihasilkan sebesar 340.

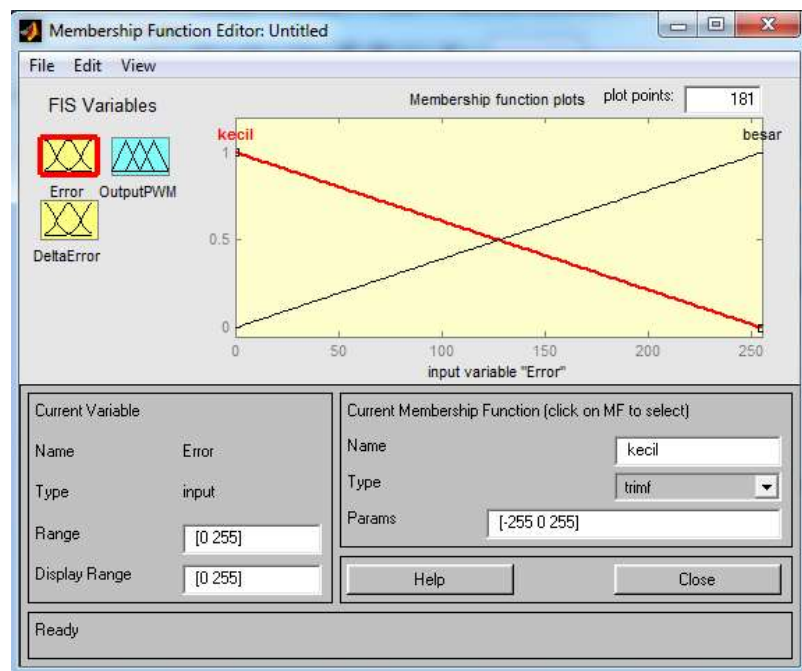
2. Secara MATLAB

Berikut ini adalah hasil implementasi metode Mamdani dalam penentuan output PWM dalam bahasa pemrograman MATLAB. Tampilan awal dari program penentuan output PWM menggunakan metode mamdani dalam bahasa pemrograman MATLAB dapat dilihat pada Gambar 41.

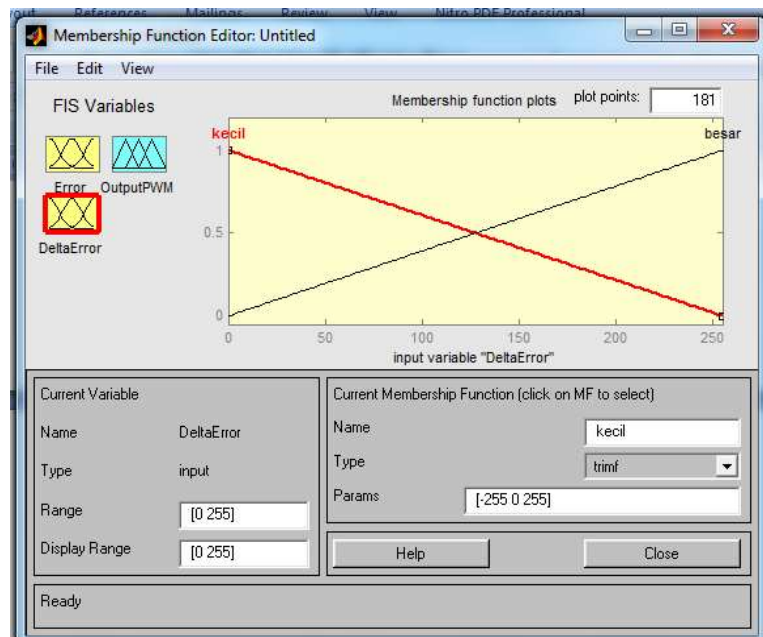


Gambar 41. Tampilan awal program

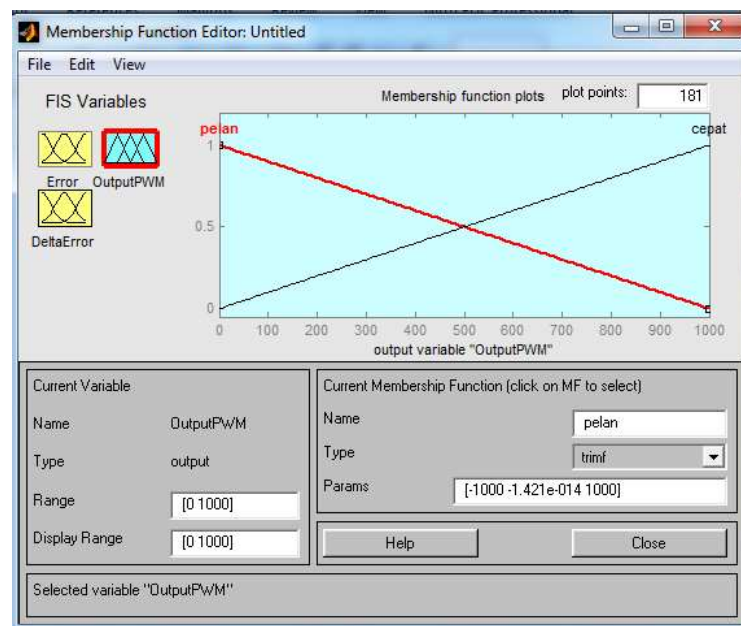
Berikutnya adalah tampilan *Membership Function*, disinilah tempat untuk mengkomposisikan himpunan *fuzzy*. Seperti berikut ini :



Gambar 42. Tampilan *Membership Funtion* Error

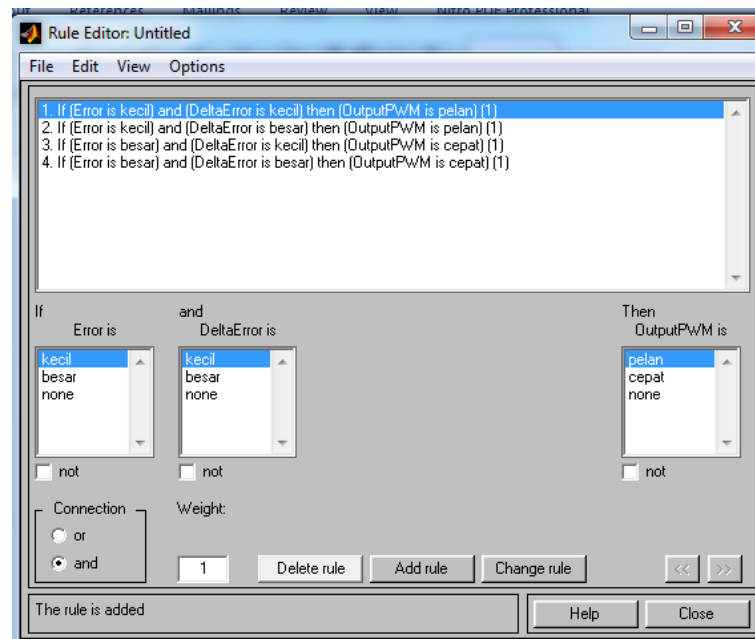


Gambar 43. Tampilan *Membership Funtion* Delta Error



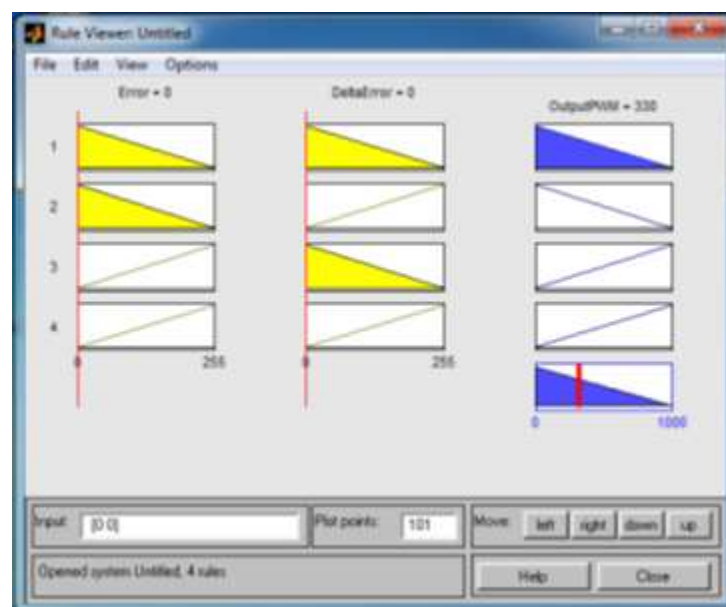
Gambar 44. Tampilan *Membership Funtion* Output PWM

Selanjutnya adalah *Rule Editor* yaitu tempat dimana *rule* dibuat, dihapus atau diedit.



Gambar 45. Tampilan *Rule Editor*

Terakhir adalah *Rule Viewer* dimana kita dapat memasukan input dan melihat output.



Gambar 46. Tampilan *Rule Viewer*

4.2.3.2 Pembahasan Perangkat Secara Keseluruhan

Sistem kendali logika *fuzzy* digunakan sebagai aplikasi sistem kontrol. Pengontrolan dengan sistem kendali logika *fuzzy* memiliki keuntungan dalam mengatasi permasalahan pada pengontrolan non linier dan adaptif. Aplikasi sistem kendali ini terdiri dari beberapa komponen seperti sensor *photodiode*, mikrokontroler dan motor DC. Proses kerja sistem kendali ini menggunakan Metode Mamdani yang diterapkan dalam mikrokontroler. Sedangkan pengaturan sinyal input dari mikrokontroler tersebut berdasarkan pembacaan sensor *photodiode*.

Setelah dilakukan pengujian pada sistem kendali ini, diperoleh data sesuai Tabel 10. Dari hasil pengujian tersebut dapat dilihat perbedaan pada output PWM yang memiliki hasil yang berbeda dengan hasil matematis maupun MATLAB. Apabila pembacaan error dari sensor *photodiode* sebesar 10 dan delta error 0, akan diperoleh output PWM sebesar 334,83. Sedangkan jika secara matematis dan MATLAB didapatkan output sebesar 340,79 dan 332. Dari data pengujian tersebut dapat diperoleh kesimpulan bahwa semakin kecil nilai error, maka semakin besar selisih hasil output PWM terhadap output secara matematis. Jika semakin besar nilai error, semakin besar selisih output secara matematis terhadap hasil output PWM. Begitu pula dengan output dengan pemrograman MATLAB.

Dengan demikian, sistem *software* dapat bekerja dengan baik. Hal ini dibuktikan dengan keluaran sistem kontroler yang dapat berubah mengikuti perubahan sinyal masukan dari kontroler.

4.3 Pengembangan (*Development*)

Dalam pengontrolan motor DC salah satu mode kontrol yang cukup banyak digunakan adalah kontrol *Proportional-Integral-Derivative* (PID). Dalam perkembangan teknologi kontrol yang tidak lagi memakai cara konvensional untuk mendapatkan suatu hasil yang diinginkan melalui persamaan matematika, penulis ingin mencoba mengembangkan kendali logika *fuzzy* untuk mengontrol motor DC.

Hasil dari penelitian ini merupakan suatu produk mikrokontrol dengan kontrol utama logika *fuzzy* sebagai kontrol pada motor DC dengan sensor *photodiode*. Pengembangan dan pengujian alat ini secara nyata dilakukan di dua tempat, yaitu di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Negeri Semarang sebagai lembaga riset dan Fornext Semarang sebagai lembaga pengembang robot edukasi.

Sebagai media dalam pengembangan kontrol ini yaitu pada robot pengikut garis (*line follower robot*). Robot pengikut garis (*line follower robot*) merupakan suatu bentuk robot bergerak otonom yang mempunyai misi mengikuti suatu garis pandu yang telah ditentukan secara otonom.

Dalam berbagai rancangan dan artikel penelitian sistem kendali yang sering digunakan dalam robot pengikut garis (*line follower robot*) adalah PID (*Proportional-Integral-Derivative*). Sistem kendali PID merumuskan secara matematis, untuk mencapai kondisi ideal *set point* dengan cara memperbaiki nilai *error* hingga nol melalui *feedback*. Nilai *set point* dan *error* berasal dari pembacaan posisi robot *line follower* terhadap garis. Dengan menentukan *set*

point robot pengikut garis (*line follower robot*) akan bermanuver memposisikan berada di tengah jalur.

Karakteristik kontrol PID sangat dipengaruhi oleh kontribusi besar dari ketiga parameter P, I dan D. Penyetelan konstanta K_p , K_i , dan K_d akan mengakibatkan penonjolan sifat dari masing-masing elemen. Semakin besar K_p semakin baik akan tetapi jika terlalu besar robot akan getar karena setiap sedikit terjadi *error* maka robot akan dengan cepat memeperbaikinya. K_i pada robot pengikut garis (*line follower robot*) sebenarnya tidak berpengaruh, karena K_i akan mengintegalkan setiap *error* terhadap waktu, dimana robot tidak pernah pada posisi lebih dari *error* tetapi yang diperlukan oleh robot adalah mengurangi atau menurunkan *error* seminimal mungkin. Pada robot pengikut garis (*line follower robot*) K_d digunakan untuk kecepatan robot dalam merespon terjadinya *error* untuk kembali pada kondisi normal. Sehingga dalam penyetelan konstanta K_p , K_i , dan K_d harus sesuai dengan kecepatan yang telah ditentukan.

Melalui penelitian ini, peneliti mengembangkan sistem kendali logika *fuzzy* metode Mamdani sebagai kontrol robot pengikut garis (*line follower robot*). Basis aturan dalam perancangan sistem dapat di lihat di Tabel 15 di bawah ini.

Tabel 15.

Basis Aturan Kendali Logika *Fuzzy* yang digunakan.

Error Delta Error	N	Z	P
N	RM=pelelan LM=cepat	RM=sedang LM=sedang	RM= cepat LM= pelan
Z	RM= pelan LM= cepat	RM=sedang LM=sedang	RM= cepat LM= pelan
P	RM= pelan LM= cepat	RM=sedang LM=sedang	RM= cepat LM= pelan

Dengan LM adalah kecepatan motor sisi kiri dan RM adalah kecepatan motor sisi kanan.

Dari Basis aturan yang telah disusun diatas yang nantinya digunakan sebagai penentuan keputusan dalam output PWM untuk mengatur kecepatan motor pada robot pengikut garis (*line follower robot*). Dalam penelitian ini penyetelan yang dilakukan hanyalah batas kecepatan minimum dan batas kecepatan maksimum pada robot, sehingga robot dapat berjalan sesuai dengan yang diinginkan. Berikut ini hasil dari penerapan logika *fuzzy* yang diterapkan pada robot pengikut garis (*line follower robot*). Untuk penentuan *V Min*, *V Max*, *Error* dan *Delta Error* dilakukan secara acak.

Tabel 16.

Hasil output pengujian robot pengikut garis

No	V Min	V Max	Error	Delta error	Output		MATLAB	
					LM	RM	LM	RM
1	100	400	-5	0	211	289	210	290
			-3	0	237	263	236	264
			3	0	263	237	264	236
			6	0	312	188	313	187
2	-100	400	-7	0	-17	317	-18,3	318
			-3	0	128	172	127	173
			4	0	189	111	191	109
			7	0	317	-17	318	-18,3
3	-200	300	-6	0	-54	154	-55,7	156
			0	0	50	50	50	50
			2	0	60	40	60,4	39,6
			5	0	115	-15	117	-17
4	-400	600	-6	0	-107	307	311	-111
			-4	0	21	179	18,1	182
			1	0	105	95	106	94,4
			4	0	179	21	182	18,1
5	-600	800	-3	0	39	161	36,3	164
			0	0	100	100	100	100
			4	0	211	-11	215	-14,6
			7	0	567	-367	571	-371

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa :

1. Sistem kendali logika *fuzzy* dengan mikrokontroler ATmega8535 dan menggunakan sensor *photodiode* dapat mengontrol kecepatan putar motor DC. Hal tersebut dengan cara:
 1. Pembentukan himpunan *fuzzy*. Pada proses fuzzifikasi langkah pertama adalah menentukan variabel *fuzzy* dan himpunan fuzzinya. Kemudian menentukan derajat kesepadanan (*degree of match*) antara data masukan *fuzzy* dengan himpunan *fuzzy* yang didefinisikan untuk setiap variabel masukan sistem dari setiap aturan *fuzzy*.
 2. Aplikasi fungsi implikasi pada metode mamdani. Fungsi implikasi yang digunakan adalah min. Implikasi *fuzzy* dilakukan berdasarkan pada kuat penyulutan dan himpunan *fuzzy* terdefinisi untuk setiap variabel keluaran di dalam bagian konsekuensi dari setiap aturan. Hasil implikasi *fuzzy* dari setiap aturan ini kemudian digabungkan untuk menghasilkan keluaran infrensi *fuzzy*.
 3. Komposisi Antar Aturan. Tidak seperti penalaran monoton, apabila sistem terdiri dari beberapa aturan, maka infrensi diperoleh dari kumpulan dan korelasi antar aturan. Ada 3 metode yang digunakan

dalam melakukan inferensi sistem fuzzy, yaitu: max, additive dan probabilistik OR.

4. Penegasan (*defuzzy*). Input dari proses *defuzzifikasi* adalah suatu himpunan fuzzy yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan fuzzy, sedangkan output yang dihasilkan merupakan suatu bilangan pada domain himpunan fuzzy tersebut.
2. Metode logika *fuzzy* dapat di implementasikan pada kontrol gerak Robot *Line Follower*, dengan cara sama seperti mengontrol kecepatan putar motor DC. Hanya saja dalam mengontrol gerak Robot *Line Follower* terdapat dua variabel output, yaitu output kontrol motor kanan dan output motor kiri serta untuk variabel masukan setiap sensor *photodiode* diberi nilai berdasarkan posisi sensor.

5.2 Saran

Pada penelitian ini masih terdapat beberapa hal yang perlu disempurnakan. Untuk pengembangan kontrol logika *fuzzy* disarankan menggunakan himpunan output lebih banyak sehingga output yang dihasilkan menjadi lebih halus.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, Muhamad. 2004. *Pembelajaran Perancangan Sistem Kontrol PID dengan Software Matlab, Jurnal Edukasi Vol.1 No.1:1-8*. Yogyakarta.
- Ashari, M.Ibrahim Dan Putu Steven Mendra. 2011. *Otomatisasi Penukaran Kupon Doorprize dengan Tiga Hadiah Pilihan dan LCD sebagai Tampilannya Berbasis Mikrokontroler At89s8252, Jurnal Teknik Elektro Vol.2 No. 2*. Malang.
- Bachri M., Samsul. 2004. *Sistem Kendali Hybrid PID-Logika Fuzzy pada Pengaturan Kecepatan Motor DC, Makara Teknologi, Vol.8 No. 1: 25-34*. Surabaya: Universitas Jember
- Bejo, Agus. 2008. *C dan AVR Rahasia Kemudahan Bahasa C dalam Mikrokontroler Atmega8535*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Kusumadewi, Sri dan Hari Purnomo. 2004. *Aplikasi Logika Fuzzy untuk Pendukung Keputusan*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Mulyana, Agus dan Nasrudin. 2014. *Games Puzzle Hijaiyah Elektronik Interaktif Berbasis Mikrokontroler DT-AVR Maxiduino*. Vol. 1, No. 1. Unikom.
- Rizal, Muhammad. 2012. *Rancangbangun dan Uji Kinerja Sistem Kontrol Irigasi Tetes pada Tanaman Strawberry (Fragaria Vesca L)*. Makasar: Universitas Hasanudin.
- Rochayati, Umi, dkk. 2012. *Inovasi Media Pembelajaran Sain Teknologi Di Smp Berbasis Mikrokontroler*. Volume 42, Nomor 1: 89-98. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta
- Sukmadi, Tedjo. 2006. *Estimasi Parameter adaptif Motor DC dengan Metode Algoritma genetik, Transmisi Vol.11 No. 1: 28-34*. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Sutikno Dan Indra Waspada. *Perbandingan Metode Defuzzifikasi Sistem Kendali Logika Fuzzy Model Mamdani pada Motor DC*. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Suwintana, I Ketut. 2013. *Sistem Inferensi Fuzzy Mamdani Berbasis Web, Jurnal Matrix Vol.3 No.1*. Bali: Politeknik Negeri Bali.

- Widiyantoro, Andreas, T. Sutojo Dan Sudaryanto. 2014. *Menerapkan Logika Fuzzy Mamdani untuk Menentukan Harga Jual Batik Vol.13 No.2: 69-74*. Semarang: Universitas Dian Nuswantoro.
- Winarno, Totok. 2009. *Aplikasi Fuzzy Logic Sebagai Kontrol Posisi Motor DC*. Malang: Politeknik Negeri Malang.
- Zain, Ruri Kartika. 2013. *Sistem Keamanan Ruangan Menggunakan Sensor Passive Infra Red (PIR) dilengkapi Kontrol Penerangan pada Ruangan Berbasis Mikrokontroler Atmega8535 dan Real Time Clock Ds1307*. *Jurnal Teknologi Informasi dan Pendidikan Vol.6 No.1*. Jakarta: UPI YPTK.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Surat Keputusan Pembimbing



**KEPUTUSAN
DEKAN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG**
Nomor: 815/FT-UNNES/2014
Tentang
**PENETAPAN DOSEN PEMBIMBING SKRIPSI/TUGAS AKHIR SEMESTER
GASAL/GENAP
TAHUN AKADEMIK 2014/2015**

Menimbang : Bahwa untuk mempertancar mahasiswa Jurusan/Prodi Teknik Elektro/Pend. Teknik Elektro Fakultas Teknik membuat Skripsi/Tugas Akhir, maka perlu menetapkan Dosen-dosen Jurusan/Prodi Teknik Elektro/Pend. Teknik Elektro Fakultas Teknik UNNES untuk menjadi pembimbing.

Mengingat : 1. Undang-undang No.20 Tahun 2003 tentang Sistem Pendidikan Nasional (Tambahan Lembaran Negara RI No.4301, penjelasan atas Lembaran Negara RI Tahun 2003, Nomor 78)
2. Peraturan Rektor No. 21 Tahun 2011 tentang Sistem Informasi Skripsi UNNES
3. SK Rektor UNNES No. 184/O/2004 tentang Pedoman penyusunan Skripsi/Tugas Akhir Mahasiswa Strata Satu (S1) UNNES;
4. SK Rektor UNNES No.162/O/2004 tentang penyelenggaraan Pendidikan UNNES.

Menimbang : Usulan Ketua Jurusan/Prodi Teknik Elektro/Pend. Teknik Elektro Tanggal 28 Oktober 2014

MEMUTUSKAN

Menetapkan :
PERTAMA : Menunjuk dan menugaskan kepada:
Nama : Drs. Suryono, M.T.
NIP : 195503161985031901
Pangkat/Golongan : IV/A
Jabatan Akademik : Lektor Kepala
Sebagai Pembimbing
Untuk membimbing mahasiswa penyusun skripsi/Tugas Akhir :
Nama : MOHAMAD NADHIF
NIM : 5301411030
Jurusan/Prodi : Teknik Elektro/Pend. Teknik Elektro
Topik : Aplikasi Fuzzy Logic untuk Pengendali Motor DC Berbasis Mikrokontroler Atmega8535 dengan Sensor Photo Dioda

KEDUA : Keputusan ini mulai berlaku sejak tanggal ditetapkan.

DITETAPKAN DI : SEMARANG
TANGGAL : 31 Oktober 2014

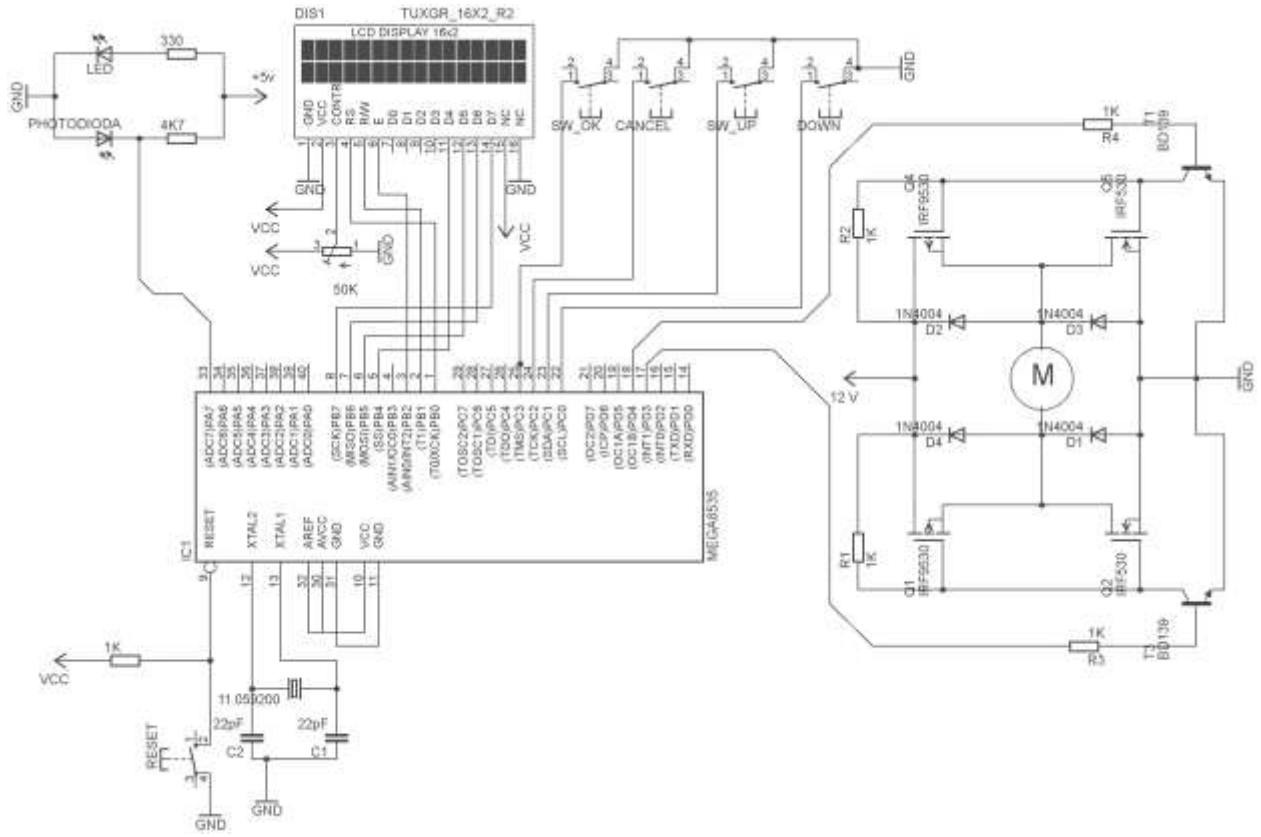

Mohammad Harlanu, M.Pd.
NIP. 196602151991021001

Tembusan
1. Pembantu Dekan Bidang Akademik
2. Ketua Jurusan
3. Petinggal



5301411030
FM-03-AKB-24/Rev. 00

Lampiran 2. Desain Rangkaian Alat



Lampiran 3. Hasil Perhitungan Logika *Fuzzy* secara Matematis Program Kontrol

1. Error[0] dan Delta Error[0]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu \text{ ErrorKECIL}[0] = (255-0)/255 = 1$$

$$- \mu \text{ ErrorBESAR}[0] = (0-0)/255 = 0$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu \text{ DeltaErrorKECIL}[0] = (255-0)/255 = 1$$

$$- \mu \text{ DeltaErrorBESAR}[0] = (0-0)/255 = 0$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorKECIL} \cap \mu\text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu\text{ErrorKECIL} [0], \mu\text{DeltaErrorKECIL} [0]) \\ &= \min(1;1) \\ &= 1 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorKECIL} \cap \mu\text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu\text{ErrorKECIL} [0], \mu\text{DeltaErrorBESAR} [0]) \\ &= \min(1;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

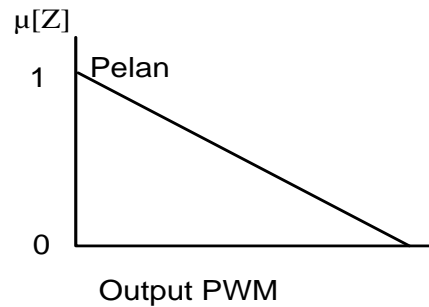
[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorBESAR} \cap \mu\text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu\text{ErrorBESAR} [0], \mu\text{DeltaErrorKECIL} [0]) \\ &= \min(0;1) \\ &= 0 \end{aligned}$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned}
 \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\
 &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [0], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [0]) \\
 &= \min(0;0) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M = \int_0^{1000} \frac{(1000 - z)}{1000} z \, dz = \int_0^{1000} (1z - 0,001z^2) \, dz = 0,5z^2 - 0,00033z^3 \Big|_0^{1000} = 170000$$

luas daerah:

$$A = (1) * (1000) / 2 = 500$$

Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{170000}{500} = 340$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 340.

2. Error[30] dan Delta Error[20]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu_{\text{ErrorKECIL}}[30] = (255-30)/255 = 0,88$$

$$- \mu_{\text{ErrorBESAR}}[30] = (30-0)/255 = 0,12$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu_{\text{DeltaErrorKECIL}}[20] = (255-20)/255 = 0,92$$

$$- \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}}[20] = (20-0)/255 = 0,08$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorKECIL}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorKECIL}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorKECIL}} [30], \mu_{\text{DeltaErrorKECIL}} [20]) \\ &= \min(0,88;0,92) \\ &= 0,88 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorKECIL}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorKECIL}} [30], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [20]) \\ &= \min(0,88;0,08) \\ &= 0,08 \end{aligned}$$

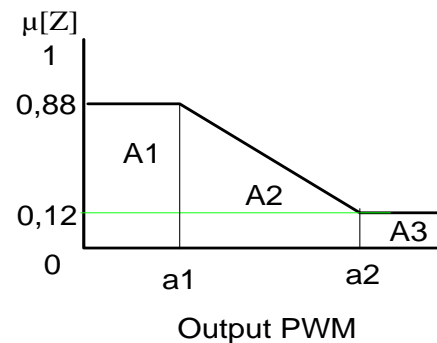
[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorKECIL}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [30], \mu_{\text{DeltaErrorKECIL}} [20]) \\ &= \min(0,12;0,92) \\ &= 0,12 \end{aligned}$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [30], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [20]) \\ &= \min(0,12;0,08) \\ &= 0,08 \end{aligned}$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(1000 - a_1)/1000 = 0,88 \quad \text{--->} \quad a_1 = 120$$

$$(1000 - a_2)/1000 = 0,12 \quad \text{--->} \quad a_2 = 880$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{120} (0,88)z \, dz = 0,44z^2 \Big|_0^{120} = 6336$$

$$M2 = \int_{120}^{880} \frac{(1000 - z)}{1000} z \, dz = \int_{120}^{880} (z - 0,001z^2) \, dz = 0,5z^2 - 0,00033z^3 \Big|_{120}^{880} = 155684,48$$

$$M3 = \int_{880}^{1000} (0,12)z \, dz = 0,06z^2 \Big|_{880}^{1000} = 13536$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 120 \cdot 0,88 = 105,6$$

$$A2 = (0,88 + 0,12) \cdot (880 - 120) / 2 = 380$$

$$A3 = (1000 - 880) \cdot 0,12 = 14,4$$

Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{6336 + 155684,48 + 13536}{105,6 + 380 + 14,4} = 351,11$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 351,11.

3. Error[70] dan Delta Error[50]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu \text{ ErrorKECIL}[70] = (255-70)/255 = 0,73$$

$$- \mu \text{ ErrorBESAR}[70] = (70-0)/255 = 0,27$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu \text{ DeltaErrorKECIL}[50] = (255-50)/255 = 0,80$$

$$- \mu \text{ DeltaErrorBESAR}[50] = (50-0)/255 = 0,20$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorKECIL} \cap \mu\text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu\text{ErrorKECIL} [70], \mu\text{DeltaErrorKECIL} [50]) \\ &= \min(0,73;0,80) \\ &= 0,73 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorKECIL} \cap \mu\text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu\text{ErrorKECIL} [70], \mu\text{DeltaErrorBESAR} [50]) \\ &= \min(0,73;0,20) \\ &= 0,20 \end{aligned}$$

[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorBESAR} \cap \mu\text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu\text{ErrorBESAR} [70], \mu\text{DeltaErrorKECIL} [50]) \\ &= \min(0,27;0,80) \\ &= 0,27 \end{aligned}$$

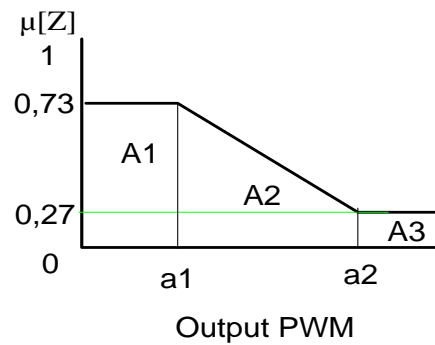
[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorBESAR} \cap \mu\text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu\text{ErrorBESAR} [70], \mu\text{DeltaErrorBESAR} [50]) \end{aligned}$$

$$= \min(0,27;0,20)$$

$$= 0,20$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(1000 - a_1)/1000 = 0,73 \quad \text{--->} \quad a_1 = 270$$

$$(1000 - a_2)/1000 = 0,27 \quad \text{--->} \quad a_2 = 730$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{270} (0,73)z \, dz = 0,365 z^2 \Big|_0^{270} = 26608,5$$

$$M2 = \int_{270}^{730} \frac{(1000 - z)}{1000} z \, dz = \int_{270}^{730} (z - 0,001z^2) \, dz = 0,5z^2 - 0,00033 z^3 \Big|_{270}^{730} = 108119,78$$

$$M3 = \int_{730}^{1000} (0,27)z \, dz = 0,135 z^2 \Big|_{730}^{1000} = 63058,5$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 270 \cdot 0,73 = 197,1$$

$$A2 = (0,73 + 0,27) \cdot (730 - 270) / 2 = 230$$

$$A3 = (1000 - 730) \cdot 0,27 = 72,9$$

Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{26608,5 + 108119,78 + 63058,5}{197,1 + 230 + 72,9} = 395,57$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 395,57 .

4. Error[105] dan Delta Error[90]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu \text{ ErrorKECIL}[105] = (255-105)/255 = 0,59$$

$$- \mu \text{ ErrorBESAR}[105] = (105-0)/255 = 0,41$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu \text{ DeltaErrorKECIL}[90] = (255-90)/255 = 0,65$$

$$- \mu \text{ DeltaErrorBESAR}[90] = (90-0)/255 = 0,35$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [105], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [90]) \\ &= \min(0,59;0,65) \\ &= 0,59 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [105], \mu \text{DeltaErrorBESAR} [90]) \\ &= \min(0,59;0,35) \\ &= 0,35 \end{aligned}$$

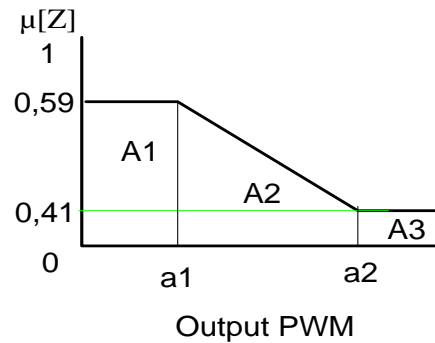
[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorBESAR} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorBESAR} [105], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [90]) \\ &= \min(0,41;0,65) \\ &= 0,41 \end{aligned}$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned}
 \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\
 &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [105], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [90]) \\
 &= \min(0,41;0,35) \\
 &= 0,35
 \end{aligned}$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(1000 - a_1)/1000 = 0,59 \quad \text{--->} \quad a_1 = 410$$

$$(1000 - a_2)/1000 = 0,41 \quad \text{--->} \quad a_2 = 590$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{410} (0,59)z \, dz = 0,295 z^2 \Big|_0^{410} = 49589,5$$

$$M2 = \int_{410}^{590} \frac{(1000 - z)}{1000} z \, dz = \int_{410}^{590} (z - 0,001z^2) \, dz = 0,5z^2 - 0,00033 z^3 \Big|_{410}^{590} = 44968,68$$

$$M3 = \int_{590}^{1000} (0,41)z \, dz = 0,205 z^2 \Big|_{590}^{1000} = 133639,5$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 410 * 0,59 = 241,9$$

$$A2 = (0,59 + 0,41) * (590 - 410) / 2 = 90$$

$$A3 = (1000 - 590) * 0,41 = 168,1$$

Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{49589,5 + 44968,68 + 133639,5}{241,9 + 90 + 168,1} = 456,40$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 456,40.

5. Error[125] dan Delta Error[140]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu \text{ErrorKECIL}[125] = (255-125)/255 = 0,51$$

$$- \mu \text{ErrorBESAR}[125] = (125-0)/255 = 0,49$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu \text{DeltaErrorKECIL}[140] = (255-140)/255 = 0,45$$

$$- \mu \text{DeltaErrorBESAR}[140] = (140-0)/255 = 0,55$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorKECIL} \cap \mu\text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu\text{ErrorKECIL} [125], \mu\text{DeltaErrorKECIL} [140]) \\ &= \min(0,51;0,45) \\ &= 0,45 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorKECIL} \cap \mu\text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu\text{ErrorKECIL} [125], \mu\text{DeltaErrorBESAR} [140]) \\ &= \min(0,51;0,55) \\ &= 0,51 \end{aligned}$$

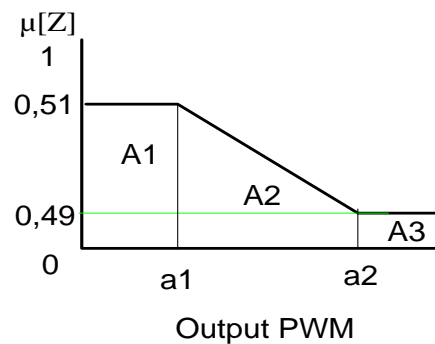
[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorBESAR} \cap \mu\text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu\text{ErrorBESAR} [125], \mu\text{DeltaErrorKECIL} [140]) \\ &= \min(0,49;0,45) \\ &= 0,45 \end{aligned}$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned}\alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [125], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [140]) \\ &= \min(0,49;0,55) \\ &= 0,49\end{aligned}$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(1000 - a_1)/1000 = 0,51 \quad \text{--->} \quad a_1 = 490$$

$$(1000 - a_2)/1000 = 0,49 \quad \text{--->} \quad a_2 = 510$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{490} (0,51)z \, dz = 0,255 z^2 \Big|_0^{490} = 61225,5$$

$$M2 = \int_{490}^{510} \frac{(1000 - z)}{1000} z \, dz = \int_{490}^{510} (z - 0,001 z^2) \, dz = 0,5 z^2 - 0,00033 z^3 \Big|_{490}^{510} = 5049,34$$

$$M3 = \int_{510}^{1000} (0,49)z \, dz = 0,245 z^2 \Big|_{510}^{1000} = 181275,5$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 490 \cdot 0,51 = 249,9$$

$$A2 = (0,51 + 0,49) \cdot (510 - 490) / 2 = 10$$

$$A3 = (1000 - 510) \cdot 0,49 = 240,1$$

Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{61225,5 + 5049,34 + 181275,5}{249,9 + 10 + 240,1} = 495,10$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 495,10.

6. Error[160] dan Delta Error[75]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu_{\text{ErrorKECIL}}[160] = (255-160)/255 = 0,37$$

$$- \mu_{\text{ErrorBESAR}}[160] = (160-0)/255 = 0,63$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu_{\text{DeltaErrorKECIL}}[75] = (255-75)/255 = 0,70$$

$$- \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}}[75] = (75-0)/255 = 0,30$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorKECIL}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorKECIL}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorKECIL}} [160], \mu_{\text{DeltaErrorKECIL}} [75]) \\ &= \min(0,37;0,70) \\ &= 0,37 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorKECIL}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorKECIL}} [160], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [75]) \\ &= \min(0,37;0,30) \\ &= 0,30 \end{aligned}$$

[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

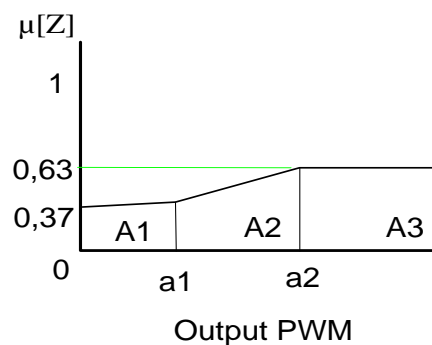
$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorKECIL}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [160], \mu_{\text{DeltaErrorKECIL}} [75]) \\ &= \min(0,63;0,70) \end{aligned}$$

$$= 0,63$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned}\alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [160], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [75]) \\ &= \min(0,63;0,30) \\ &= 0,30\end{aligned}$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(a_1 - 0)/1000 = 0,37 \text{ ---> } a_1 = 370$$

$$(a_2 - 0)/1000 = 0,63 \text{ ---> } a_2 = 630$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{370} (0,37)z \, dz = 0,1185 z^2 \Big|_0^{370} = 25326,5$$

$$M2 = \int_{370}^{630} \frac{(z-0)}{1000} z \, dz = \int_{370}^{630} (0,001z^2) \, dz = 0,00033 z^3 \Big|_{370}^{630} = 65800,02$$

$$M3 = \int_{630}^{1000} (0,63)z \, dz = 0,315 z^2 \Big|_{630}^{1000} = 189976,5$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 370 \cdot 0,37 = 136,9$$

$$A2 = (0,37+0,63) \cdot (630-370)/2 = 130$$

$$A3 = (1000-630)*0,63 = 233,1$$

Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{25326,5 + 65800,02 + 189976,5}{136,9 + 130 + 233,1} = 562,21$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 562,21.

7. Error[180] dan Delta Error[200]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu \text{ ErrorKECIL}[180] = (255-180)/255 = 0,29$$

$$- \mu \text{ ErrorBESAR}[180] = (180-0)/255 = 0,71$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu \text{ DeltaErrorKECIL}[200] = (255-200)/255 = 0,22$$

$$- \mu \text{ DeltaErrorBESAR}[200] = (200-0)/255 = 0,78$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [180], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [200]) \\ &= \min(0,29;0,22) \\ &= 0,22 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [180], \mu \text{DeltaErrorBESAR} [200]) \\ &= \min(0,29;0,78) \\ &= 0,29 \end{aligned}$$

[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorBESAR} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorBESAR} [180], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [200]) \end{aligned}$$

$$= \min(0,71;0,22)$$

$$= 0,22$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

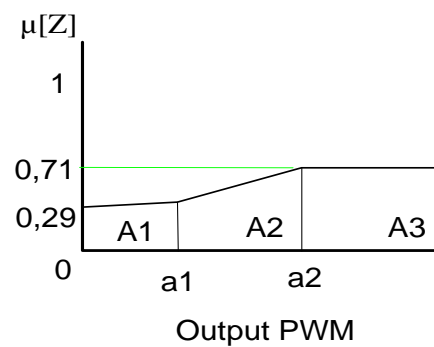
$$\alpha\text{-predikat1} = \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}}$$

$$= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [180], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [200])$$

$$= \min(0,71;0,78)$$

$$= 0,71$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(a_1 - 0)/1000 = 0,29 \quad \text{--->} \quad a_1 = 290$$

$$(a_2 - 0)/1000 = 0,71 \quad \text{--->} \quad a_2 = 710$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{290} (0,29)z \, dz = 0,145 z^2 \Big|_0^{290} = 12194,5$$

$$M2 = \int_{290}^{710} \frac{(z-0)}{1000} z \, dz = \int_{290}^{710} (0,001 z^2) \, dz = 0,00033 z^3 \Big|_{290}^{710} = 110062,26$$

$$M3 = \int_{710}^{1000} (0,71)z \, dz = 0,355 z^2 \Big|_{710}^{1000} = 176044,5$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 290 \cdot 0,29 = 84,1$$

$$A2 = (0,29+0,71) \cdot (710-290)/2 = 210$$

$$A3 = (1000-710)*0,71 = 205,9$$

Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{12194,5 + 110062,26 + 176044,5}{84,1 + 210 + 205,9} = 596,60$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 596,60.

8. Error[200] dan Delta Error[100]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu \text{ ErrorKECIL}[200] = (255-200)/255 = 0,22$$

$$- \mu \text{ ErrorBESAR}[200] = (200-0)/255 = 0,78$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu \text{ DeltaErrorKECIL}[100] = (255-100)/255 = 0,61$$

$$- \mu \text{ DeltaErrorBESAR}[100] = (100-0)/255 = 0,39$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [200], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [100]) \\ &= \min(0,22;0,61) \\ &= 0,22 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [200], \mu \text{DeltaErrorBESAR} [100]) \\ &= \min(0,22;0,39) \\ &= 0,22 \end{aligned}$$

[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorBESAR} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorBESAR} [200], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [100]) \end{aligned}$$

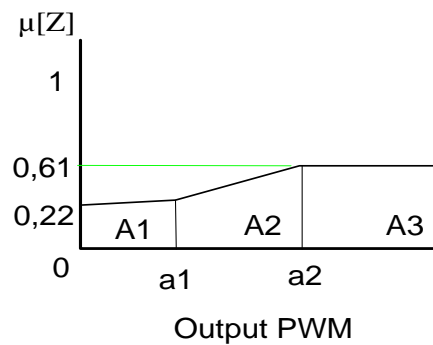
$$= \min(0,78;0,61)$$

$$= 0,61$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [200], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [100]) \\ &= \min(0,78;0,39) \\ &= 0,39 \end{aligned}$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(a_1 - 0)/1000 = 0,22 \quad \text{--->} \quad a_1 = 220$$

$$(a_2 - 0)/1000 = 0,61 \quad \text{--->} \quad a_2 = 610$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{220} (0,22)z \, dz = 0,11z^2 \Big|_0^{220} = 5324$$

$$M2 = \int_{220}^{610} \frac{(z-0)}{1000} z \, dz = \int_{220}^{610} (0,001z^2) \, dz = 0,00033 z^3 \Big|_{220}^{610} = 70598,15$$

$$M3 = \int_{610}^{1000} (0,61)z \, dz = 0,305 z^2 \Big|_{610}^{1000} = 192310,65$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 220 \cdot 0,22 = 48,4$$

$$A2 = (0,22+0,61) \cdot (610-220)/2 = 161,02$$

$$A3 = (1000-610)*0,61 = 239,12$$

Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{5324 + 70598,15 + 192310,65}{48,4 + 161,02 + 239,12} = 598,01$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 598,01.

9. Error[234] dan Delta Error[20]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu \text{ErrorKECIL}[234] = (255-234)/255 = 0,08$$

$$- \mu \text{ErrorBESAR}[234] = (234-0)/255 = 0,92$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu \text{DeltaErrorKECIL}[20] = (255-20)/255 = 0,92$$

$$- \mu \text{DeltaErrorBESAR}[20] = (20-0)/255 = 0,08$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorKECIL} \cap \mu\text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu\text{ErrorKECIL} [234], \mu\text{DeltaErrorKECIL} [20]) \\ &= \min(0,08;0,92) \\ &= 0,08 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorKECIL} \cap \mu\text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu\text{ErrorKECIL} [234], \mu\text{DeltaErrorBESAR} [20]) \\ &= \min(0,08;0,08) \\ &= 0,08 \end{aligned}$$

[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorBESAR} \cap \mu\text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu\text{ErrorBESAR} [234], \mu\text{DeltaErrorKECIL} [20]) \end{aligned}$$

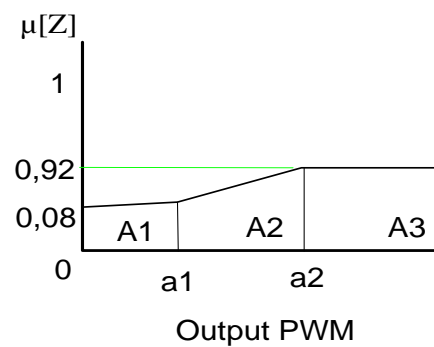
$$= \min(0,92;0,92)$$

$$= 0,92$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [234], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [20]) \\ &= \min(0,92;0,08) \\ &= 0,08 \end{aligned}$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(a_1 - 0)/1000 = 0,08 \quad \text{---> } a_1 = 80$$

$$(a_2 - 0)/1000 = 0,92 \quad \text{---> } a_2 = 920$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{80} (0,08)z \, dz = 0,04z^2 \Big|_0^{80} = 256$$

$$M2 = \int_{80}^{920} \frac{(z-0)}{1000} z \, dz = \int_{80}^{920} (0,001z^2) \, dz = 0,00033z^3 \Big|_{80}^{920} = 258114,73$$

$$M3 = \int_{920}^{1000} (0,92)z \, dz = 0,46z^2 \Big|_{920}^{1000} = 69327,18$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 80 \cdot 0,08 = 6,4$$

$$A2 = (0,08+0,92) \cdot (920-80)/2 = 421$$

$$A3 = (1000-920)*0,92 = 71,76$$

Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{256 + 258114,73 + 69327,18}{6,4 + 421 + 71,76} = 656,50$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 656,50.

10. Error[250] dan Delta Error[80]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu \text{ ErrorKECIL}[250] = (255-250)/255 = 0,02$$

$$- \mu \text{ ErrorBESAR}[250] = (250-0)/255 = 0,98$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu \text{ DeltaErrorKECIL}[80] = (255-80)/255 = 0,69$$

$$- \mu \text{ DeltaErrorBESAR}[80] = (80-0)/255 = 0,31$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [250], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [80]) \\ &= \min(0,02;0,69) \\ &= 0,02 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [250], \mu \text{DeltaErrorBESAR} [80]) \\ &= \min(0,02;0,31) \\ &= 0,02 \end{aligned}$$

[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorBESAR} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorBESAR} [250], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [80]) \end{aligned}$$

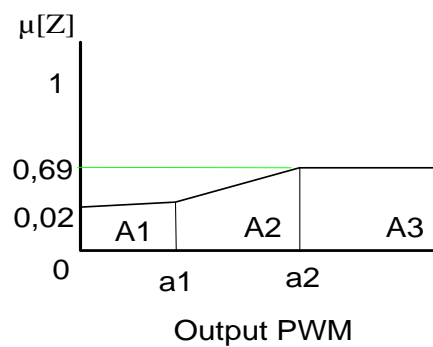
$$= \min(0,98;0,69)$$

$$= 0,69$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [250], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [80]) \\ &= \min(0,98;0,31) \\ &= 0,31 \end{aligned}$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(a_1 - 0)/1000 = 0,02 \quad \text{--->} \quad a_1 = 20$$

$$(a_2 - 0)/1000 = 0,69 \quad \text{--->} \quad a_2 = 690$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{20} (0,02)z \, dz = 0,01z^2 \Big|_0^{20} = 4$$

$$M2 = \int_{20}^{690} \frac{(z-0)}{1000} z \, dz = \int_{20}^{690} (0,001z^2) \, dz = 0,00033 z^3 \Big|_{20}^{690} = 258114,73$$

$$M3 = \int_{690}^{1000} (0,69)z \, dz = 0,345 z^2 \Big|_{690}^{1000} = 182514,42$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 20 \cdot 0,02 = 0,4$$

$$A2 = (0,02+0,69) \cdot (690-20)/2 = 236,43$$

$$A_3 = (1000-690)*0,69 = 216,66$$

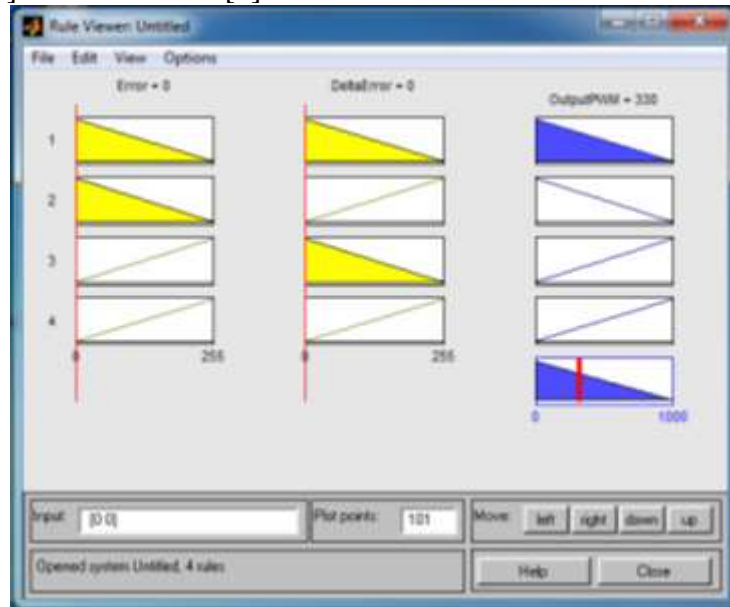
Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{4 + 258114,73 + 182514,42}{0,4 + 236,43 + 216,66} = 637,67$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 637,67.

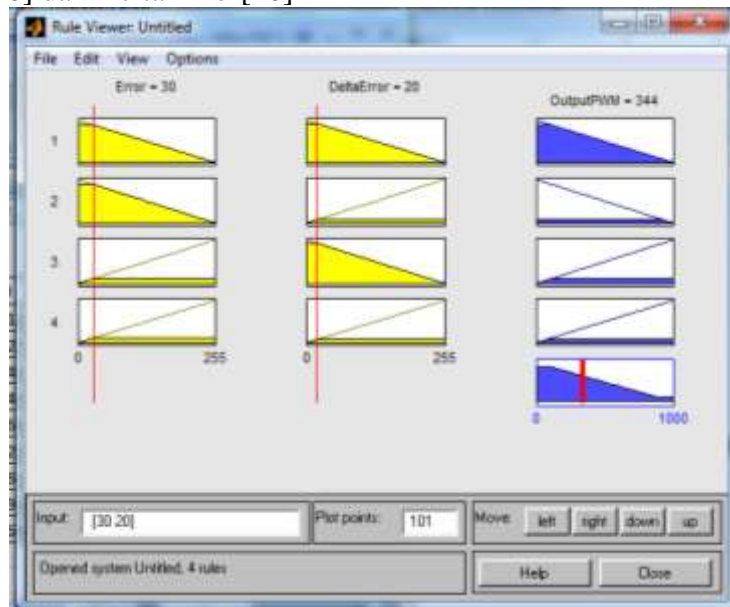
Lampiran 4. Hasil Pengujian dengan MATLAB Program Kontrol

1. Error[0] dan Delta Error[0]



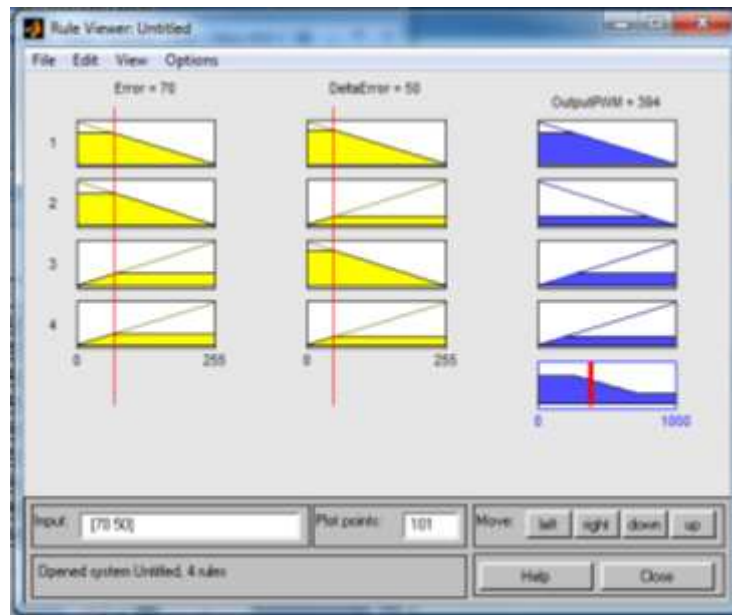
Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[0] dan Delta Error[0]

2. Error[30] dan Delta Error[20]

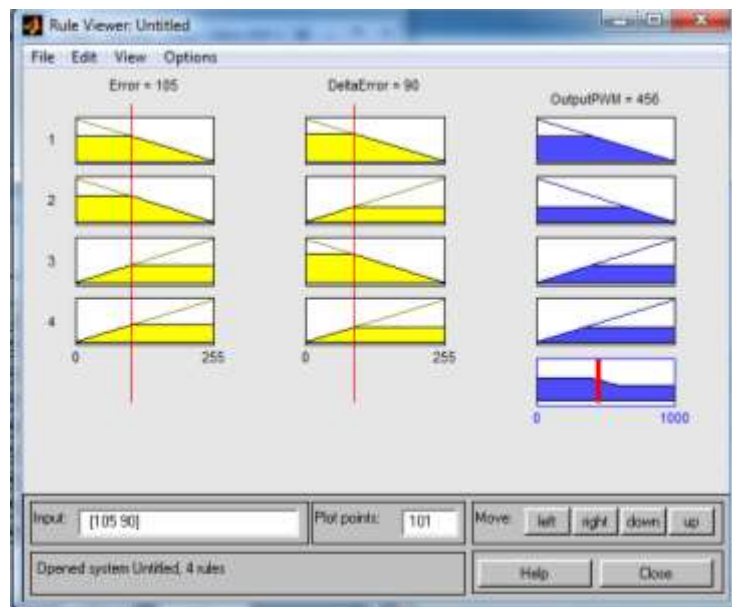


Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[30] dan Delta Error[20]

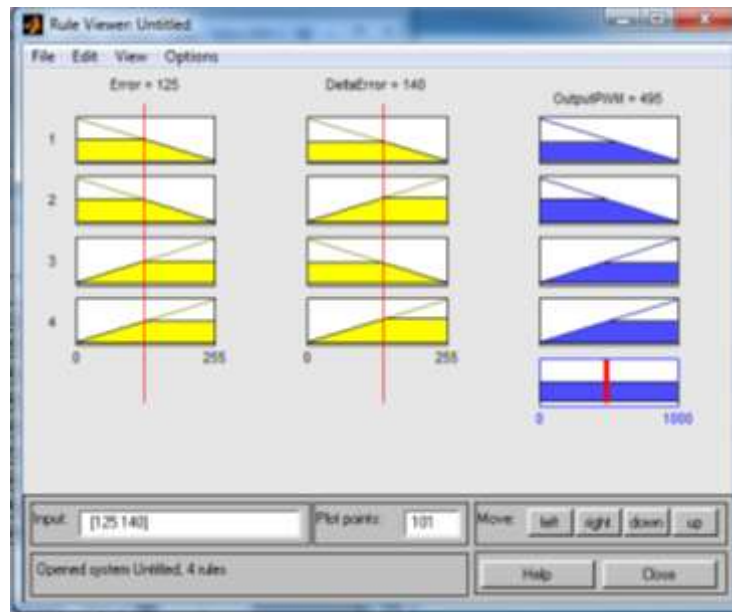
3. Error[70] dan Delta Error[50]

Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[70] dan Delta Error[50]

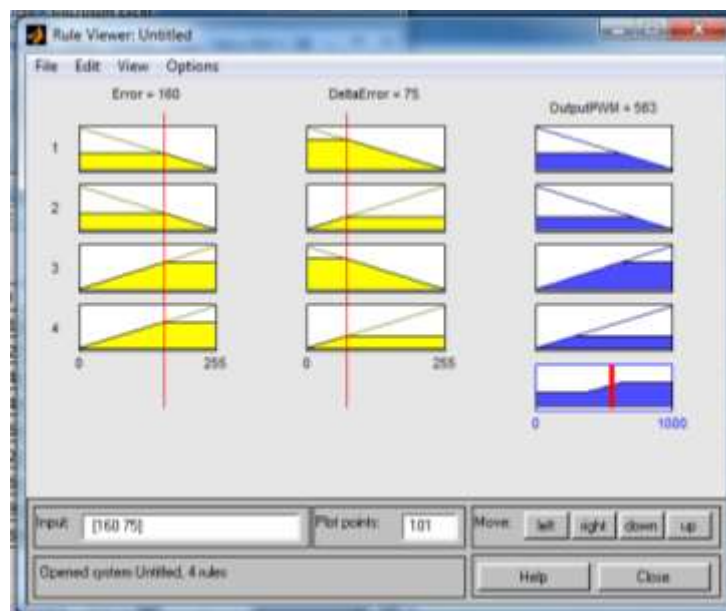
4. Error[105] dan Delta Error[90]

Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[105] dan Delta Error[90]

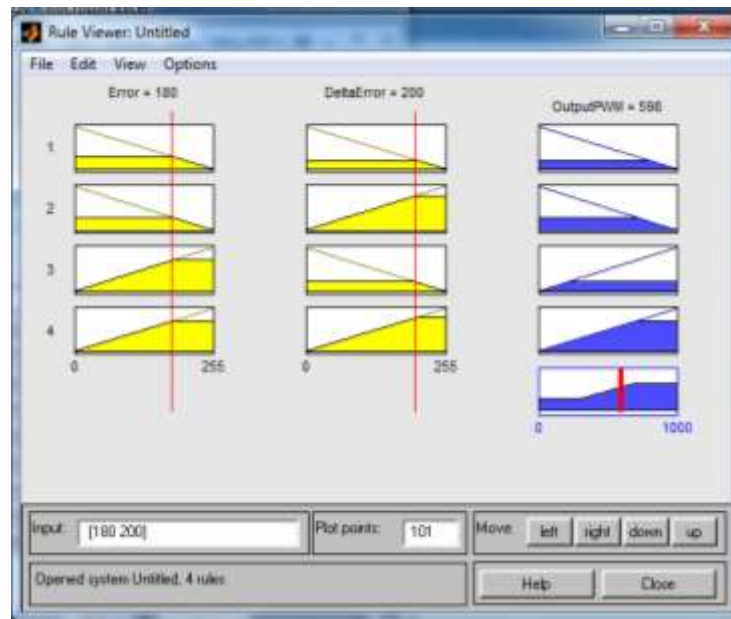
5. Error[125] dan Delta Error[140]

Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[125] dan Delta Error[140]

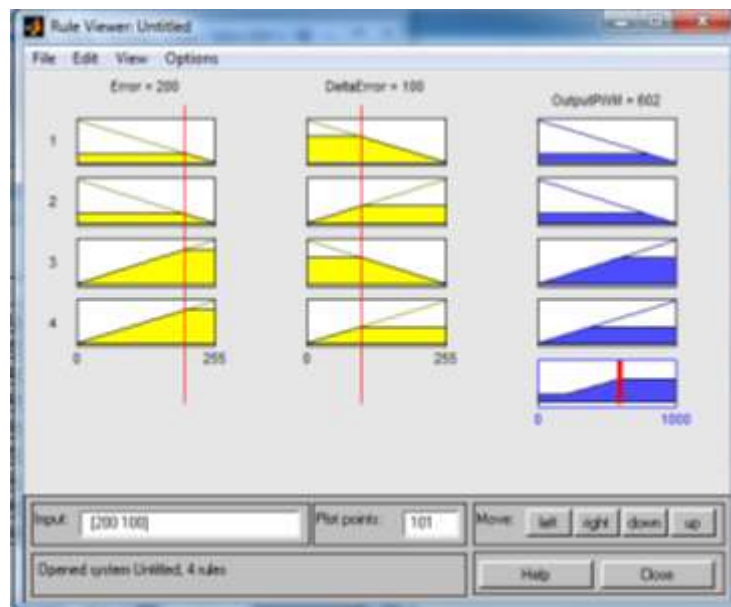
6. Error[160] dan Delta Error[75]

Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[160] dan Delta Error[75]

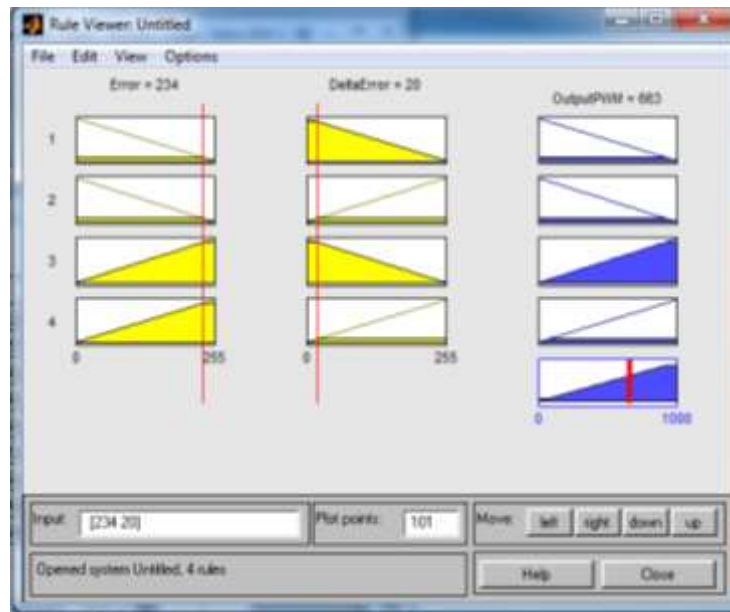
7. Error[180] dan Delta Error[200]

Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[180] dan Delta Error[200]

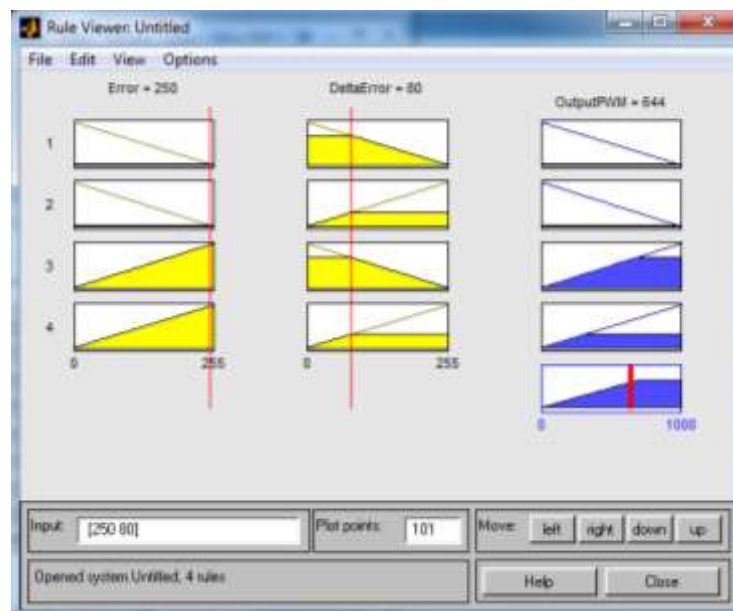
8. Error[200] dan Delta Error[100]

Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[200] dan Delta Error[100]

9. Error[234] dan Delta Error[20]

Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[234] dan Delta Error[20]

10. Error[250] dan Delta Error[80]

Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[250] dan Delta Error[80]

Lampiran 5. Hasil Perhitungan Logika *Fuzzy* secara Matematis Perangkat secara Keseluruhan

1. Error[10] dan Delta Error[0]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$-\mu \text{ ErrorKECIL}[10] = (255-10)/255 = 0,96$$

$$-\mu \text{ ErrorBESAR}[10] = (10-0)/255 = 0,04$$

b. Variabel Delta Error

$$-\mu \text{ DeltaErrorKECIL}[0] = (255-0)/255 = 1$$

$$-\mu \text{ DeltaErrorBESAR}[0] = (0-0)/255 = 0$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorKECIL} \cap \mu\text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu\text{ErrorKECIL} [10], \mu\text{DeltaErrorKECIL} [0]) \\ &= \min(0,96;1) \\ &= 0,96 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorKECIL} \cap \mu\text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu\text{ErrorKECIL} [10], \mu\text{DeltaErrorBESAR} [0]) \\ &= \min(0,96;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

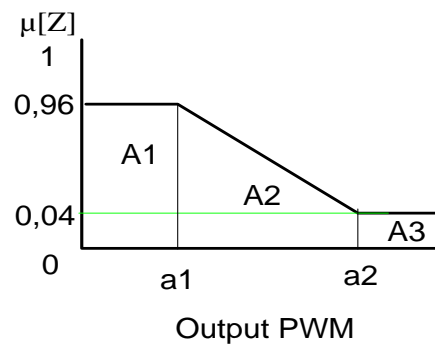
[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorBESAR} \cap \mu\text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu\text{ErrorBESAR} [10], \mu\text{DeltaErrorKECIL} [0]) \\ &= \min(0,04;1) \\ &= 0,04 \end{aligned}$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned}
 \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\
 &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [10], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [0]) \\
 &= \min(0,04;0) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(1000 - a_1)/1000 = 0,96 \quad \text{--->} \quad a_1 = 40$$

$$(1000 - a_2)/1000 = 0,04 \quad \text{--->} \quad a_2 = 960$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{40} (0,96)z \, dz = 0,48z^2 \Big|_0^{40} = 768$$

$$M2 = \int_{40}^{960} \frac{(1000 - z)}{1000} z \, dz = \int_{40}^{960} (z - 0,001z^2) \, dz = 0,5z^2 - 0,00033z^3 \Big|_{40}^{960} = 168058,24$$

$$M3 = \int_{960}^{1000} (0,04)z \, dz = 0,02z^2 \Big|_{960}^{1000} = 1568$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 40 \cdot 0,96 = 38,4$$

$$A2 = (0,96 + 0,04) \cdot (960 - 40) / 2 = 460$$

$$A3 = (1000 - 960) \cdot 0,04 = 1,6$$

Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{768 + 168058,24 + 1568}{38,4 + 460 + 1,6} = 340,79$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 340,79.

2. Error[44] dan Delta Error[0]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu \text{ErrorKECIL}[44] = (255-44)/255 = 0,83$$

$$- \mu \text{ErrorBESAR}[44] = (44-0)/255 = 0,17$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu \text{DeltaErrorKECIL}[0] = (255-0)/255 = 1$$

$$- \mu \text{DeltaErrorBESAR}[0] = (0-0)/255 = 0$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorKECIL} \cap \mu\text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu\text{ErrorKECIL} [44], \mu\text{DeltaErrorKECIL} [0]) \\ &= \min(0,83;1) \\ &= 0,83 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorKECIL} \cap \mu\text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu\text{ErrorKECIL} [44], \mu\text{DeltaErrorBESAR} [0]) \\ &= \min(0,83;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

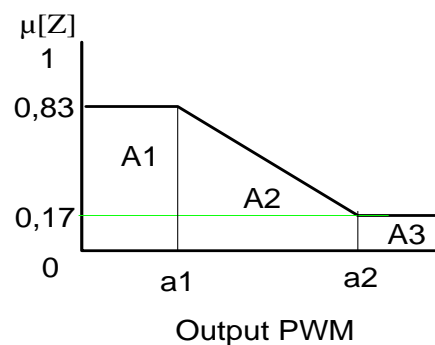
$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorBESAR} \cap \mu\text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu\text{ErrorBESAR} [44], \mu\text{DeltaErrorKECIL} [0]) \\ &= \min(0,17;1) \end{aligned}$$

$$= 0,17$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned}\alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [44], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [0]) \\ &= \min(0,17;0) \\ &= 0\end{aligned}$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(1000 - a_1)/1000 = 0,83 \quad \text{--->} \quad a_1 = 170$$

$$(1000 - a_2)/1000 = 0,17 \quad \text{--->} \quad a_2 = 830$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{170} (0,83)z \, dz = 0,415z^2 \Big|_0^{170} = 11993,5$$

$$M2 = \int_{170}^{830} \frac{(1000 - z)}{1000} z \, dz = \int_{170}^{830} (z - 0,001z^2) \, dz = 0,5z^2 - 0,00033z^3 \Big|_{170}^{830} = 1142931,58$$

$$M3 = \int_{830}^{1000} (0,17)z \, dz = 0,85z^2 \Big|_{830}^{1000} = 26443,5$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 170 \cdot 0,83 = 141,1$$

$$A2 = (0,83 + 0,17) \cdot (830 - 170) / 2 = 330$$

$$A3 = (1000-830)*0,17 = 28,9$$

Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{11993,5 + 1142931,58 + 26443,5}{141,1 + 330 + 28,9} = 362,74$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 362,74.

3. Error[85] dan Delta Error[0]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu \text{ ErrorKECIL}[85] = (255-85)/255 = 0,67$$

$$- \mu \text{ ErrorBESAR}[85] = (85-0)/255 = 0,33$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu \text{ DeltaErrorKECIL}[0] = (255-0)/255 = 1$$

$$- \mu \text{ DeltaErrorBESAR}[0] = (0-0)/255 = 0$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [85], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [0]) \\ &= \min(0,67;1) \\ &= 0,67 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [85], \mu \text{DeltaErrorBESAR} [0]) \\ &= \min(0,67;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorBESAR} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorBESAR} [85], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [0]) \end{aligned}$$

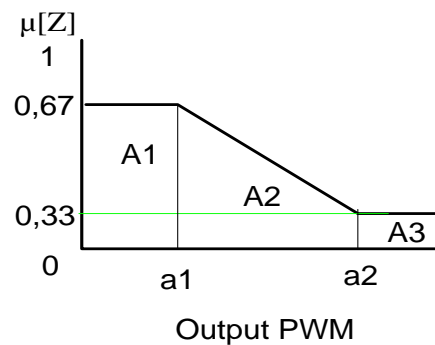
$$= \min(0,33;1)$$

$$= 0,33$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [85], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [0]) \\ &= \min(0,33;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(1000 - a_1)/1000 = 0,67 \quad \text{--->} \quad a_1 = 330$$

$$(1000 - a_2)/1000 = 0,33 \quad \text{--->} \quad a_2 = 670$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{330} (0,67)z \, dz = 0,335 z^2 \Big|_0^{330} = 36481,5$$

$$M2 = \int_{330}^{670} \frac{(1000 - z)}{1000} z \, dz = \int_{330}^{670} (z - 0,001z^2) \, dz = 0,5z^2 - 0,00033 z^3 \Big|_{330}^{670} = 82607,42$$

$$M3 = \int_{670}^{1000} (0,33)z \, dz = 0,165 z^2 \Big|_{670}^{1000} = 90931,5$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 330 \cdot 0,67 = 221,1$$

$$A2 = (0,67 + 0,33) \cdot (670 - 330) / 2 = 170$$

$$A3 = (1000-670)*0,33 = 108,9$$

Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{36481,5 + 82607,42 + 90931,5}{221,1 + 170 + 108,9} = 420,04$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 420,04.

4. Error[124] dan Delta Error[0]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu \text{ ErrorKECIL}[124] = (255-124)/255 = 0,51$$

$$- \mu \text{ ErrorBESAR}[124] = (124-0)/255 = 0,49$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu \text{ DeltaErrorKECIL}[0] = (255-0)/255 = 1$$

$$- \mu \text{ DeltaErrorBESAR}[0] = (0-0)/255 = 0$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [124], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [0]) \\ &= \min(0,51;1) \\ &= 0,51 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [124], \mu \text{DeltaErrorBESAR} [0]) \\ &= \min(0,51;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorBESAR} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorBESAR} [124], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [0]) \end{aligned}$$

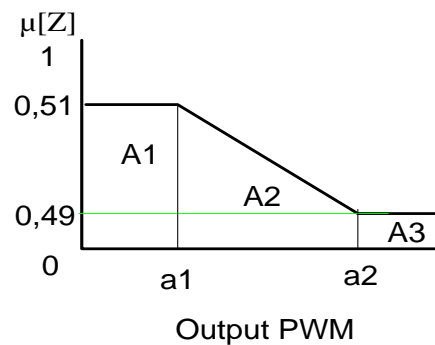
$$= \min(0,49;1)$$

$$= 0,49$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [124], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [0]) \\ &= \min(0,49;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(1000 - a_1)/1000 = 0,51 \quad \text{--->} \quad a_1 = 490$$

$$(1000 - a_2)/1000 = 0,49 \quad \text{--->} \quad a_2 = 510$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{490} (0,51)z \, dz = 0,255 z^2 \Big|_0^{490} = 61225,5$$

$$M2 = \int_{490}^{510} \frac{(1000 - z)}{1000} z \, dz = \int_{490}^{510} (z - 0,001 z^2) \, dz = 0,5 z^2 - 0,00033 z^3 \Big|_{490}^{510} = 5049,34$$

$$M3 = \int_{510}^{1000} (0,49)z \, dz = 0,245 z^2 \Big|_{510}^{1000} = 181275,5$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 490 * 0,51 = 249,9$$

$$A2 = (0,51 + 0,49) * (510 - 490) / 2 = 10$$

$$A3 = (1000-510)*0,49 = 240,1$$

Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{61225,5 + 5049,34 + 181275,5}{249,9 + 10 + 240,1} = 495,10$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 495,10.

5. Error[129] dan Delta Error[0]

1. Menentukan Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu \text{ ErrorKECIL}[129] = (255-129)/255 = 0,49$$

$$- \mu \text{ ErrorBESAR}[129] = (129-0)/255 = 0,51$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu \text{ DeltaErrorKECIL}[0] = (255-0)/255 = 1$$

$$- \mu \text{ DeltaErrorBESAR}[0] = (0-0)/255 = 0$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [129], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [0]) \\ &= \min(0,49;1) \\ &= 0,49 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [129], \mu \text{DeltaErrorBESAR} [0]) \\ &= \min(0,49;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorBESAR} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorBESAR} [129], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [0]) \end{aligned}$$

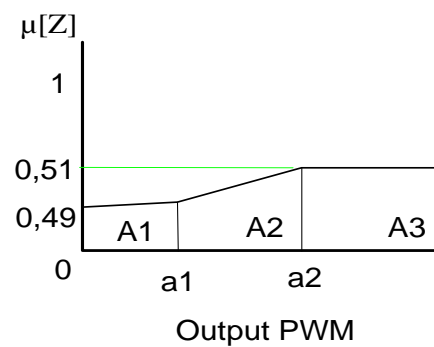
$$= \min(0,51;1)$$

$$= 0,51$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [129], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [0]) \\ &= \min(0,51;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(a_1 - 0)/1000 = 0,49 \quad \text{--->} \quad a_1 = 490$$

$$(a_2 - 0)/1000 = 0,51 \quad \text{--->} \quad a_2 = 510$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{490} (0,49)z \, dz = 0,245 z^2 \Big|_0^{490} = 58824,5$$

$$M2 = \int_{490}^{510} \frac{(z-0)}{1000} z \, dz = \int_{490}^{510} (0,001 z^2) \, dz = 0,00033 z^3 \Big|_{490}^{510} = 4950,66$$

$$M3 = \int_{510}^{1000} (0,51)z \, dz = 0,255 z^2 \Big|_{510}^{1000} = 188674,5$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 490 \cdot 0,49 = 240,1$$

$$A2 = (0,49+0,51) \cdot (510-490)/2 = 10$$

$$A3 = (1000-510)*0,51 = 249,9$$

Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{58824,5 + 4950,66 + 188674,5}{240,1 + 10 + 249,9} = 504,90$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 504,90.

6. Error[148] dan Delta Error[0]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu \text{ErrorKECIL}[148] = (255-148)/255 = 0,42$$

$$- \mu \text{ErrorBESAR}[148] = (148-0)/255 = 0,58$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu \text{DeltaErrorKECIL}[0] = (255-0)/255 = 1$$

$$- \mu \text{DeltaErrorBESAR}[0] = (0-0)/255 = 0$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorKECIL} \cap \mu\text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu\text{ErrorKECIL} [148], \mu\text{DeltaErrorKECIL} [0]) \\ &= \min(0,42;1) \\ &= 0,42 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorKECIL} \cap \mu\text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu\text{ErrorKECIL} [148], \mu\text{DeltaErrorBESAR} [0]) \\ &= \min(0,42;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorBESAR} \cap \mu\text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu\text{ErrorBESAR} [148], \mu\text{DeltaErrorKECIL} [0]) \end{aligned}$$

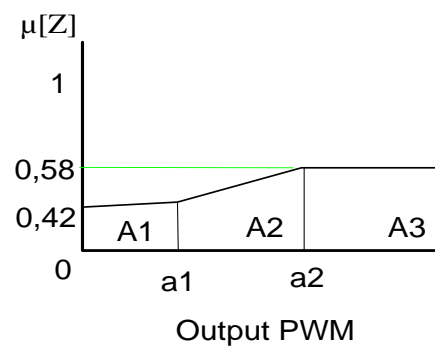
$$= \min(0,58;1)$$

$$= 0,58$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [148], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [0]) \\ &= \min(0,58;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(a_1 - 0)/1000 = 0,42 \quad \text{--->} \quad a_1 = 420$$

$$(a_2 - 0)/1000 = 0,58 \quad \text{--->} \quad a_2 = 580$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{420} (0,42)z \, dz = 0,21z^2 \Big|_0^{420} = 37044$$

$$M2 = \int_{420}^{580} \frac{(z-0)}{1000} z \, dz = \int_{420}^{580} (0,001z^2) \, dz = 0,00033 z^3 \Big|_{420}^{580} = 39937,92$$

$$M3 = \int_{580}^{1000} (0,58)z \, dz = 0,29z^2 \Big|_{580}^{1000} = 192444$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 420 \cdot 0,42 = 176,4$$

$$A2 = (0,42+0,58) \cdot (580-420)/2 = 80$$

$$A3 = (1000-580)*0,58 = 243,6$$

Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{37044 + 39937,92 + 192444}{176,4 + 80 + 243,6} = 538,85$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 538,85.

7. Error[158] dan Delta Error[0]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu \text{ ErrorKECIL}[158] = (255-158)/255 = 0,38$$

$$- \mu \text{ ErrorBESAR}[158] = (158-0)/255 = 0,62$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu \text{ DeltaErrorKECIL}[0] = (255-0)/255 = 1$$

$$- \mu \text{ DeltaErrorBESAR}[0] = (0-0)/255 = 0$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [158], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [0]) \\ &= \min(0,38;1) \\ &= 0,38 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [158], \mu \text{DeltaErrorBESAR} [0]) \\ &= \min(0,38;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorBESAR} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorBESAR} [158], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [0]) \end{aligned}$$

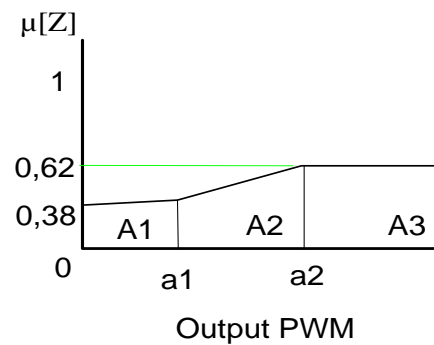
$$= \min(0,62;1)$$

$$= 0,62$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [158], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [0]) \\ &= \min(0,62;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(a_1 - 0)/1000 = 0,38 \quad \text{--->} \quad a_1 = 380$$

$$(a_2 - 0)/1000 = 0,62 \quad \text{--->} \quad a_2 = 620$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{380} (0,38)z \, dz = 0,19z^2 \Big|_0^{380} = 27436$$

$$M2 = \int_{380}^{620} \frac{(z-0)}{1000} z \, dz = \int_{380}^{620} (0,001z^2) \, dz = 0,00033z^3 \Big|_{380}^{620} = 60540,48$$

$$M3 = \int_{620}^{1000} (0,62)z \, dz = 0,31z^2 \Big|_{620}^{1000} = 190836$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 380 \cdot 0,38 = 144,4$$

$$A2 = (0,38+0,62) \cdot (620-380)/2 = 120$$

$$A3 = (1000-620)*0,62 = 235,6$$

Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{27436 + 60540,48 + 190836}{144,4 + 120 + 235,6} = 557,62$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 557,62

8. Error[166] dan Delta Error[0]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu \text{ErrorKECIL}[166] = (255-166)/255 = 0,35$$

$$- \mu \text{ErrorBESAR}[166] = (166-0)/255 = 0,65$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu \text{DeltaErrorKECIL}[0] = (255-0)/255 = 1$$

$$- \mu \text{DeltaErrorBESAR}[0] = (0-0)/255 = 0$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorKECIL} \cap \mu\text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu\text{ErrorKECIL} [166], \mu\text{DeltaErrorKECIL} [0]) \\ &= \min(0,35;1) \\ &= 0,35 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorKECIL} \cap \mu\text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu\text{ErrorKECIL} [166], \mu\text{DeltaErrorBESAR} [0]) \\ &= \min(0,35;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu\text{ErrorBESAR} \cap \mu\text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu\text{ErrorBESAR} [166], \mu\text{DeltaErrorKECIL} [0]) \end{aligned}$$

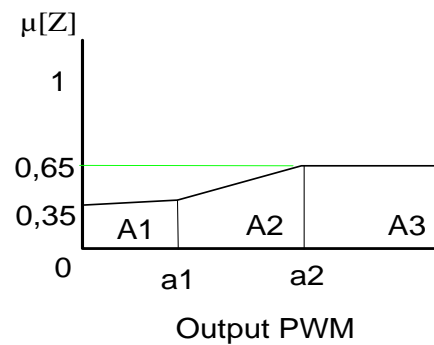
$$= \min(0,65;1)$$

$$= 0,65$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [166], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [0]) \\ &= \min(0,65;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(a_1 - 0)/1000 = 0,35 \quad \text{--->} \quad a_1 = 350$$

$$(a_2 - 0)/1000 = 0,65 \quad \text{--->} \quad a_2 = 650$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{350} (0,35)z \, dz = 0,175 z^2 \Big|_0^{350} = 21437,5$$

$$M2 = \int_{350}^{650} \frac{(z-0)}{1000} z \, dz = \int_{350}^{650} (0,001 z^2) \, dz = 0,00033 z^3 \Big|_{350}^{650} = 76477,5$$

$$M3 = \int_{650}^{1000} (0,65)z \, dz = 0,375 z^2 \Big|_{650}^{1000} = 187687,5$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 350 \cdot 0,35 = 122,5$$

$$A2 = (0,35+0,65) \cdot (650-350)/2 = 150$$

$$A3 = (1000-650)*0,65 = 2227,5$$

Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{21437,5 + 76477,5 + 187687,5}{122,5 + 150 + 2227,5} = 571,21$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 571,21.

9. Error[171] dan Delta Error[0]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu \text{ ErrorKECIL}[171] = (255-171)/255 = 0,33$$

$$- \mu \text{ ErrorBESAR}[171] = (171-0)/255 = 0,67$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu \text{ DeltaErrorKECIL}[0] = (255-0)/255 = 1$$

$$- \mu \text{ DeltaErrorBESAR}[0] = (0-0)/255 = 0$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [171], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [0]) \\ &= \min(0,33;1) \\ &= 0,33 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [171], \mu \text{DeltaErrorBESAR} [0]) \\ &= \min(0,33;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorBESAR} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorBESAR} [171], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [0]) \end{aligned}$$

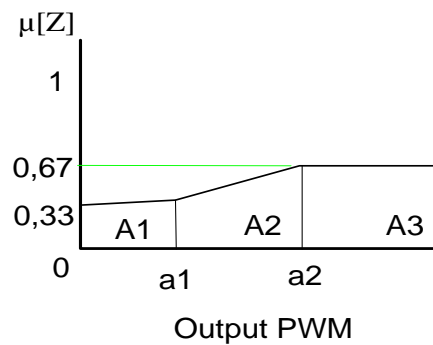
$$= \min(0,67;1)$$

$$= 0,67$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [171], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [0]) \\ &= \min(0,67;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(a_1 - 0)/1000 = 0,33 \quad \text{--->} \quad a_1 = 330$$

$$(a_2 - 0)/1000 = 0,67 \quad \text{--->} \quad a_2 = 670$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{330} (0,33)z \, dz = 0,165 z^2 \Big|_0^{330} = 17968,5$$

$$M2 = \int_{330}^{670} \frac{(z-0)}{1000} z \, dz = \int_{330}^{670} (0,001z^2) \, dz = 0,00033 z^3 \Big|_{330}^{670} = 87392,58$$

$$M3 = \int_{670}^{1000} (0,67)z \, dz = 0,335 z^2 \Big|_{670}^{1000} = 184618,5$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 330 \cdot 0,33 = 108,9$$

$$A2 = (0,33+0,67) \cdot (670-330)/2 = 170$$

$$A3 = (1000-670)*0,67 = 221,1$$

Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{17968,5 + 87392,58 + 184618,5}{108,9 + 170 + 221,1} = 579,96$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 579,96.

10. Error[176] dan Delta Error[0]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu \text{ ErrorKECIL}[176] = (255-176)/255 = 0,31$$

$$- \mu \text{ ErrorBESAR}[176] = (176-0)/255 = 0,69$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu \text{ DeltaErrorKECIL}[0] = (255-0)/255 = 1$$

$$- \mu \text{ DeltaErrorBESAR}[0] = (0-0)/255 = 0$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [176], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [0]) \\ &= \min(0,31;1) \\ &= 0,31 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [176], \mu \text{DeltaErrorBESAR} [0]) \\ &= \min(0,31;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorBESAR} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorBESAR} [176], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [0]) \end{aligned}$$

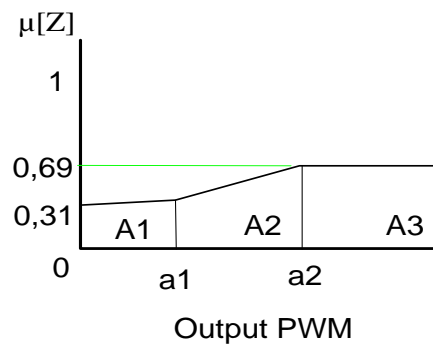
$$= \min(0,69;1)$$

$$= 0,69$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [176], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [0]) \\ &= \min(0,69;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(a_1 - 0)/1000 = 0,31 \quad \text{--->} \quad a_1 = 310$$

$$(a_2 - 0)/1000 = 0,69 \quad \text{--->} \quad a_2 = 690$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{310} (0,31)z \, dz = 0,155 z^2 \Big|_0^{310} = 14895,5$$

$$M2 = \int_{310}^{690} \frac{(z-0)}{1000} z \, dz = \int_{310}^{690} (0,001z^2) \, dz = 0,00033 z^3 \Big|_{310}^{690} = 98576,94$$

$$M3 = \int_{690}^{1000} (0,69)z \, dz = 0,345 z^2 \Big|_{690}^{1000} = 180745,5$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 310 \cdot 0,31 = 96,1$$

$$A2 = (0,31+0,69) \cdot (690-310)/2 = 190$$

$$A3 = (1000-690)*0,69 = 213,9$$

Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{14895,5 + 98576,94 + 180745,5}{96,1 + 190 + 213,9} = 588,44$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 588,44.

11. Error[190] dan Delta Error[0]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu \text{ ErrorKECIL}[190] = (255-190)/255 = 0,25$$

$$- \mu \text{ ErrorBESAR}[190] = (190-0)/255 = 0,75$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu \text{ DeltaErrorKECIL}[0] = (255-0)/255 = 1$$

$$- \mu \text{ DeltaErrorBESAR}[0] = (0-0)/255 = 0$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [190], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [0]) \\ &= \min(0,25;1) \\ &= 0,25 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [190], \mu \text{DeltaErrorBESAR} [0]) \\ &= \min(0,25;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorBESAR} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorBESAR} [190], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [0]) \end{aligned}$$

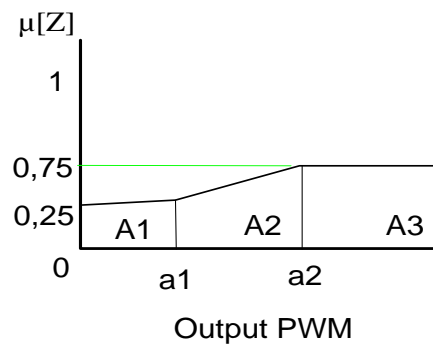
$$= \min(0,75;1)$$

$$= 0,75$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [190], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [0]) \\ &= \min(0,75;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(a_1 - 0)/1000 = 0,25 \quad \text{--->} \quad a_1 = 250$$

$$(a_2 - 0)/1000 = 0,75 \quad \text{--->} \quad a_2 = 750$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{250} (0,25)z \, dz = 0,125 z^2 \Big|_0^{250} = 7812,5$$

$$M2 = \int_{250}^{750} \frac{(z-0)}{1000} z \, dz = \int_{250}^{750} (0,001z^2) \, dz = 0,00033 z^3 \Big|_{250}^{750} = 134062,5$$

$$M3 = \int_{750}^{1000} (0,75)z \, dz = 0,375 z^2 \Big|_{750}^{1000} = 164062,5$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 250 \cdot 0,25 = 62,5$$

$$A2 = (0,25+0,75) \cdot (750-250)/2 = 250$$

$$A3 = (1000-750)*0,75 = 187,5$$

Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{7812,5 + 134062,5 + 164062,5}{62,5 + 250 + 187,5} = 611,88$$

Output PWM yang dihasilkan sebesar 611,88.

12. Error[201] dan Delta Error[0]

1. Himpunan *Fuzzy*

a. Variabel Error

$$- \mu \text{ ErrorKECIL}[201] = (255-201)/255 = 0,21$$

$$- \mu \text{ ErrorBESAR}[201] = (201-0)/255 = 0,79$$

b. Variabel Delta Error

$$- \mu \text{ DeltaErrorKECIL}[0] = (255-0)/255 = 1$$

$$- \mu \text{ DeltaErrorBESAR}[0] = (0-0)/255 = 0$$

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

[R1] IF Error KECIL And Delta Error KECIL THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [201], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [0]) \\ &= \min(0,21;1) \\ &= 0,21 \end{aligned}$$

[R2] IF Error KECIL And Delta Error BESAR THEN Output PWM PELAN.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorKECIL} \cap \mu \text{DeltaErrorBESAR} \\ &= \min(\mu \text{ErrorKECIL} [201], \mu \text{DeltaErrorBESAR} [0]) \\ &= \min(0,21;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

[R3] IF Error BESAR And Delta Error KECIL THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu \text{ErrorBESAR} \cap \mu \text{DeltaErrorKECIL} \\ &= \min(\mu \text{ErrorBESAR} [201], \mu \text{DeltaErrorKECIL} [0]) \end{aligned}$$

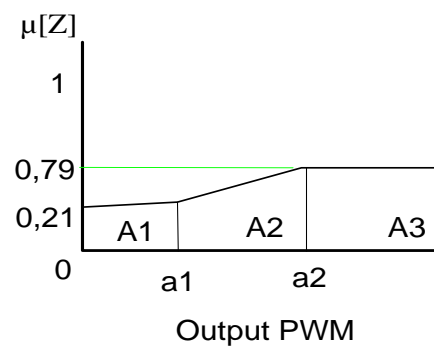
$$= \min(0,79;1)$$

$$= 0,79$$

[R4] IF Error BESAR And Delta Error BESAR THEN Output PWM CEPAT.

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat1} &= \mu_{\text{ErrorBESAR}} \cap \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} \\ &= \min(\mu_{\text{ErrorBESAR}} [201], \mu_{\text{DeltaErrorBESAR}} [0]) \\ &= \min(0,79;0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

3. Komposisi antar aturan



Gambar daerah hasil komposisi.

$$(a_1 - 0)/1000 = 0,21 \quad \text{--->} \quad a_1 = 210$$

$$(a_2 - 0)/1000 = 0,79 \quad \text{--->} \quad a_2 = 790$$

4. Penegasan (*defuzzy*)

$$M1 = \int_0^{210} (0,21)z \, dz = 0,105 z^2 \Big|_0^{210} = 4630,5$$

$$M2 = \int_{210}^{790} \frac{(z-0)}{1000} z \, dz = \int_{210}^{790} (0,001 z^2) \, dz = 0,00033 z^3 \Big|_{210}^{790} = 159646,74$$

$$M3 = \int_{790}^{1000} (0,79)z \, dz = 0,395 z^2 \Big|_{790}^{1000} = 148480,5$$

luas setiap daerah:

$$A1 = 210 \cdot 0,21 = 44,1$$

$$A2 = (0,21+0,79) \cdot (790-210)/2 = 290$$

$$A_3 = (1000-790) \cdot 0,79 = 165,9$$

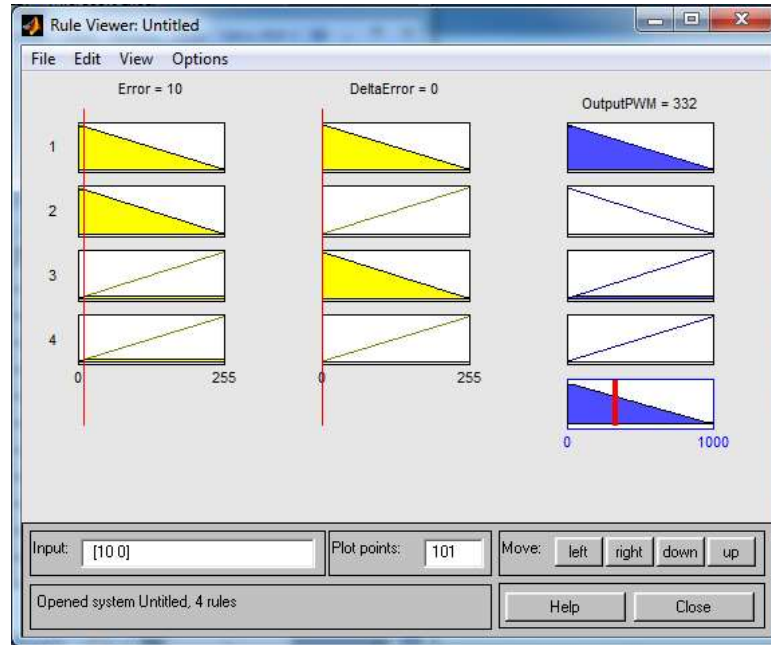
Titik pusat dapat diperoleh dari:

$$z = \frac{4630,5 + 159646,74 + 148480,5}{44,1 + 290 + 165,9} = 625,52$$

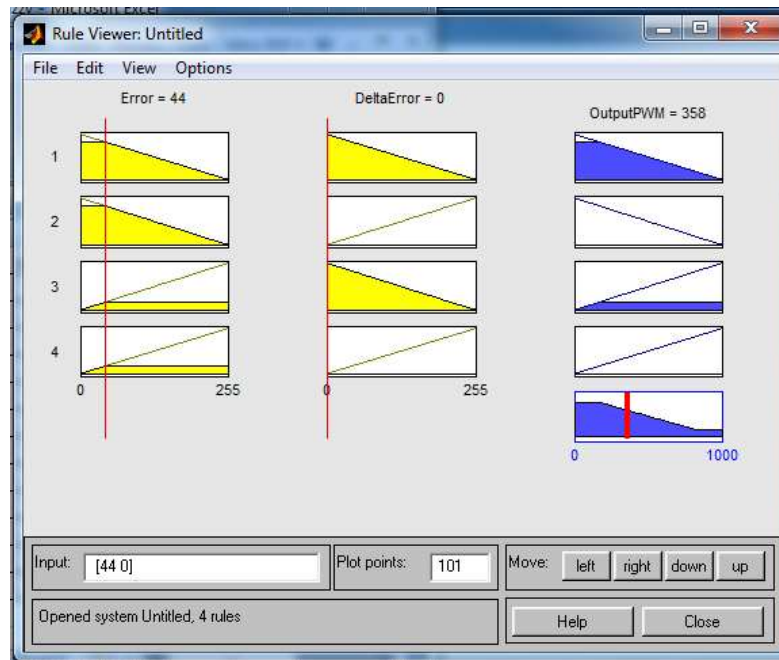
Output PWM yang dihasilkan sebesar 625,52.

Lampiran 6. Hasil Pengujian dengan MATLAB Perangkat secara Keseluruhan

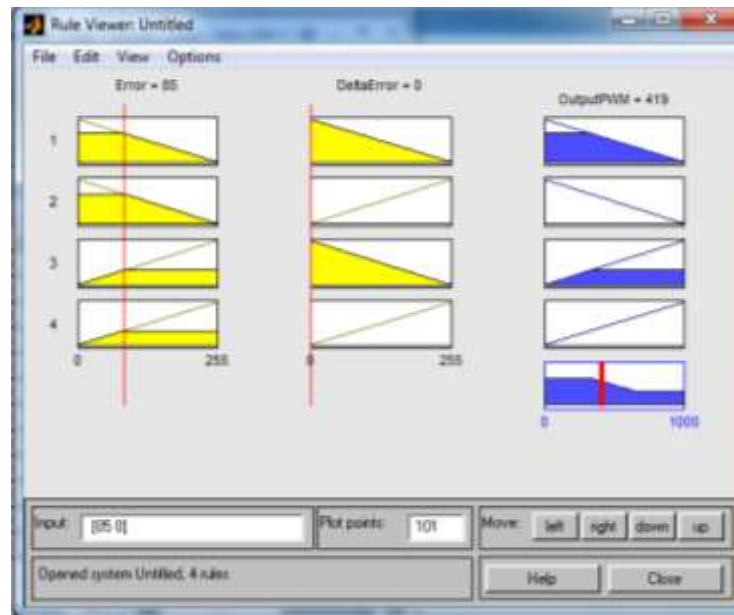
1. Error[10] dan Delta Error[0]

Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[10] dan Delta Error[0]

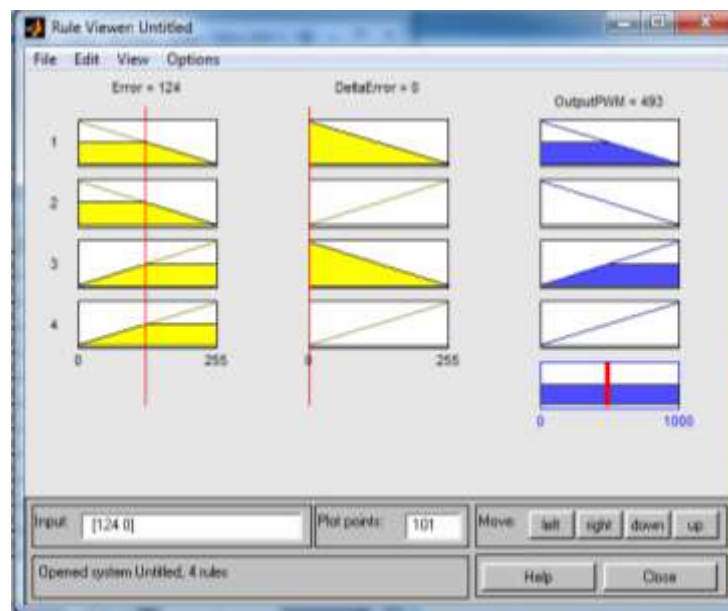
2. Error[44] dan Delta Error[0]

Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[44] dan Delta Error[0]

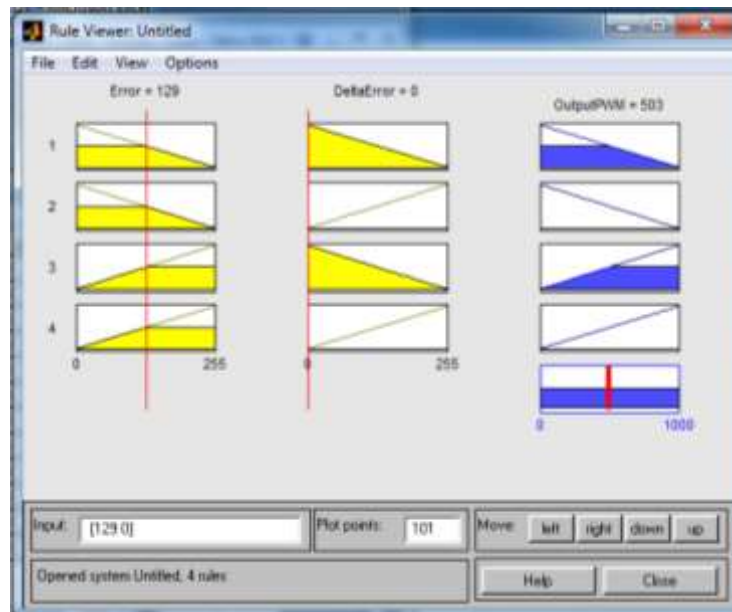
3. Error[85] dan Delta Error[0]

Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[85] dan Delta Error[0]

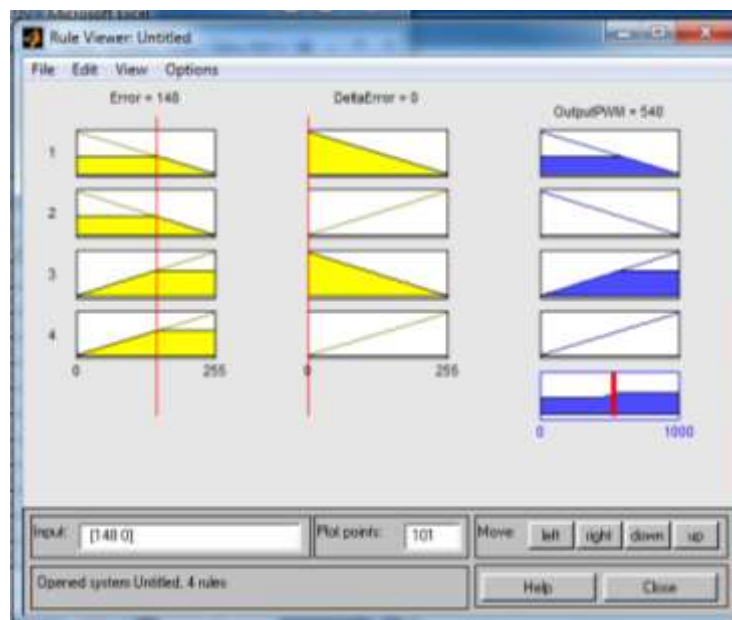
4. Error[124] dan Delta Error[0]

Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[124] dan Delta Error[0]

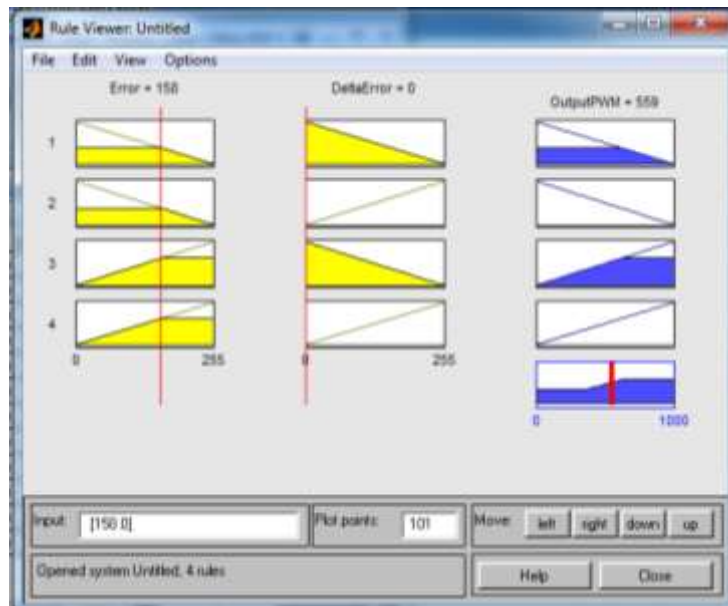
5. Error[129] dan Delta Error[0]

Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[129] dan Delta Error[0]

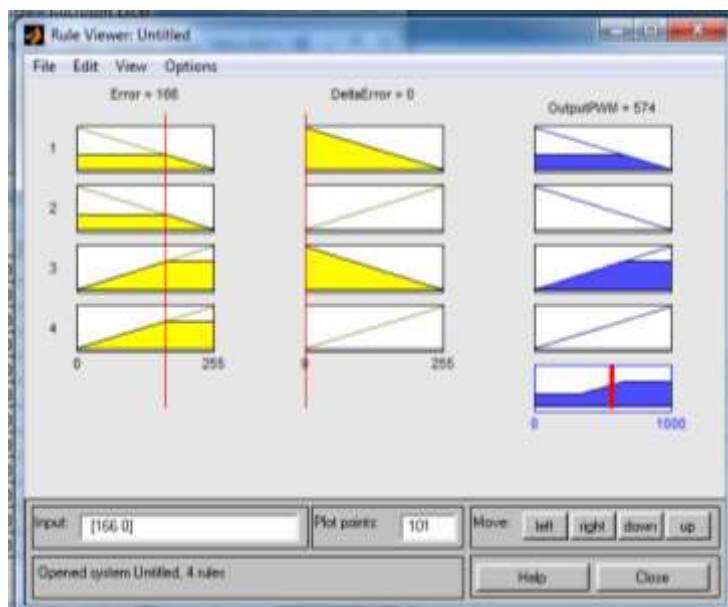
6. Error[148] dan Delta Error[0]

Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[148] dan Delta Error[0]

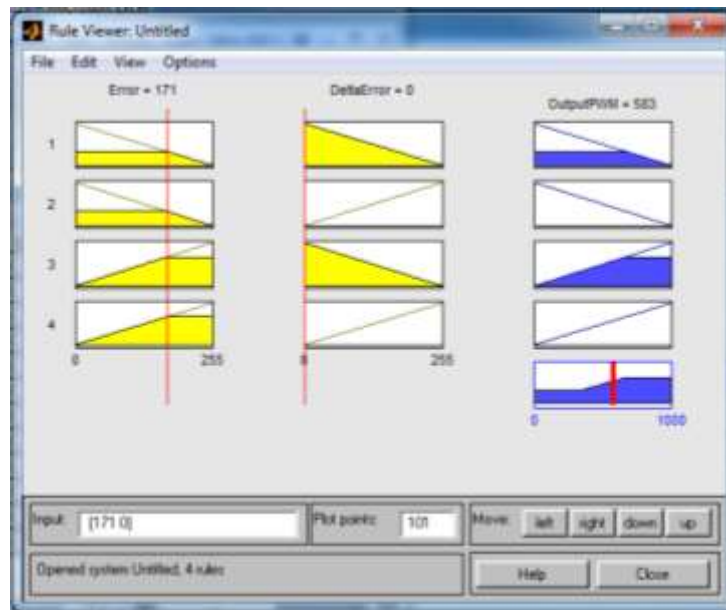
7. Error[158] dan Delta Error[0]

Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[158] dan Delta Error[0]

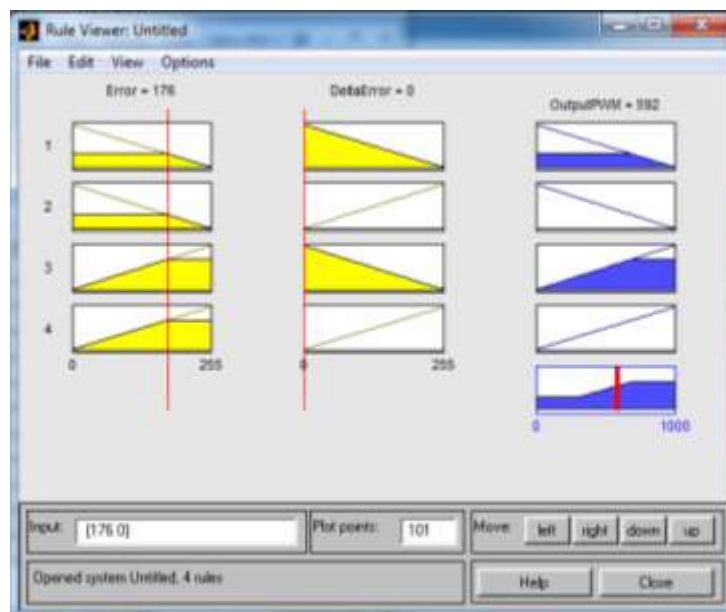
8. Error[166] dan Delta Error[0]

Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[166] dan Delta Error[0]

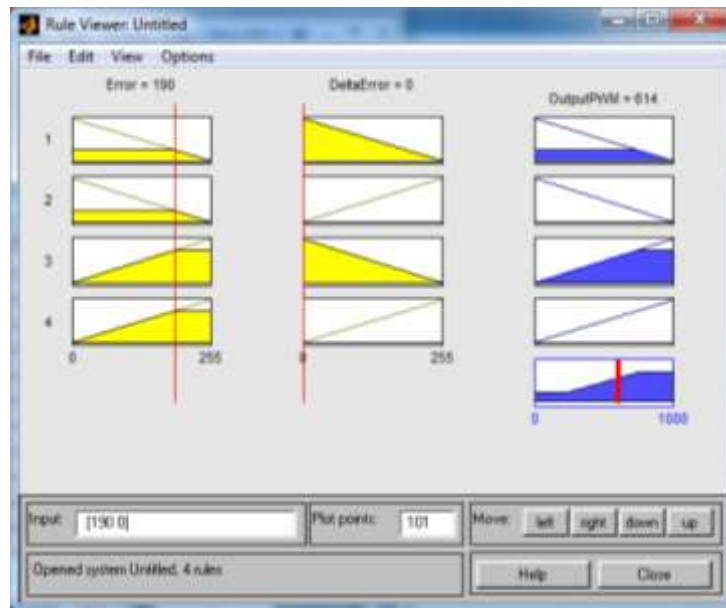
9. Error[171] dan Delta Error[0]

Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[171] dan Delta Error[0]

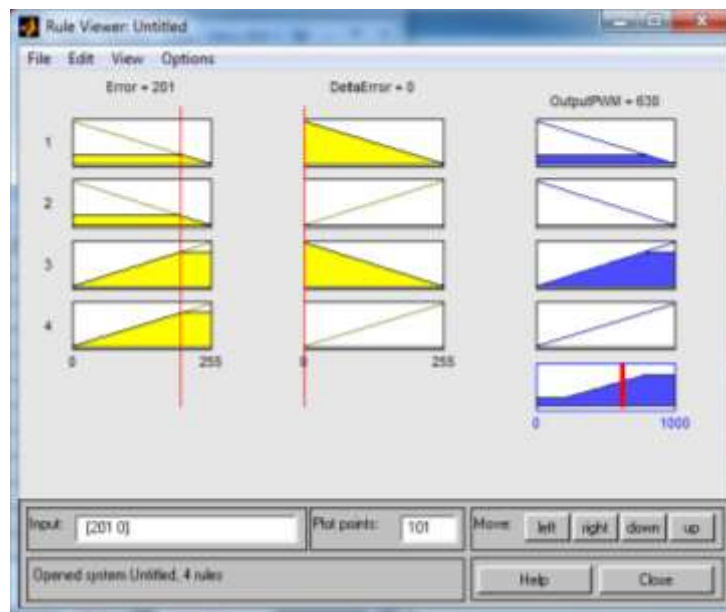
10. Error[176] dan Delta Error[0]

Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[176] dan Delta Error[0]

11. Error[190] dan Delta Error[0]

Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[190] dan Delta Error[0]

12. Error[201] dan Delta Error[0]

Gambar tampilan *Rule Viewer* input Error[201] dan Delta Error[0]

Lampiran 7. Listing Program

```

/*****

```

```

This program was produced by the
CodeWizardAVR V1.24.0 Professional
Automatic Program Generator
© Copyright 1998-2003 HP InfoTech s.r.l.
http://www.hpinfotech.ro
e-mail:office@hpinfotech.ro

```

```

Project :
Version :
Date   : 4/16/2015
Author : F4CG
Company : F4CG
Comments:

```

```

Chip type      : ATmega8535
Program type   : Application
Clock frequency : 11.059200 MHz
Memory model   : Small
External SRAM size : 0
Data Stack size  : 128

```

```

*****/

```

```

#include <mega8535.h>
#include <delay.h>
#include <math.h>
float kecil(float a, float b)
{
if (a>b){return b;}
else if (a<b){return a;}
}
float besar(float a, float b)
{
if (a>b){return a;}
else if (a<b){return b;}
}
float eps,epb,d_eps,d_epb;
float selisih_in_1,selisih_in_2,selisih_pwm;
float pred1,pred2,pred3,pred4;
float pwm;
int error,delta_error,last_error;
float min_in_1,max_in_1;
float min_in_2,max_in_2;

```

```

float min_out,max_out;
float bx,by,bz;
float a1,a2;
float aa1,aa2,aa3;
float
m1,m3,mm1,mm2,mm3,km3,km4,mm2a1,mm2b1,mm2a2,mm2b2,mmc1,mmc2,
mm3a,mm3b;
int tombol;
int xx;
// Alphanumeric LCD Module functions
#asm
    .equ __lcd_port=0x18
#endasm
#include <lcd.h>
#include <stdio.h>
unsigned char buff[33];
eeprom int var_min_in_1,var_max_in_1,var_min_in_2,var_max_in_2;
eeprom int var_min_out,var_max_out;
eeprom int var_error,var_d_error;
eeprom int var_v;
#define ineble PORTD.3
#define var_pwm OCR1B
#define sw_down  PINC.0
#define sw_ok    PINC.3
#define sw_cancel PINC.2
#define sw_up    PINC.1

#define ADC_VREF_TYPE 0x60
// Read the 8 most significant bits
// of the AD conversion result
unsigned char read_adc(unsigned char adc_input)
{
    ADMUX=adc_input|ADC_VREF_TYPE;
    // Start the AD conversion
    ADCSRA|=0x40;
    // Wait for the AD conversion to complete
    while ((ADCSRA & 0x10)==0);
    ADCSRA|=0x10;
    return ADCH;
}

// Declare your global variables here
void stop()    {var_pwm=0;}
void maju()   {ineble=1;}
void mundur() {ineble=0;}
void tampil(unsigned char dat)

```



```

{
  unsigned char data;
  data = dat / 100;data+=0x30;lcd_putchar(data);
  dat%=100;data = dat / 10;data+=0x30;lcd_putchar(data);
  dat%=10;data = dat + 0x30;lcd_putchar(data);
}

void datasensor()
{
  delay_ms(50); lcd_clear();
  lcd_gotoxy(0,0); sprintf(buff,"PWM: %2.2f",pwm); lcd_puts(buff);
  lcd_gotoxy(0,1); sprintf(buff,"E: %d",error); lcd_puts(buff);
  lcd_gotoxy(8,1); sprintf(buff,"d_E: %d",delta_error); lcd_puts(buff);

  error = read_adc(7);
  delta_error = error - last_error;
  last_error = error;
  min_in_1 = 0;
  max_in_1 = 255; //error
  min_in_2 = 0;
  max_in_2 = 255; //delta error
  min_out = 0;
  max_out = 1000; //kecepatan

  selisih_in_1=max_in_1-min_in_1; //error
  selisih_in_2=max_in_2-min_in_2; //delta error
  selisih_pwm=max_out-min_out; //kecepatan

  ///////////////////////////////////////////////////////////////////
  eps=(max_in_1-error)/selisih_in_1; //turun
  epb=(error-min_in_1)/selisih_in_1; //naik
  d_eps=(max_in_2-delta_error)/selisih_in_2; //turun
  d_epb=(delta_error-min_in_2)/selisih_in_2; //naik

  //nilai keanggotaan
  // IF error KECIL And delta_error BESAR THEN Kecepatan Motor PELAN;
  pred1=kecil(eps,d_epb);
  //IF error KECIL And delta_error KECIL THEN Kecepatan Motor PELAN;
  pred2=kecil(eps,d_eps);
  //IF error BESAR And delta_error BESAR THEN Kecepatan Motor CEPAT;
  pred3=kecil(epb,d_epb);
  //IF error BESAR And delta_error KECIL THEN Kecepatan Motor CEPAT;
  pred4=kecil(epb,d_eps);

  bx=besar(pred1,pred2);
  by=besar(pred3,pred4);

```

```

bz=besar(bx,by);

if (bz==by)
{
//Komposisi antar aturan
a1=(bx*selisih_pwm)+(min_out);
a2=(by*selisih_pwm)+(min_out);

//Penegasan (defuzzy)
m1= bx/2;
mm1= (m1)*(a1)*(a1);

km3=(1/selisih_pwm)/3; //naik
km4=(min_out/selisih_pwm)/2;
mm2a1= (km3)*(a2)*(a2)*(a2);
mm2b1= (km4)*(a2)*(a2);
mmc1= mm2a1-mm2b1;
mm2a2= (km3)*(a1)*(a1)*(a1);
mm2b2= (km4)*(a1)*(a1);
mmc2= mm2a2-mm2b2;
mm2= mmc1-mmc2;

m3= by/2;
mm3a= (m3)*(max_out)*(max_out);
mm3b= (m3)*(a2)*(a2);
mm3= (mm3a)-(mm3b);

//luas setiap daerah
aa1= (a1)*(bx);
aa2= (bx+by)*(a2-a1)/2;
aa3= (max_out-a2)*(by);

//Titik pusat
pwm=(mm1+mm2+mm3)/(aa1+aa2+aa3);
maju();var_pwm =pwm;
}

else if (bz==bx)
{
//Komposisi antar aturan
a1=(max_out)-(bx*selisih_pwm);
a2=(max_out)-(by*selisih_pwm);

//Penegasan (defuzzy)
m1= bx/2;
mm1= (m1)*(a1)*(a1);

```

```

km3=(1/selisih_pwm)/3; //turun
km4=(max_out/selisih_pwm)/2;
mm2a1= (km3)*(a2)*(a2)*(a2);
mm2b1= (km4)*(a2)*(a2);
mmc1= mm2b1-mm2a1;
mm2a2= (km3)*(a1)*(a1)*(a1);
mm2b2= (km4)*(a1)*(a1);
mmc2= mm2b2-mm2a2;
mm2= mmc1-mmc2;

m3= by/2;
mm3a= (m3)*(max_out)*(max_out);
mm3b= (m3)*(a2)*(a2);
mm3= (mm3a)-(mm3b);

//luas setiap daerah
aa1= (a1)*(bx);
aa2= (by+bx)*(a2-a1)/2;
aa3= (max_out-a2)*(by);

//Titik pusat
pwm=(mm1+mm2+mm3)/(aa1+aa2+aa3);
maju();var_pwm =pwm;
}
}

void main(void)
{
// Declare your local variables here

// Input/Output Ports initialization
// Port A initialization
// Func0=In Func1=In Func2=In Func3=In Func4=In Func5=In Func6=In
Func7=In
// State0=T State1=T State2=T State3=T State4=T State5=T State6=T State7=T
PORTA=0x00;
DDRA=0x00;
// Port B initialization
// Func0=In Func1=In Func2=In Func3=In Func4=In Func5=In Func6=In
Func7=In
// State0=T State1=T State2=T State3=T State4=T State5=T State6=T State7=T
PORTB=0x08;
DDRB=0x08;
// Port C initialization

```

```
// Func0=In Func1=In Func2=In Func3=In Func4=In Func5=In Func6=In
Func7=In
// State0=P State1=P State2=P State3=P State4=T State5=T State6=T State7=T
PORTC=0x0F;
DDRC=0x00;
// Port D initialization
// Func0=In Func1=In Func2=In Func3=Out Func4=Out Func5=Out Func6=Out
Func7=In
// State0=T State1=T State2=T State3=1 State4=1 State5=1 State6=1 State7=T
PORTD=0x78;
DDRD=0x78;
// Timer/Counter 0 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer 0 Stopped
// Mode: Normal top=FFh
// OC0 output: Disconnected
TCCR0=0x00;
TCNT0=0x00;
OCR0=0x00;
// Timer/Counter 1 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: 11059.200 kHz
// Mode: Fast PWM top=03FFh
// OC1A output: Inverted
// OC1B output: Inverted
// Noise Canceler: Off
// Input Capture on Falling Edge
TCCR1A=0xF3;
TCCR1B=0x09;
TCNT1H=0x00;
TCNT1L=0x00;
OCR1AH=0x00;
OCR1AL=0x00;
OCR1BH=0x00;
OCR1BL=0x00;
// Timer/Counter 2 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer 2 Stopped
// Mode: Normal top=FFh
// OC2 output: Disconnected
ASSR=0x00;
TCCR2=0x00;
TCNT2=0x00;
OCR2=0x00;
// External Interrupt(s) initialization
// INT0: Off
```

```

// INT1: Off
// INT2: Off
MCUCR=0x00;
MCUCSR=0x00;
// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization
TIMSK=0x00;
// Analog Comparator initialization
// Analog Comparator: Off
// Analog Comparator Input Capture by Timer/Counter 1: Off
// Analog Comparator Output: Off
ACSR=0x80;
SFIOR=0x00;
// ADC initialization
// ADC Clock frequency: 172.800 kHz
// ADC Voltage Reference: AREF pin
// ADC High Speed Mode: Off
// ADC Auto Trigger Source: None
// Only the 8 most significant bits of
// the AD conversion result are used
ADMUX=ADC_VREF_TYPE;
ADCSRA=0x86;
SFIOR&=0xEF;
// LCD module initialization
lcd_init(16);
lcd_gotoxy(3,0);lcd_putsf("M. NADHIF");
lcd_gotoxy(3,1);lcd_putsf(" PTE 2011");
delay_ms(500);lcd_clear();
// Global enable interrupts
#asm("sei")
//menu();
//stop();

while (1)
{
    // Place your code here
switch(tombol)
    {
        case 1:data();break;
        case 2:datasensor();break;
    }
};
}

```

Lampiran 8. Surat penelitian di Laboratorium Teknik Elektro UNNES

	KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG FAKULTAS TEKNIK
	Gedung E1Kampus Sekaran Gunungpati Semarang 50229 Telepon/Fax (024) 8508101 – 8508009 Laman : http://www.ft.unnes.ac.id , email: ft_unnes@yahoo.com

Nomor : /UN37.1.5/DT/2015
 Lampiran : -
 Hal : **Permohonan Izin Penelitian**

Yth : Kepala Laboratorium TE
 Fakultas Teknik UNNES

Dengan hormat,
 Dengan ini kami mohonkan ijin penelitian di Jurusan Teknik Elektro, dalam rangka Penyusunan Skripsi mahasiswa kami :

N a m a : Mohamad Nadhif
 N I M : 5301411030
 Program Studi : SI PTE
 Jurusan : Teknik Elektro
 Judul Skripsi : Aplikasi Fuzzy Logic Untuk Pengendali Motor DC Berbasis Mikrokontroler ATMEGA8535 Dengan Sensor Photo Dioda.

Waktu Penelitian : Mulai tanggal 22 Juni 2015 s/d selesai

Atas bantuannya kami ucapkan terima kasih

Semarang, 16 Juni 2015
 A.n. Dekan
 Pembantu Dekan Bidang Akademik



Drs. Djoko Adi Widodo, M.T
 NIP. 195909271986011001

Tembusan
 1. Rektor Universitas Negeri Semarang
 2. Ketua Jurusan TE

FM-05-AKD-24

Lampiran 9. Lembar Evaluasi

Lembar Evaluasi

Judul Penelitian: Aplikasi Fuzzy Logic Untuk Pengendali Motor DC Berbasis Mikrokontroler
Atmega8535 Dengan Sensor Photodiode

Peneliti : Mohamad Nadhif (5301411030)

Evaluator : IMAM PUJAJA

Tanggal : 10 Agustus 2015

A. Petunjuk

1. Lembar evaluasi ini dimaksudkan untuk mengetahui pendapat bapak/ibu sebagai ahli kontrol dan praktek kontrol logika fuzzy.
2. Pendapat, kritik, saran penilaian dan komentar bapak/ibu akan sangat bermanfaat untuk memperbaiki dan meningkatkan kualitas hasil penelitian ini. Sehubungan hal tersebut, mohon bapak/ibu memberikan pendapat pada setiap pertanyaan yang tersedia.
3. Komentar/saran bapak/ibu mohon ditulis pada lembar yang telah disediakan.

B. Aspek Penilaian

1. Apakah logika *fuzzy* dapat diaplikasikan pada mikrokontroler ATMega 8535?

Ya bisa, dan berfungsi dengan baik.

.....

.....

.....

.....

.....

FORNEXT
TECHNOLOGY

2. Apakah output yang dihasilkan sesuai dengan teori yang disajikan?

Sangat mendekati nilai teori.

3. Apakah output yang dihasilkan dapat digunakan sebagai sistem kontrol pada motor DC?

Ya, aplikasi ini akan memudahkan dan menghemat proses dalam kontrol motor DC.

4. Apakah logika *fuzzy* tersebut dapat digunakan sebagai sistem kontrol pada robot pengikut garis (line follower robot)?

Ya,

FORNEX
TECHNOLOGY

C. Komentar/saran

Pembuatan aplikasi terdedikasi untuk manajemen fungsi fuzzy ini.

D. Kesimpulan

Analisis Logika Fuzzy terbukti menghemat proses, pada level dan skala lebih besar atau menghemat sumber daya secara signifikan.

FORNEXT
technical

Lampiran 10. Surat Keterangan hasil uji kelayakan alat di Fornext Semarang



Nomor : 0947/FR.R/T27/VIII/2015 Semarang, 10 Agustus 2015

Kepada Yth :
 Dekan Fakultas Teknik
 Universitas Negeri Semarang
 Di Tempat

Perihal : Surat Uji Kelayakan Alat

Dengan Hormat,
 Berdasarkan Permohonan Saudara Mohamad Nadhif, Mahasiswa Fakultas Teknik Elektro Angkatan 2011 Universitas Negeri Semarang terkait dengan Uji Kelayakan Alat. Sedangkan program yang diajukan adalah sebagai berikut :

No	Nama Program	Keterangan
I	Aplikasi Fuzzy Logic Pada Motor DC	Sudah Sesuai dengan Tujuan Pembuatan Program

Setelah diadakan pemeriksaan dan pengujian kemampuan program, maka kami menyatakan bahwa program tersebut di atas sudah sesuai dengan tujuan yang ditetapkan.

Atas Perhatian dan kerjasamanya, kami ucapkan terima kasih.



Fornext Robotics
 Imam Ridwan
 (Ketua Utama)

Fornext Robotics
 Jln. Jaruk IV no.12 Semarang, Indonesia. 50249.
 Phone. 024 91233442 Mobila. 0812 2699 2648
 Email. yukkikinrobot@gmail.com
 Website. www.yukkikinrobot.com

Lampiran 11. Dokumentasi

