

KENDALI KECEPATAN MOTOR DC BERDASARKAN PERUBAHAN JARAK MENGUNAKAN PENGENDALI LOGIKA FUZI BERBASIS MIKROKONTROLER AT89C51

Andry Setyo A¹, Bambang Sutopo²

¹ Penulis, Mahasiswa S-1 Teknik Elektro – UGM, Yogyakarta

² Dosen Pembimbing I, Staff Pengajar pada Jurusan Teknik Elektro – UGM, Yogyakarta

ABSTARCT

Recently, Electric Vehicle (EV) has many technologies called smart system. One of them is automatic breaking system. Breaking system for dc motor refers to a speed-reduction system from full speed running until zero speed running. The main reference used in speed reduction is distance between vehicle and the obstacle. Here, a distance-meter using ultrasonic wave is needed. The common method to handle a dc motor speed is Pulse-Width Modulation (PWM) because of their immunity from noise. Generating a PWM signal using microcontroller has several advantages, such as simple programming technic and the electrical network become modestly.

The aim of this thesis is designing a speed reduction system for dc motor using AT89C51 Microcontroller-based Fuzzy Logic Controller (FLC). By using FLC, the inputs (distance and delta) will be proceed to find duty cycle value for the PWM signal. This value is used as reference for PWM generator. With this method, the speed of dc motor can be reduced gradually depend on the distance between vehicle and obstacle. This system is designed to a relatively small dimension, therefore a minimum system of microcontroller only rely on single chip mode.

Observation shows that the design of speed reduction system works well. When it finds no obstacle, the vehicle runs in full speed. But when it finds obstacle in its path, the speed is reduced gradually until it stops in a close distance to the obstacle.

ABSTRAKSI

Baru-baru ini, kendaraan listrik memiliki berbagai teknologi yang sering dikenal dengan sistem cerdas. Salah satu di antaranya adalah sistem pengereman otomatis. Sistem pengereman motor dc mengacu pada sistem penurunan kecepatan motor dari kecepatan penuh sampai dengan berhenti. Acuan utama yang digunakan dalam penurunan kecepatan adalah jarak antara kendaraan dengan objek penghalang. Di sini, piranti pengukur jarak menggunakan sinyal ultrasonik dibutuhkan. Metode yang umum digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor dc adalah Pulse-Width Modulation (PWM) karena ketahanannya terhadap gangguan/derau. Pembangkitan sinyal PWM dengan mikrokontroler memiliki beberapa keuntungan, seperti teknik pemrograman yang sederhana dan rangkaian listrik menjadi sederhana.

Tujuan tugas akhir ini adalah merancang sistem penurunan kecepatan untuk motor dc menggunakan pengendali logika fuzy berbasis mikrokontroler AT89C51. Dengan menggunakan FLC, masukan (jarak dan delta) akan diproses guna mendapatkan nilai *duty cycle* sinyal PWM. Nilai ini digunakan sebagai acuan pembangkit PWM. Dengan metode ini, kecepatan motor dc dapat dikurangi secara bertahap tergantung dari jarak kendaraan dengan penghalang. Sistem ini dirancang dengan ukuran relatif kecil, oleh karena itu sistem minimal mikrokontroler hanya mengandalkan ragam chip tunggal.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa desain sistem penurunan kecepatan bekerja dengan baik. Ketika kendaraan tidak menemukan adanya penghalang, motor berjalan dengan kecepatan penuh. Namun ketika terdapat penghalang, kecepatan akan diturunkan secara bertahap sampai kendaraan berhenti pada jarak dekat dengan penghalang.

1. Pendahuluan

Reduksi kecepatan dalam konsep pengereman dilakukan berdasarkan jarak kendaraan dengan objek penghalang. Jenis motor yang digunakan sebagai penggerak dalam kendaraan listrik adalah motor dc yang relatif mudah untuk dikendalikan. Salah satu cara pengendalian kecepatan motor dc yang sering digunakan adalah PWM. Pengendalian dilakukan untuk mengatur tegangan terminal yang terterap

ke motor. Hubungan antara kecepatan motor dengan tegangan terminal adalah berbanding lurus, sehingga semakin kecil tegangan maka kecepatan motor akan menurun. Keuntungan pengendalian kecepatan motor dc dengan PWM adalah praktis dan ekonomis dalam penerapannya. Hal ini didukung dengan adanya kemajuan teknologi semikonduktor yang memungkinkan penggunaan penyaklaran PWM dengan kecepatan tinggi.

Perkembangan pengendali logika fuzi memungkinkan dilakukannya aksi pengendalian tanpa perlu adanya model matematika. Sehingga hanya dengan meneliti karakter motor dc, maka pengendalian kecepatan dapat dilakukan dengan baik. Sistem fuzi dapat digunakan untuk menghubungkan masukan jarak dan delta jarak dengan *duty cycle* sinyal PWM yang diperlukan untuk mengendalikan kecepatan motor dc. Penurunan nilai *duty cycle* mampu menurunkan kecepatan motor dc dengan halus. Di samping itu pembangkitan sinyal PWM secara digital akan memberikan hasil memuaskan karena lebih kebal terhadap derau.

2. Tinjauan Pustaka

Sistem reduksi kecepatan memerlukan adanya piranti untuk mengukur jarak penghalang. Pengukuran jarak dengan menggunakan gelombang ultrasonik mampu memberikan hasil yang sangat presisi. Aspek integrasi dan fleksibilitas yang dimiliki mikrokontroler mengakibatkan implementasi rangkaian pengukur jarak menjadi sangat sederhana (Firmansyah, 2001).

Berdasarkan masukan dari pengukur jarak, diperlukan adanya sistem kendali sebagai pemroses. Pengendali logika fuzi (FLC) merupakan suatu model logika yang merepresentasikan cara berpikir seseorang (Sudjarwadi, 2003). FLC dapat mengatasi keterbatasan model matematika pengendalian, karena dapat diselesaikan jika diketahui hubungan yang pasti antara masukan dan keluaran sistem (Hudallah, 2002). Dengan implementasi sistem fuzi berbasis mikrokontroler maka hasil penelitian karakter motor dc dapat dimanfaatkan dengan mudah. Nilai *duty cycle* yang didapatkan harus diolah sehingga mampu membangkitkan sinyal PWM yang sesuai.

3. Dasar Teori

A. Pengukur Jarak

Pengukuran dengan referensi waktu menggunakan metode pulsa yang mengukur jeda waktu antara pengiriman dan penerimaan sinyal. Persamaan yang digunakan yaitu :

$$S = \frac{V_{suara}}{2} \times t$$

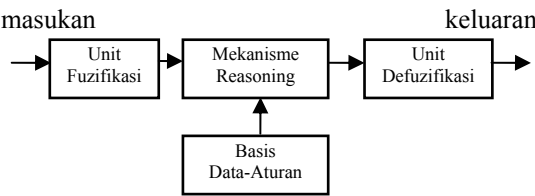
dengan S = jarak terukur (meter)
V_{suara} = kecepatan rambat suara (m/s)
t = selisih waktu (s)

B. Pengendali Logika Fuzi

Pengendali logika fuzi (FLC) menyediakan piranti yang mampu mengubah strategi kontrol linguistik yang diturunkan dari cara berpikir seorang ahli menjadi strategi kontrol otomatis.

Struktur sederhana dari pengendali logika fuzi secara umum terdiri dari :

1. Unit fuzifikasi
2. Basis data-aturan
3. Mekanisme *Reasoning*
4. Unit Defuzifikasi



Gambar 1 : Pengendali Logika Fuzi

C. Pengendalian Kecepatan Motor DC

Kecepatan putar motor dc (N) dapat dirumuskan dengan persamaan di bawah ini :

$$N = \frac{V_{TM} - I_A R_A}{K\Phi}$$

V_{TM} merupakan tegangan terminal, I_A adalah arus jangkar motor, R_A adalah hambatan jangkar motor, K adalah konstanta motor, dan Φ merupakan *fluks* magnet yang terbentuk pada motor.

Dalam kasus pengendalian kecepatan putar motor dc, tegangan terminal motor V_{TM} adalah variabel yang diatur untuk mendapatkan kecepatan putar motor yang dikehendaki. Pengaturan tegangan terminal tersebut dapat dilakukan dengan teknik modulasi lebar pulsa (PWM), sehingga didapatkan rumusan :

$$N = \frac{\frac{Ton}{T} V_{TM} - IaRa}{K\Phi}$$

4. Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Studi literatur mengenai pengukuran jarak menggunakan gelombang ultrasonik, dan pengendalian kecepatan motor dc menggunakan PWM.
2. Penelitian karakter transduser ultrasonik terhadap frekuensi, dan tegangan yang dihasilkan.
3. Penelitian karakter motor dc terhadap variasi *duty cycle* tegangan terterap.
4. Perancangan pengendali logika fuzi dengan *Fuzzy Design and Generator* (FUDGE).
5. Perancangan perangkat keras sistem yang meliputi perangkat pengukur jarak, sistem mikrokontroler, dan penggerak motor dc.

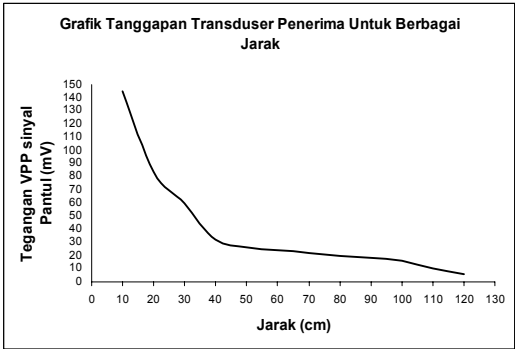
- Perancangan perangkat lunak yang meliputi pengendali perangkat pengukur jarak, sistem fuzi, pembangkit sinyal PWM, dan pengendali penggerak motor.
- Pengujian dan pengambilan data percobaan.
- Analisa hasil dan pembuatan kesimpulan.

5. Hasil Implementasi dan Pembahasan

5.1. Hasil Penelitian Karakter Transduser Ultrasonik

Penelitian terhadap transduser ultrasonik dilakukan untuk mendapatkan kepekaan yang tinggi terhadap frekuensi dan level tegangan yang dipantulkan objek pada berbagai jarak. Hasil yang diperoleh yaitu :

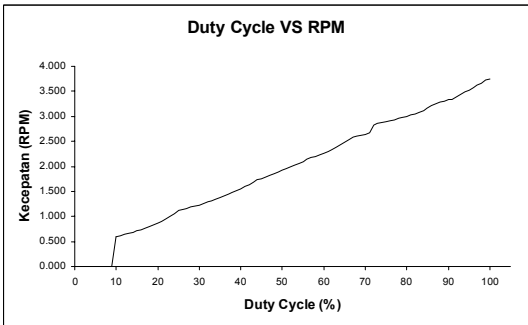
- Transduser ultrasonik memiliki kepekaan yang tinggi pada frekuensi 39,68 KHz.
- Semakin jauh jarak penghalang, maka level tegangan sinyal pantul semakin kecil, dengan grafik sebagai berikut :



Gambar 2 : Tegangan sinyal pantul

5.2. Hasil Penelitian Karakter Motor DC

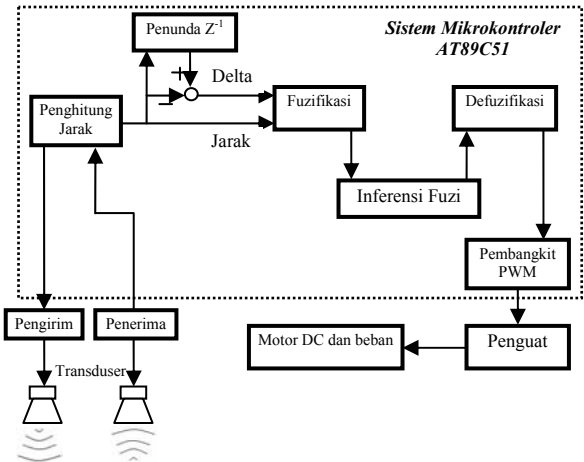
Penelitian terhadap motor dc dilakukan dengan variasi nilai *duty cycle* sinyal PWM pada tegangan catu 20 V. Hasil percobaan menunjukkan bahwa motor berhenti pada nilai *duty cycle* 10%.



Gambar 3 : Duty Cycle Vs Kecepatan

5.3. Perancangan Sistem

Secara lebih detail sistem pengendali kecepatan motor dc dapat dilihat pada gambar 4 berikut :



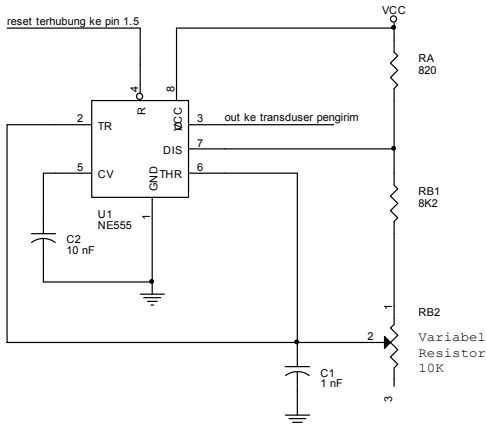
Gambar 4 : Diagram Kotak Sistem Kendali Kecepatan Motor DC

A. Perangkat Keras Sistem Kendali

1. Pengukur Jarak

1.1. Bagian Pengirim

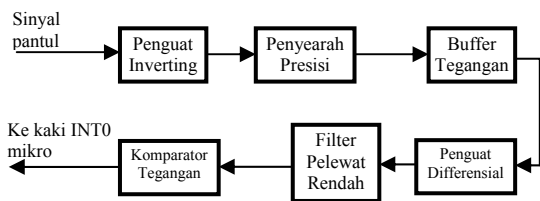
Bagian pengirim bertugas untuk menghasilkan gelombang kotak dengan frekuensi 39,68 KHz. Gelombang kotak ini digunakan untuk menggetarkan transduser pengirim sehingga dihasilkan pancaran gelombang sinus 39,68 KHz untuk pengukuran jarak. Bagian pengirim merupakan multivibrator astable dengan IC 555. Kaki reset pada IC555 terhubung ke p1.5 mikrokontroler yang berguna untuk memberikan perintah pancaran sinyal atau mematikan pancaran.



Gambar 5 : Multivibrator Astable dengan IC 555

1.2. Bagian Penerima

Bagian penerima bertugas untuk mendeteksi adanya sinyal pantul dari objek penghalang. Komponen yang menyusun bagian penerima dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 6 : Diagram Kotak Sistem Penerima

Sinyal sinus yang ditangkap oleh transduser penerima dikuatkan sampai dengan 375 kali secara bertahap. Selain penguatan, dilakukan juga penyearahan sinyal sinus menggunakan penyearah presisi dengan mode penyearahan gelombang penuh. Komponen dc sinyal sinus searah gelombang penuh dicari dengan menggunakan tapis pelewat rendah, dan hasilnya dibandingkan oleh bagian komparator dengan tegangan referensi.

Keluaran komparator berupa dua level tegangan *high* (5V) atau *low* (0V) dengan standar logika TTL. Apabila tidak dideteksi adanya sinyal pantul, maka tegangan referensi lebih besar dari tegangan dc hasil pengolahan sinyal, sehingga keluaran komparator *high*. Sedangkan apabila dideteksi adanya sinyal pantul (jarak penghalang lebih kecil dari 120 cm), maka tegangan dc yang dihasilkan lebih besar dari tegangan referensi, sehingga keluaran komparator menjadi *low*. Transisi menuju kondisi *low* inilah yang dimanfaatkan mikrokontroler untuk membuat interupsi eksternal.

2. Sistem Mikrokontroler AT89C51

Sistem mikrokontroler bekerja dengan ragam operasi keping tunggal sehingga tidak diperlukan memori eksternal. Siklus mesin mikrokontroler diatur menggunakan kristal 12 MHz sehingga kecepatan siklus mesin menjadi $12\text{ MHz}/12 = 1\text{ MHz}$, yang artinya periode detak waktunya 1 mikrodetik.

Mikrokontroler bertugas mengatur operasi perangkat keras lain, meliputi pengukur jarak dan penguat motor. P1.5 terhubung ke kaki reset bagian pengirim untuk mengatur pemancaran sinyal. Kaki INT0 terhubung ke keluaran sistem penerima sehingga informasi diterimanya sinyal pantul diperoleh. P3.6 terhubung ke pin *enable* penguat L293D untuk mengatur aktivasi penguat. P2.6 dan P2.7 terhubung ke masukan 1 dan 2 penguat sebagai masukan *H-bridge* yang menggerakkan motor.

3. Penguat Motor dengan L293D

Penguat motor yang digunakan adalah IC L293D yang praktis dan umum digunakan untuk motor berukuran kecil. Arus maksimal

yang mampu dihasilkan oleh L293D sebesar 600 mA. Penguat ini mampu melakukan fungsi pensaklaran kecepatan tinggi sampai dengan 5 KHz.

Kaki masukan 1 merupakan jalur sinyal PWM sebagai pensaklaran tegangan catu motor 20 V. Masukan 2 merupakan jalur 0 V. Masing-masing jalur menghasilkan tegangan keluaran yang akan diterapkan ke kutub-kutub motor dc dengan berpedoman pada tabel kebenaran L293D sebagai berikut :

Tabel 1 : Kebenaran untuk satu kanal.

Masukan	Enable	Keluaran
H	H	H
L	H	L
H	L	Z
L	L	Z

Z = Impedansi keluaran tinggi

B. Perangkat Lunak Sistem Kendali

Perangkat lunak pada mikrokontroler memiliki tugas sebagai berikut :

1. Mengendalikan perangkat pengukur jarak

Pengendalian meliputi pemancaran sinyal dan pengambilan data pewaktu setelah dideteksi adanya sinyal pantul. Pemancaran dilakukan dengan perintah SETB atau CLR P1.5. Pada waktu pemancaran, mikrokontroler mulai melakukan perhitungan pewaktu 0 dengan mode 16 bit sampai diterima informasi adanya sinyal pantul. Apabila diterima pantulan, maka pewaktu dihentikan dan dicatat isinya kemudian dilakukan perhitungan jarak.

2. Melakukan perhitungan jarak dan selisih jarak (delta)

Perhitungan jarak dan delta jarak diperlukan sebagai masukan pengendali logika fuzi dengan persamaan :

$$\text{Jarak} = \frac{\text{IsiTimer0}}{58}$$

$$\text{Delta} = \text{jarak_lalu} - \text{jarak_sekarang}$$

Nilai 58 merupakan konstanta untuk jarak 1 cm. Nilai ini didapatkan berdasarkan nilai konstanta perambatan suara 344 m/s.

$$V_s = 344\text{ m/s} = 34400\text{ cm/s}$$

$$t = \frac{1\text{ cm}}{34400\text{ cms}^{-1}} = 29,0697\mu\text{s}$$

Dalam dua arah kirim dan pantul maka didapatkan :

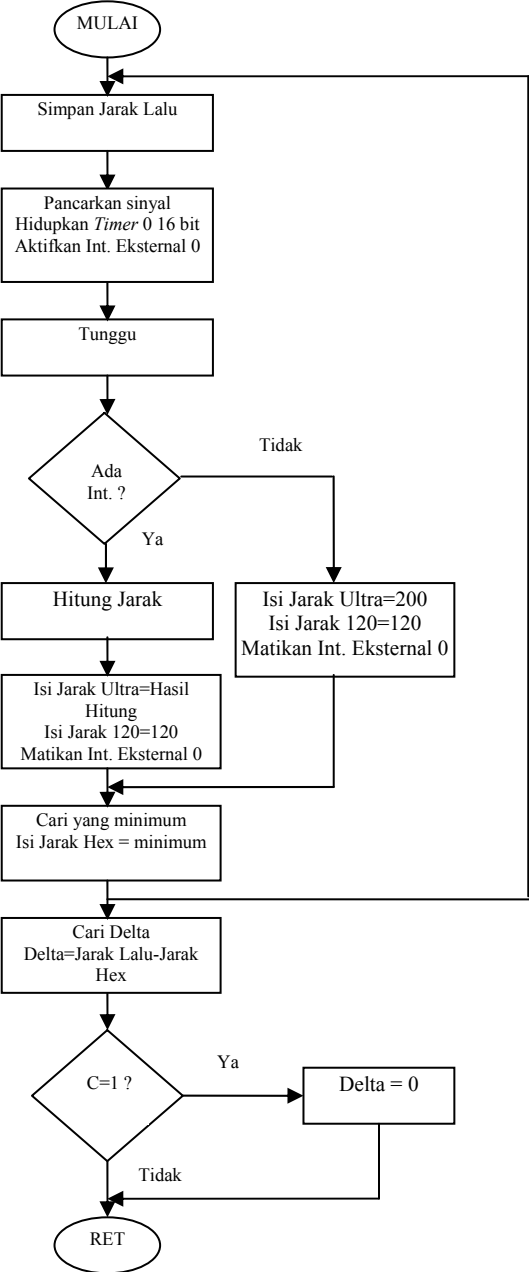
$$2t = 58,1395\mu\text{s} \approx 58\mu\text{s}$$

Dengan *clock* mikrokontroler 1 μs maka didapatkan nilai referensi waktu per centimeter, yaitu :

$$t = \frac{58\mu\text{s}}{1\mu\text{s}} = 58$$

Masukan jarak dibatasi pada nilai 4 cm sampai dengan 120 cm, sedangkan nilai delta dibatasi nilai 0 sampai dengan tak terhingga, namun dalam kondisi normal penghalang statis operasi pencarian delta dibatasi sampai dengan 10 cm.

Alur program perhitungan jarak dan delta jarak dapat dilihat pada diagram alir berikut :



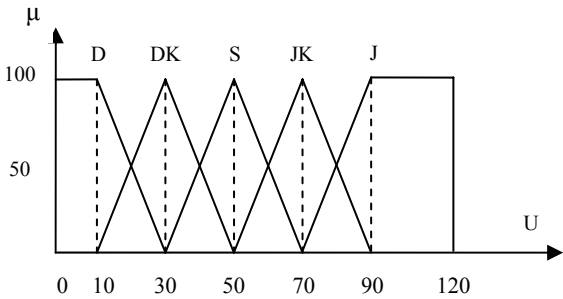
Gambar 7 : Rutin Perhitungan Jarak dan Delta

3. Melakukan prosedur fuzi

Masukan berupa jarak dan delta jarak diproses oleh sistem fuzi yang meliputi langkah fuzifikasi, inferensi (basis data dan aturan), dan defuzifikasi. Langkah fuzifikasi didasari oleh fungsi keanggotaan setiap variabel masukan. Untuk masukan jarak digunakan fungsi

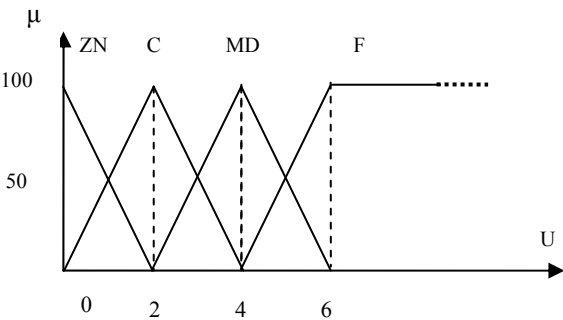
keanggotaan Jauh (J), Jauh Kecil (JK), Sedang (S), Dekat Kecil (DK), dan Dekat (D). Sedangkan untuk masukan delta digunakan fungsi keanggotaan *Far* (F), *Middle* (MD), *Close* (C), dan *Zero/Negative* (ZN).

Masukan jarak



Gambar 8 : Fungsi Keanggotaan Masukan Jarak

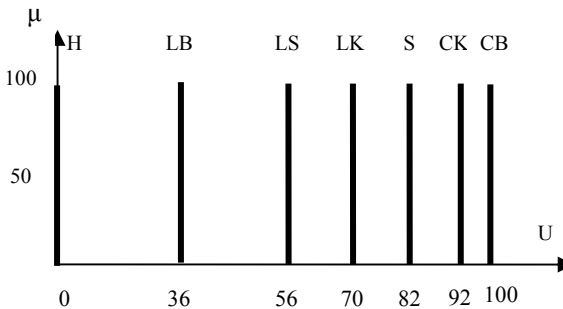
Masukan delta jarak



Gambar 9 : Fungsi Keanggotaan Masukan Delta

Langkah fuzifikasi dilakukan dengan metode *look-up table* sehingga mampu mengurangi beban komputasi yang dilakukan mikrokontroler.

Pada sisi keluaran digunakan fungsi keanggotaan Cepat Besar (CB), Cepat Kecil (CK), Sedang (S), Lambat Kecil (LK), Lambat Sedang (LS), Lambat Besar (LB), dan Halt (H).



Gambar 10 : Fungsi Keanggotaan Keluaran Fuzi

Basis data dan aturan JIKA – MAKA yang digunakan pengendali logika fuzi dapat dijelaskan pada tabel berikut :

Tabel 2 : Basis Aturan Fuzi

		JARAK				
		D	DK	S	JK	J
DELTA JARAK	ZN	H	LS	S	CK	CB
	C	H	LB	LK	CK	CB
	M	H	LB	LK	CK	CB
	F	H	LB	LS	S	CB

Inferensi fuzi berfungsi untuk memetakan bobot-bobot tiap keanggotaan masukan menjadi bobot-bobot setiap anggota keluaran. Langkah yang dilakukan selanjutnya adalah defuzifikasi untuk menghasilkan nilai *duty cycle* yang diperlukan untuk pengendalian motor. Metode fusifikasi yang digunakan adalah *Center Of Average* (COA) karena kesederhanaan implementasinya pada komputasi mikrokontroler. Rumusan COA yang digunakan yaitu :

$$\%PWM = \frac{\mu_H(kel.H) + \mu_{LB}(kel.LB) + \dots + \mu_{CK}(kel.CK) + \mu_{CB}(kel.CB)}{\mu_H + \mu_{LB} + \mu_{LS} + \mu_{LK} + \mu_S + \mu_{CK} + \mu_{CB}}$$

Keluaran defuzifikasi yang juga merupakan hasil akhir prosedur fuzi merupakan nilai *duty cycle* PWM antara 0 sampai dengan 100% yang diperlukan untuk pengendalian motor. Nilai ini akan diolah lebih lanjut oleh algoritma pembangkit PWM.

4. Pembangkitan Sinyal PWM

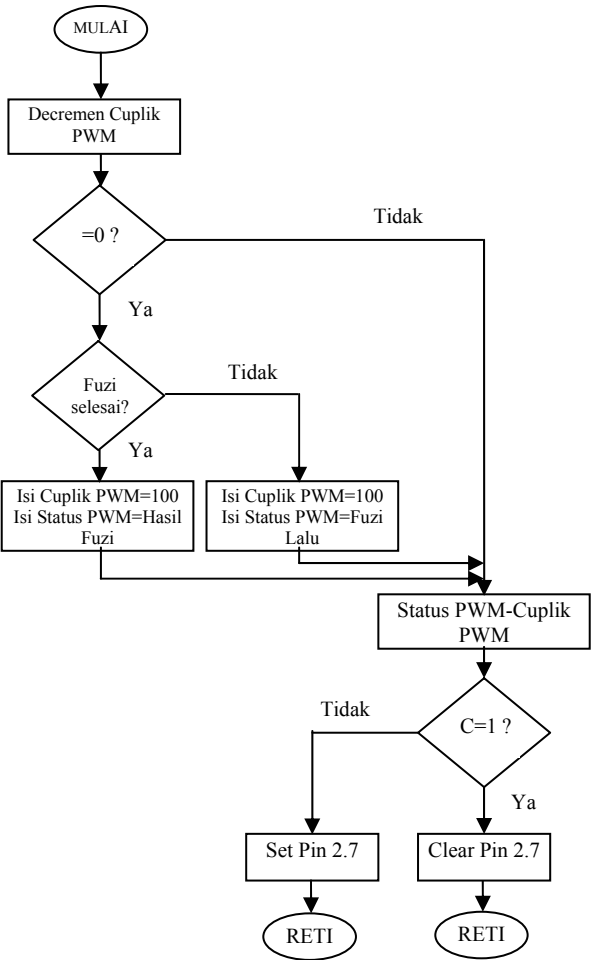
Sinyal PWM dibangkitkan dengan interupsi pewaktu 1 mode 8 bit isi ulang otomatis, dan juga *register* pencacah cuplikan. Nilai cuplikan yang digunakan adalah 100 sehingga resolusi PWM yang diterapkan adalah 1%. Satu cuplikan diatur dengan perintah pengurangan antara pencacah cuplikan dan nilai *duty cycle* yang digunakan, dan satu cuplikan menempati periode selama 100 μ s, sehingga dengan 100 cuplikan dapat dihitung periode PWM sebesar :

$$T = 100\mu s \times 100 = 10000\mu s = 10ms$$

dengan kata lain frekuensi PWM yang diterapkan ke motor sebesar

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{100ms} = 100Hz$$

Nilai 100 Hz ini memenuhi persyaratan pensaklaran L293D sehingga dapat diimplementasikan. Diagram alir pembangkitan sinyal PWM adalah sebagai berikut :

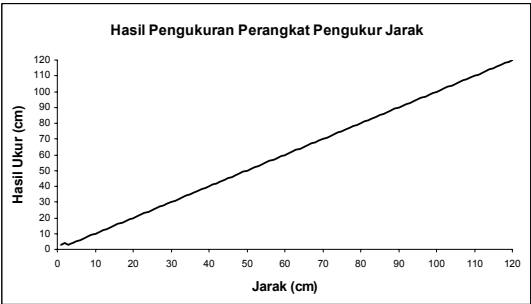


Gambar 11 : Rutin Pembangkitan PWM

5.4. Hasil Pengamatan

A. Perangkat Pengukur Jarak

Pengamatan pengukur jarak dilakukan dengan variasi bahan objek penghalang, yaitu kayu, besi dan kertas (kardus). Didapatkan hasil yang akurat dan presisi yang ditandai dengan kesamaan antara hasil pengukuran dengan jarak sesungguhnya mulai 4 cm sampai 120 cm, seperti pada gambar 12 berikut :



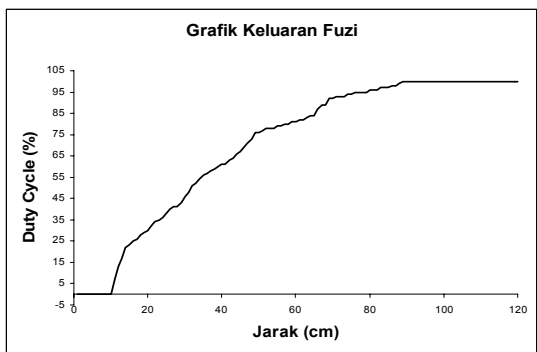
Gambar 12 : Hasil Pengukuran Jarak

Pengamatan dengan variasi ukuran objek penghalang, mendapatkan hasil bahwa agar pengukuran berhasil baik, maka ukuran objek penghalang harus memenuhi syarat ukuran yang

meliputi dimensi tinggi dan lebar. Hal ini terkait dengan kawasan kerja pengukur jarak dengan gelombang ultrasonik. Apabila ukuran penghalang tidak memenuhi persyaratan adalah tidak terdeteksinya keberadaan penghalang untuk jarak jauh (di atas 70 cm).

B. Keluaran Pengendali Logika Fuzi

Pengamatan hasil keluaran pengendali logika fuzi dimaksudkan untuk mendapatkan karakter reduksi kecepatan yang sesuai dengan harapan. Pengamatan dilakukan dengan memberikan nilai masukan delta jarak konstan yaitu 0 cm, dan didapatkan hasil :

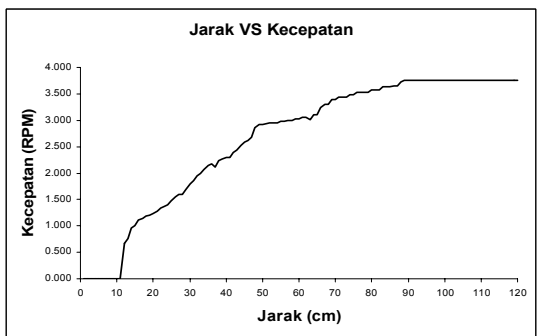


Gambar 13 : Keluaran Pengendali Logika Fuzi

Dapat dilihat bahwa nilai *duty cycle* PWM yang dihasilkan untuk setiap masukan jarak merupakan suatu penurunan yang bertahap sampai dengan nol. Hasil ini sesuai dengan harapan terhadap proses pengereman bertahap.

C. Kecepatan Motor

Pengamatan kecepatan motor dilakukan dengan kondisi catu daya 20 V, dan nilai delta jarak dibuat konstan 0 cm karena motor dikondisikan berputar di tempat, didapatkan :



Gambar 14 : Jarak VS Kecepatan Motor

Apabila tidak terdapat halangan atau jarak penghalang di atas 90 cm, maka motor berputar dengan kecepatan penuh. Namun apabila dideteksi jarak penghalang di bawah 90 cm, maka proses pengereman/reduksi kecepatan mulai dilakukan. Selama penghalang masih ada maka pengereman akan terus berjalan hingga pada jarak 12 cm motor

berhenti dan menunggu penghalang dipindahkan. Hasil ini sesuai dengan harapan terhadap piranti pengereman otomatis dengan karakter halus seperti persepsi otak manusia, sehingga dapat dikatakan bahwa sistem pengendalian berjalan dengan baik.

6. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil pengukuran jarak menunjukkan hasil akurat dan presisi dengan ketelitian 1 cm.
2. Persyaratan agar pengukuran jarak berjalan baik menyangkut dimensi/ukuran objek penghalang yang meliputi tinggi dan lebar penampang.
3. Pengendali logika fuzi dapat diimplementasikan dengan baik pada mikrokontroler AT89C51.
4. Kecepatan motor dapat direduksi secara bertahap apabila jarak kendaraan dengan penghalang semakin dekat hingga pada jarak 12 cm motor berhenti.

7. Daftar Pustaka

Boylestad, R., Nashelsky, L., 1994, *Electronic Device and Circuit Theory*, Prentice-Hall, New Delhi

Carr, Joseph, J., 1993, *Sensors and Circuits*, Prentice-Hall, New Jersey

Firmansyah, E., 2001, *Pengukur Jarak Dengan Gelombang Ultrasonik Memanfaatkan Mikrokontroler 68HC11A1FN*, Tugas Akhir, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, (tidak diterbitkan)

Hudallah, N., 2002, *Kendali Logika Fuzi Untuk Mengatur Kecepatan Motor DC (Tinjauan Pada Pengaruh Penalaan Fungsi Keanggotaan)*, Thesis, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, (tidak diterbitkan)

Olsson, G., Piani, G., 1992, *Computer Systems for Automation and Control*. Prentice-Hall. International (UK)

Putra, A. E., 2002, *Belajar Mikrokontroler AT89C51/52/55 : Teori dan Aplikasi*, Gaya Media, Yogyakarta

Rashid, M., 1999, *Microelectronic Circuit : Analysis and Design*, PWS Publishing Company, Boston

Sudjarwadi, Y. D., 2002, *Aplikasi Pengendali Logika Fuzi Pada Sistem Permukaan Air Berbasis Mikrokontroler AT89C51*, Tugas Akhir, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, (tidak diterbitkan)

Yan, J., Ryan, M., Power, J., 1994, *Using Fuzzy Logic : Toward Intelligent System*, Prentice-Hall, London