METROTECH
Journal of Mechanical and Electrical Technology
Vol. 4 No. 1, Januari 2025, E-ISSN 2809-9605 | P-ISSN 2827-8097

Sistem Kendali Kecepatan Pada *Skateboard* Menggunakan Metode *Fuzzy Logic Control* Mamdani

Mochamad Sena Sudiro[*1], Totok Winarno[2], Muhamad Rifa'i[3]
[1,2,3]Politeknik Negeri Malang, Malang
[*]Penulis Korespondensi, email: mochamadsenasud@gmail.com

Received:14/08/2024 *Revised:28/10/2024* *Accepted:02/11/2024*

Abstract. *Air pollution, as a significant social challenge, threatens the health of living beings through its harmful substances. The intense use of fossil fuel-powered vehicles worsens air quality and accelerates global warming. As a solution, electric vehicles like Electric Skateboards emerge as an affordable and portable alternative. However, the use of three-phase BLDC motors in Electric Skateboards requires an Electronic Speed Controller (ESC), which is typically controlled by expensive remote controls, reducing convenience and increasing the risk of accidents. An innovation is proposed by utilizing load cell sensors to detect the user's weight as input for controlling the BLDC motor speed, using the Mamdani Fuzzy Inference method on the ESP32 microcontroller. The research results show that the system can reach the target set point with consistent output changes. This study compares the outputs of the Mamdani Fuzzy Logic Control system implemented manually with MATLAB for controlling Skateboard speed. On the front load cell, significant output speed variations were observed between data points 3 and 9, with an error percentage exceeding 2000%, but it decreased from data points 10 to 20, reaching below 10%. On the rear load cell, braking output variations were high between data points 2 and 9, with errors up to 697%, yet the accuracy improved at higher input values, enabling smoother speed transitions and braking. The fast response time (with a 50ms delay and actual readings every 93ms) demonstrates that both the Fuzzy system and MATLAB can produce stable and reliable output even in short time intervals.*

Keywords: *Fuzzy logic control, Mamdani, motor BLDC, VESC, Load cell, Hall sensor, Electric Skateboard, Mikrokontroler ESP32*

Abstrak. Polusi udara, sebagai tantangan sosial yang signifikan, mengancam kesehatan makhluk hidup melalui kandungan zat berbahayanya. Intensitas penggunaan kendaraan berbahan bakar fosil memperburuk kualitas udara dan mempercepat pemanasan global. Sebagai solusi, kendaraan listrik seperti papan luncur elektrik muncul sebagai alternatif yang terjangkau dan portabel. Namun, penggunaan motor *BLDC* tiga fase pada papan luncur elektrik memerlukan *Electronic Speed Controller* (ESC) yang umumnya dikendalikan melalui *remote control* mahal, mengurangi kenyamanan dan meningkatkan risiko kecelakaan. Inovasi diusulkan dengan memanfaatkan sensor *loadcell* untuk mendeteksi berat pengguna sebagai input pengontrol kecepatan motor *BLDC*, menggunakan metode inferensi *Fuzzy* Mamdani pada *Mikrokontroler ESP32*. Hasil penelitian menunjukkan sistem mampu mencapai target *set point* dengan perubahan output yang konsisten, Penelitian ini membandingkan keluaran sistem *Fuzzy Logic Control* Mamdani yang diimplementasikan secara manual dengan MATLAB pada kendali kecepatan *Skateboard*. Pada *Loadcell* depan, variasi output kecepatan terlihat signifikan pada data 3 hingga 9, dengan persentase error melebihi 2000%, tetapi menurun pada data 10 hingga 20, mencapai di bawah 10%. Pada *Loadcell* belakang, variasi pengereman tinggi pada data 2 hingga 9 dengan error hingga 697%, namun kesesuaian hasil membaik pada nilai input yang lebih tinggi. memungkinkan transisi kecepatan dan pengereman yang lebih halus. Respon time yang cepat (dengan delay 50ms dan pembacaan aktual setiap 93ms) menunjukkan bahwa sistem Fuzzy dan Matlab dapat menghasilkan output yang stabil dan dapat diandalkan bahkan pada interval waktu yang pendek.

Kata Kunci: *Fuzzy logic control*, Mamdani, Motor *BLDC*, *VESC*, *Load cell*, *Hall sensor*, *Electric Skateboard, Mikrokontroler ESP32*

I. PENDAHULUAN

Perkembangan transportasi berbasis bahan bakar fosil telah memunculkan sejumlah tantangan lingkungan yang signifikan, termasuk pencemaran udara, peningkatan efek rumah kaca, dan akselerasi pemanasan global. Sebagai respons terhadap permasalahan ini, transisi menuju kendaraan bertenaga listrik, seperti papan luncur elektrik, menjadi salah satu solusi yang dipertimbangkan. Papan luncur elektrik umumnya menggunakan pengendali jarak jauh untuk mengoperasikan motor DC tanpa sikat (*BLDC*) melalui *Electronic Speed Controller* (ESC) [1]. Namun, penggunaan pengendali jarak jauh ini mengharuskan pengguna untuk terus-menerus memegang dan mengatur kecepatan, yang berpotensi menyebabkan perubahan kecepatan yang tiba-tiba. Kondisi ini dapat mengurangi kewaspadaan pengguna terhadap lingkungan sekitar, sehingga meningkatkan risiko kecelakaan [2]. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan sistem multivariabel yang dapat meningkatkan kemudahan dan keamanan dalam pengaturan kecepatan serta pengereman papan luncur elektrik.

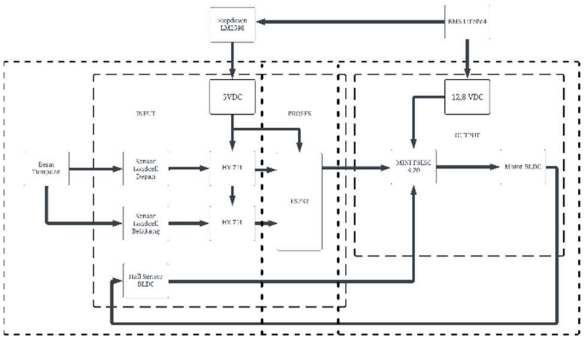
Papan luncur elektrik, seperti halnya kendaraan listrik lainnya, umumnya mengandalkan motor *BLDC* sebagai sumber penggerak utama. Pemilihan motor *BLDC* didasarkan pada berbagai keunggulan, termasuk operasi yang senyap, dimensi yang kompak, torsi yang tinggi, efisiensi energi yang optimal, daya tahan yang panjang, serta kemudahan dalam pengendalian [3]. Pengendalian motor *BLDC* melibatkan pengaturan fase dari kumparan tiga fase yang terdapat pada stator motor. Untuk mengatur ketiga fase ini, diperlukan driver khusus yang dikenal sebagai Pengendali Kecepatan Elektronik (ESC). ESC berfungsi sebagai modul elektronik yang mengatur kecepatan rotasi motor *BLDC* [4]. Melalui koneksi pengendali jarak jauh menggunakan sinyal frekuensi radio, ESC dapat dikendalikan dengan menggeser *slider* yang tersedia pada pengendali tersebut. Namun, metode ini mengharuskan pengguna untuk terus-menerus mengontrol perubahan kecepatan ESC sambil memegang pengendali, yang berpotensi mengurangi kewaspadaan terhadap kondisi jalan dan meningkatkan risiko kecelakaan.

Untuk memfasilitasi pengendalian kecepatan motor yang lebih efektif dengan memanfaatkan sensor *loadcell* sebagai input, Kendali Logika *Fuzzy* (FLC) muncul sebagai sistem yang menjanjikan [5]. FLC memiliki kemampuan untuk memproses berbagai input dan output serta menangani nilai input yang bersifat *non-linear*. Sistem ini mengintegrasikan beberapa *loadcell* sebagai variabel untuk mengatur kecepatan dan pengereman. Dalam implementasi FLC, himpunan *fuzzy* dan aturan *fuzzy* digunakan untuk menghubungkan variabel input dan output. Penerapan FLC dalam sistem *Multi Input Multi Output* (MIMO) menyederhanakan proses pengendalian kecepatan. Sistem ini mengadopsi pendekatan Sistem Pengendali Umpan Balik, di mana output langsung dikirimkan ke ESC dan memerlukan umpan balik dari pembacaan kecepatan RPM pada Sensor *Hall* serta dari *loadcell*. Melalui integrasi FLC dan Sistem Pengendali Umpan Balik, diharapkan kecepatan yang diinginkan dapat dicapai berdasarkan nilai input dari sensor *loadcell* yang ditempatkan di bagian depan dan belakang. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pengendalian kecepatan pada papan luncur elektrik dengan memanfaatkan sensor *loadcell* dan Kendali Logika *Fuzzy*, dengan harapan dapat meningkatkan kemudahan dan keamanan pengguna dalam mengatur kecepatan motor *BLDC* secara lebih fleksibel.

II. METODOLOGI

Perancangan sistem secara keseluruhan ditunjukkan oleh diagram blok pada Gambar 1.

A. Diagram blok sistem



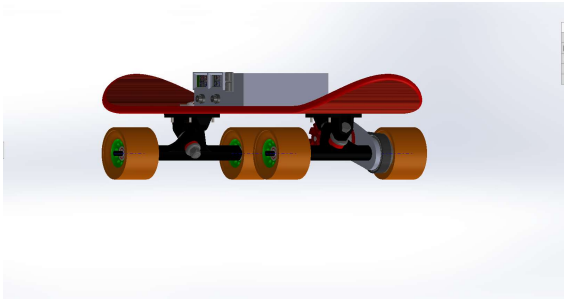
Gambar 1. Blok diagram sistem

Pada bagian input terdapat berat tumpuan, sensor *loadcell* depan dan belakang, *hall sensor BLDC*, baterai 12VDC lifepo4, dan *stepdown* LM2596. Berat tumpuan berfungsi untuk input berapa tumpuan yang akan dibaca oleh *loadcell* yang menentukan *Skateboard* ini akan maju, mundur atau mengerem [6]. Sensor *Loadcell* Depan untuk mengatur *fuzzy* input kecepatan, dengan *set point*-nya menggunakan berat tumpuan depan *Skateboard* dengan tumpuan maksimalnya di 50kg, dengan dayanya 5 VDC dari HX711 untuk mengkonversi data analog menjadi digital, dari data resistansi menjadi data digital dalam bentuk *Byte*, yang akan dikonversi di ESP32 menjadi gram dan diprosesnya menjadi *fuzzy* input kecepatan, dengan dayanya 5VDC dari *stepdown* LM2596. Sensor *Loadcell* Belakang untuk mengatur *fuzzy* input Pengereman, dengan *set point*-nya menggunakan berat tumpuan depan *Skateboard* dengan tumpuan maksimalnya di 50kg, dengan dayanya 5 VDC dari HX711 untuk mengkonversi data analog menjadi digital, dari data resistansi menjadi data digital dalam bentuk *Byte*, yang akan dikonversi di ESP32 menjadi gram dan diprosesnya menjadi *fuzzy* input Pengereman, dengan dayanya 5VDC dari *stepdown* LM2596. *Hall sensor* pada Motor *BLDC* membaca berapa kecepatan yang terdapat pada motor *BLDC* yang berukuran RPM, jadi hasil pembacaannya ini akan dimasukkan ke dalam proses ESP32, dayanya dari ESC dengan tegangan 5VDC. Penggunaan Baterai sebagai *Power Supply* Utama, yang akan dialirkan ke *Motor Driver* dan *Stepdown* LM2596. Pada Baterai ini Menghasikan tegangan 12,8 VDC dari empat baterai 3,2 VDC yang diseri. Dan untuk baterainya berkapasitas 12 AH. Untuk tegangan tersebut merupakan tegangan idealnya, karena disaat posisi charging max, tegangan bisa mencapai hingga 13,8 VDC. Penggunaan *Stepdown* LM2596 berfungsi menyalakan sensor yang membutuhkan tegangan daya 5VDC, seperti ESP32 dan Sensor HX711 sebanyak dua buah. Pada bagian proses terdapat ESP32 berfungsi sebagai kontrol sistem pada sistem *Skateboard* yang akan mengatur bagaimana cara jalannya menggunakan metode *fuzzy* yang dirancang, dengan dayanya 5VDC [7]. Pada bagian output terdapat *Mini FSESC* 4.20 dan motor *BLDC*. Pada *Mini FSESC* 4.20 ini adalah *Driver* dari Motor *BLDC*, *Driver* ini akan Merespon Outputan dari ESP32 yang berupa sinyal PWM dan dikonversikan menjadi Putaran pada Motor *BLDC*, *Supply*-nya menggunakan 12 VDC langsung dari BMS. Motor *BLDC* ini berfungsi sebagai pemutar dalam roda *Skateboard*, jadi setelah menerima sinyal dari ESC Mini *FSESC* 4.20, maka roda akan memutar roda menggunakan *Vanbelt* yang terpasang, dengan dayanya dari ESC yang terpasang langsung secara 3 fasa.

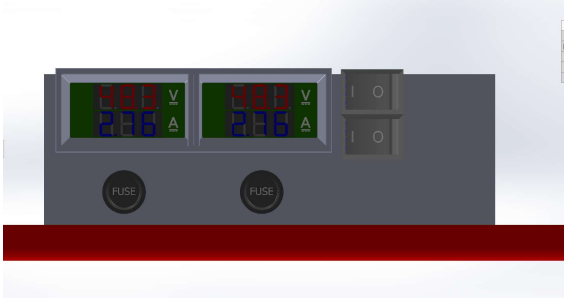
B. Perancangan mekanik

Perancangan mekanik merupakan salah satu hal yang penting dalam pembuatan suatu alat karena berpengaruh kepada keberhasilan alat. Terdapat Beberapa Komponen, Seperti Papan *Skateboard* Beserta Rodanya, *Bracket* Motor *BLDC*, dan *Box* Panel yang menampung Komponen Elektronikanya.

1. **Dimensi *Skateboard*:**
   a. Tinggi : 10 cm
   b. Lebar : 52 cm
   c. Panjang : 80 cm
2. **Dimensi *Box* Panel:**
   a. Panjang : 32,5 cm
   b. Lebar : 15,5 cm
   c. Tinggi : 7,5 cm
3. **Dimensi Bracket Motor *BLDC*:**
   a. Panjang : 16,4 cm
   b. Lebar : 4,2 cm
   c. Tinggi : 4 cm
   d. Lubang motor : 8 mm

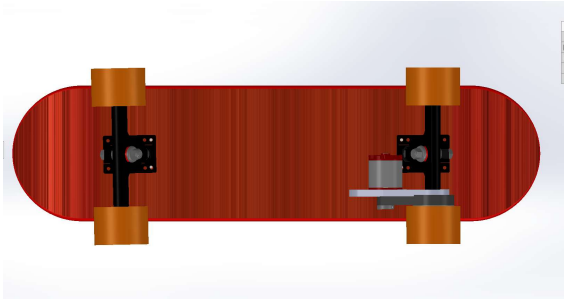


Gambar 2. Tampak samping depan

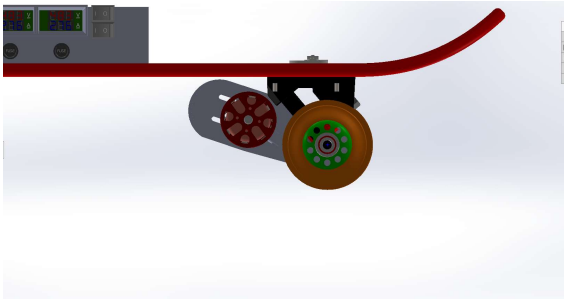


Gambar 3. Tampak panel *box* depan

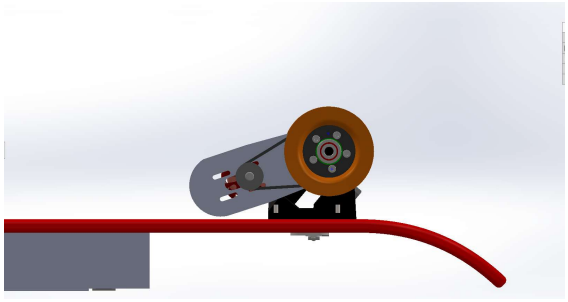
Gambar 4. Tampak panel *box* atas



Gambar 5. Tampak *skateboard* bawah



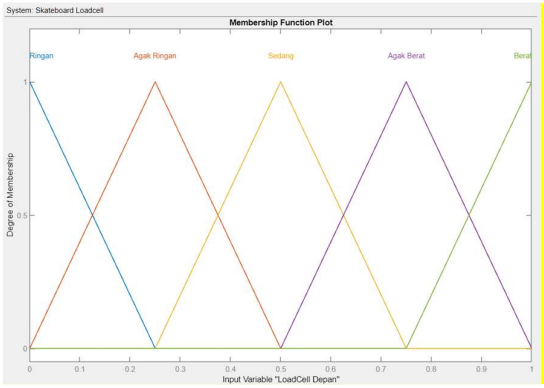
Gambar 6. Tampak *bracket* kanan



Gambar 7. Tampak *bracket* kiri

C. Perancangan fuzzy logic control

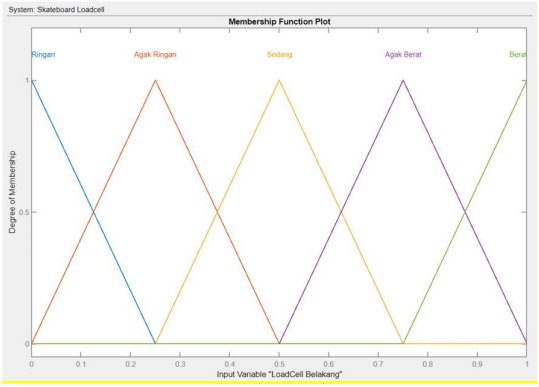
Kontrol Logika Fuzzy yang digunakan pada penelitian ini mempunyai dua crisp masukan, yaitu *loadcell* depan dan *loadcell* belakang, crisp sendiri merupakan sistem logika yang hanya mempunyai dua nilai keanggotaan benar atau salah. Masukan *loadcell* depan didapat dari pembacaan sensor *loadcell*depan dan masukan *loadcell* belakang didapat ari pembacaan sensor *loadcell* belakang. Keluarannya berupa nilai RPM yang digunakan untuk memberikan perubahan pada kecepatan putar motor *BLDC* 5065 270KV. Untuk Membership Keanggotaan *Loadcell* Depan dan *Loadcell* Belakang Sebagai berikut:



Gambar 8. *Membership loadcell* depan

Tabel 1. Fuzzy member *loadcell* depan

No	Variabel Linguistik	Domain Himpunan Fuzzy
1	Ringan	(0,0,0.25)
2	Agak Ringan	(0,0.25,0.5)
3	Sedang	(0.25,0.5,0.75)
4	Agak Berat	(0.5,0.75,1)
5	Berat	(0.75,1,1)

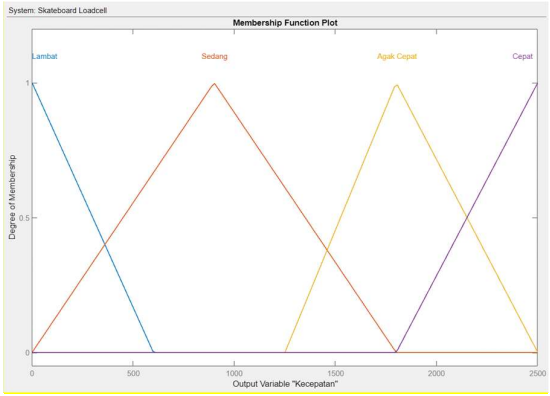


Gambar 9. *Membership loadcell* belakang

Tabel 2. Fuzzy member *loadcell* belakang

No	Variabel Linguistik	Domain Himpunan Fuzzy
1	Ringan	(0,0,0.25)
2	Agak Ringan	(0,0.25,0.5)
3	Sedang	(0.25,0.5,0.75)
4	Agak Berat	(0.5,0.75,1)
5	Berat	(0.75,1,1)

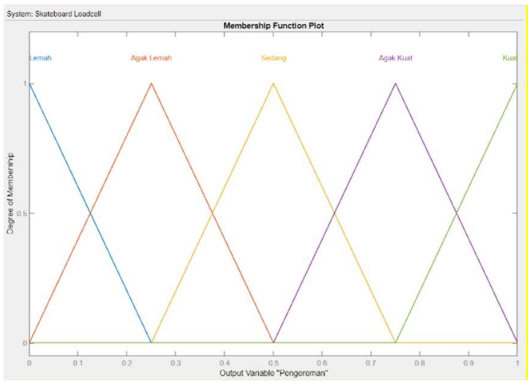
Output Fuzzy keluaran nilai pengereman yang digunakan sebagai pengali pengurang kecepatan. Hasil Penentuan dari system Kontrol yang dibagi menjadi Member Kecepatan untuk menentukan *Skateboard* Maju, dan Member Pengereman Sebagai system mengerem kecepatan pada *Skateboard*. Pada Membership Kecepatan dibagi menjadi 4 keanggotaan, seperti Lambat, Sedang, Agak Cepat, dan Cepat. Untuk membership Pengeraman ada 5, seperti Lemah, Agak Lemah, Sedang, Agak Kuat, dan Kuat. Untuk gambar grafik fuzzy outputnya sebagai berikut:



Gambar 10. *Membership* kecepatan

Tabel 3. Fuzzy member kecepatan

No	Variabel Linguistik	Domain Himpunan Fuzzy
1	Lambat	(0,0,60)
2	Sedang	(0,900,1800)
3	Agak cepat	(1250,1800,2500)
4	Cepat	(1800,2500,2500)



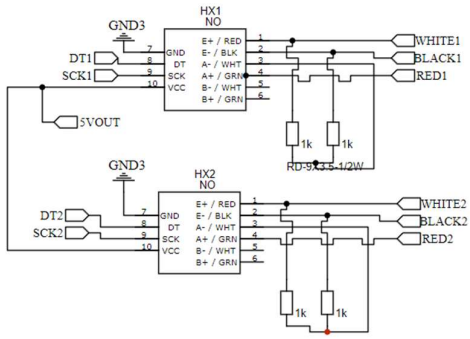
Gambar 11. *Membership* pengereman

Tabel 4. Fuzzy Member Pengereman

No	Variabel Linguistik	Domain Himpunan Fuzzy
1	Lambat	(0,0,0.25)
2	Sedang	(0,0.25,0.5)
3	Agak cepat	(0.25,0.5,0.75)
4	Cepat	(0.5,0.75,1)

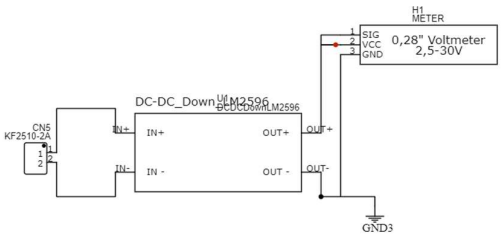
D. Perancangan elektronik

Perancangan elektronik terdiri dari perancangan sensor *load cell*, rangkaian *battery Lifepo4*, rangkaian *driver FSESC 4.20*, dan rangkaian *driver motor 5065*.



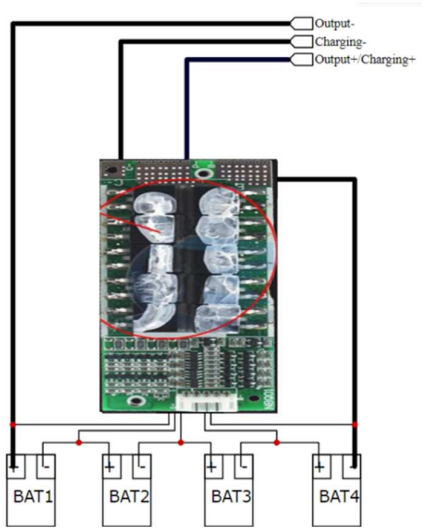
Gambar 12. Skematik *loadcell*

Load cell pada system ini digunakan untuk mengukur berat tumpu yang menggunakan *Skateboard*. Pada rangkaian ini digunakan dua *loadcell* yang akan mengukur berat tumpuan didepan dan dibelakang. Digunakannya dua sensor *loadcell* dan dua modul ADC (*Analog-to-Digital Converter*) 24-bit menggunakan IC HX711 *Weight Scale Sensor*. Digunakan *loadcell* 50kg untuk membaca berat 10-50kg sesuai maksimal dari spek sensornya. Dalam sebuah *loadcell*, terdapat rangkaian jembatan *wheatstone* yang mendeteksi perubahan tekanan berdasarkan perubahan nilai resistansi yang dihasilkan saat diberi tekanan sehingga perubahan resistansi ini akan dikonversikan melalui *driver* (*converter* ADC) untuk menghasilkan nilai yang diwujudkan dalam bentuk tekanan berat. Cara kerja dari modul HX711 yaitu *loadcell* mengirim sinyal analog dan diubah menjadi sinyal digital, lalu DOUT dan SCK mendapat input dari *loadcell*. Saat data atau DOUT dalam keadaan *high* maka tidak terjadi lagi pengambilan data, saat DOUT *low* maka pengambilan data ke mikrokontroler sebagai data digital berat yang telah dikonversi. Untuk menggunakan *loadcell*, dilakukan kalibrasi pada modul HX711 dengan berat yang sebenarnya. Pada Bagian Resistor R1 dan R2 diberi 1K karena sebagai *voltage divider* dari kabel *White* dan *Black* pada Sensor *Loadcell*, supaya tegangan referensi tidak melebihi dari outputnya sensor *loadcell*. Dan menyeimbangkan pembacaan dari sensor *loadcell* tersebut



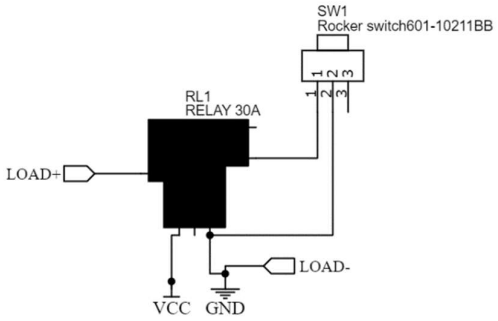
Gambar 13. Skematik *stepdown*

Rancangan *stepdown* ini digunakan untuk menyediakan suplai daya ke ESP32 dan dua modul HX711. Tegangan yang diambil dari sumber BMS 12V *LiFePO4* diturunkan menjadi 5V, yang cukup stabil untuk mengoperasikan modul ESP32 dan kedua HX711.



Gambar 14. Skematik BMS

Baterai *LiFePO4* dalam perancangan ini berfungsi sebagai sumber daya utama untuk *Skateboard* ini, yang mensuplai *driver FSESC* 4.20, *Mikrokontroler ESP32*, HX711, dan *loadcell*-nya. Perakitan baterai ini melibatkan penggunaan empat baterai *LiFePO4* yang dihubungkan secara seri untuk menghasilkan tegangan 12VDC, dengan masing-masing baterai memiliki tegangan 3.2VDC dan arus 12Ah. Satu unit BMS (*Battery Management System*) digunakan untuk menjaga keseimbangan dan performa baterai *LiFePO4* ini, sehingga mampu menahan beban arus yang besar. BMS ini juga dilengkapi dengan *port* pengisian daya yang mendukung tegangan 14.6VDC dengan arus maksimal hingga 10A, sesuai dengan spesifikasi *datasheet* BMS [8]. Pengisian baterai dilakukan menggunakan *power supply* yang tersedia di pasaran. Daya output dari baterai ini dapat disalurkan hingga 100A berkat sistem *active balancing* yang menjaga kesetaraan daya keluaran dari baterai.



Gambar 15. Skematik *relay*

Pada bagian output, digunakan *relay* 12V 30A untuk mendistribusikan daya ke seluruh output melalui *terminal block*. *Relay* dipasang dalam konfigurasi NO (*Normally Open*), sehingga ketika saklar menyalakan koil, *relay* akan beralih dari posisi NO ke NC (*Normally Closed*) saat tidak ada tegangan.

Implementasi *FSESC* 4.20 berperan sebagai pengendali kecepatan motor *BLDC*, memastikan kesesuaian dengan nilai kecepatan yang diinginkan. Nilai RPM telah ditetapkan sesuai dengan kode program. *FSESC* 4.20 ditempatkan dalam wadah di atas Motor *BLDC* untuk mencegah kabel terbelit. Integrasi sensor *Hall* dalam sistem ini berfungsi untuk mendeteksi posisi magnet pada poros motor, memungkinkan penentuan posisi poros dan kecepatan motor *BLDC* berdasarkan perubahan posisi poros. Sensor *Hall* terintegrasi dengan *mini FSESC* 4.20, yang akan menginterpretasi nilai kecepatan dari pembacaan sensor *Hall* pada motor dan mengatur kecepatan sesuai input yang diinginkan. Sensor *Hall* ini terpasang di dalam Motor *BLDC*. Motor *BLDC* 5065 270KV berfungsi sebagai aktuator atau penggerak roda papan luncur elektrik, terintegrasi dengan *FSESC* 4.20. Ketika *mini FSESC* 4.20 menerima input nilai RPM dari ESP WROON-32, ia akan menyuplai tegangan sesuai dengan nilai RPM yang ditargetkan. Motor *BLDC* 5065 270KV dipasang pada bagian roda *Skateboard*, terhubung melalui *gear* dan *belt*.

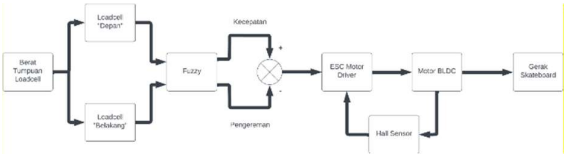
Pengembangan perangkat lunak melibatkan proses pemrograman untuk mengendalikan motor *BLDC* dengan memanfaatkan data berat dari *loadcell*. Data ini dikonversi menjadi sinyal digital melalui HX711 dan diproses menggunakan Logika *Fuzzy* di ESP32. Hasil pemrosesan ini akan menginstruksikan *driver mini FSESC* 4.20 untuk menggerakkan motor *BLDC* dengan kecepatan RPM yang diukur melalui sensor *Hall*. Sistem Kendali Logika *Fuzzy* dalam studi ini menggunakan dua input *crisp*: *loadcell* depan dan belakang. Input *crisp* merupakan sistem logika dengan dua nilai keanggotaan: benar atau salah. Input dari load cell depan dan belakang diperoleh dari pembacaan masing-masing sensor. Output berupa nilai RPM digunakan untuk mengatur variasi kecepatan putaran motor *BLDC* 5065 270KV, serta nilai pengereman untuk mengurangi kecepatan.

Jumlah fungsi keanggotaan bergantung pada desain sistem dan hasil observasi variabel input. Semakin kompleks kontrol yang diperlukan, semakin banyak label fungsi keanggotaan yang dibutuhkan [9]. Fungsi keanggotaan untuk rentang berat *loadcell* depan dan belakang masing-masing dibagi menjadi lima tingkat: Ringan, Agak Ringan, Sedang, Agak Berat, dan Berat. Berdasarkan fungsi-fungsi keanggotaan ini, kecepatan dan pengereman ditentukan oleh berat pada load cell depan dan belakang, yang mempengaruhi output kecepatan motor *BLDC* 5065 270KV.

Perancangan aturan *fuzzy* mencakup aspek yang menggambarkan dinamika sistem terhadap input, dikarakterisasi oleh serangkaian variabel linguistik dan didasarkan pada pengetahuan operator [10]. Desain ini dibuat berdasarkan hubungan implikasi antara berat *loadcell* depan dan belakang. Dalam pengaturan kecepatan papan luncur elektrik, terdapat 25 aturan untuk setiap output kecepatan motor *BLDC* 5065 270KV.

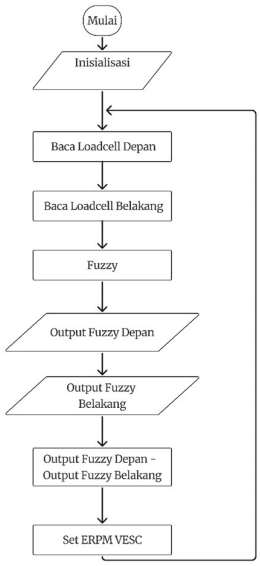
Pada Konfigurasi Software Digunakan *VESC* Tool untuk Menggunakan *PID* untuk mengoptimalkan Motor *BLDC* 5065 yaitu Proportional (P), Intergal (I) dan Deritativ(D).

Lalu Untuk Konfigurasi Sistem Fuzzy Mengatur Berapa Berat yang ditentukan dari *loadcell* yang dikonversi menjadi *ERPM* yang dijalankan Oleh *FSESC* yang konversinya dihasilkan dari *Mikrokontroller ESP32.*



Gambar 16. Diagram blok kontrol *fuzzy*

Penggunaan Dua Sistem ini supaya bisa mengoptimalkan dari hasil *Skateboard* yang halus dan *responsive.*



Gambar 17. Diagram alir

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi komprehensif sistem dilakukan melalui dua pendekatan pengujian: tanpa pengontrol dan dengan implementasi *Fuzzy Logic Controller* (FLC). Pengujian tanpa pengontrol ditujukan untuk menganalisis kinerja komponen utama, yakni *Mini FSESC* 4.20 dan Motor *BLDC*, menggunakan aplikasi *VESC Tool*. Dalam eksperimen ini, performa sistem diamati pada berbagai tingkat *Erpm* (kecepatan elektrik) yang telah ditetapkan. Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini mencakup *Mini FSESC* 4.20, Motor *BLDC* 5065 yang dilengkapi Sensor *Hall*, Baterai *LiFePO4* dengan *Battery Management System* (BMS) terintegrasi, serta komputer pribadi untuk analisis dan pemantauan. Metodologi ini memungkinkan peneliti untuk memperoleh wawasan mendalam mengenai karakteristik dan respons sistem dalam beragam kondisi operasional, baik dengan maupun tanpa penerapan sistem kontrol canggih seperti FLC. Prosedur pengujiannya diawali dengan menyambungkan *Mini FSESC* 4.20 dengan *Personal Computer*, menyambungkan catu daya *VESC* dengan BMS 12V, menyambungkan Motor *BLDC* dengan *Hall sensor*nya, dan melakukan Pembacaan di Aplikasi *VESC*. Hasil pengujian disaat melakukan RPM *Sweep* pada *VESC* dihasilkan Grafik yang cukup baik hingga *Erpm* 11.000. dengan setingan Motor *BLDC* di Torsi Perbandingan *Gear* 30:55. Penyettingan di *Erpm* Bawah diperlukan Pen-*tunning*-an Sehingga nanti disaat disambung kontrollernya lebih bagus untuk respon gerak jalannya dengan menggunakan *PID* yang ditentukan di Firmwarenya melalui *VESC TOOL*

Dengan Setingan *PID* Kp=0.004, Ki=0.004, dan Kd=0.001, dengan Kd Process=0.0005 dan Kd Filter 0.2, respon di *Erpm* atas sudah cukup mulus. Setelah Melakukan Tuning, akhirnya mendapatkan hasil yang mulus, dengan respon yang bagus, dengan setingan *PID* ini, memberikan hasil rpm sweep yang bagus, sehingga *Skateboard* dinyatakan bisa berjalan dengan mulus. Analisa Perhitungan pada Motor *BLDC* ini Dibandingkan dengan setingan Tuning Pertama dan Kedua, untuk grafiknya seperti pada Gambar 2. Dilihat dari perbandingannya bahwa hasil grafik kedua mempunyai respon yang cukup bagus daripada grafik pertama, di grafik pertama mengalami rise time dan beberapa overshoot di rpm 500 hingga mencapai 3000. Di grafik kedua sudah tidak mengalami overshoot karena setingan *pid* yang sudah di kalibrasi ulang sehingga motor tidak mengalami overheat dikarenakan respon arus yang diberi oleh driver *VESC* sesuai dengan arahan *hall sensor*nya.

Pengujian menggunakan FLC bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem secara keseluruhan dan mengamati respons sistem. Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini meliputi Sensor *Loadcell*, HX711, Node MCU ESP 32, Mini *FSESC* 4.20, Motor *BLDC* 5065 270KV dengan *Hall sensor*, Baterai BMS 12V, dan Personal Computer. Prosedur pengujian dimulai dengan menghubungkan Mini *FSESC* 4.20 ke Baterai BMS

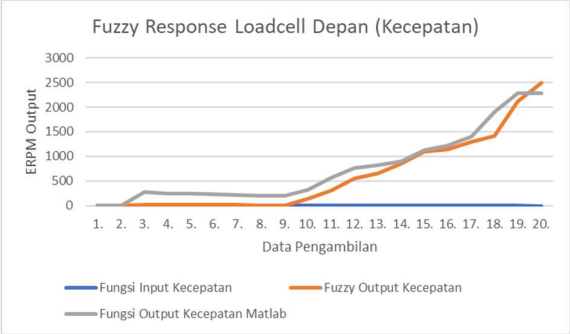
12V, menghubungkan Motor ke Mini *FSESC* 4.20, menyambungkan rangkaian komputasi seperti Node MCU ke Mini *FSESC* 4.20, menghubungkan HX711 ke Node MCU, menghubungkan Node MCU ke Personal Computer, kemudian mengamati output sistem terkait kecepatan dan pengereman melalui Serial Monitor dan membandingkannya dengan hasil dari Matlab.

Hasil pengujian dengan FLC menghasilkan data respon kecepatan Erpm serta hasil pembacaan berat dari *loadcell* depan dan belakang secara keseluruhan.

Untuk tabel respon dari kecepatan berdasarkan pembacaan dari *loadcell* deepan sebagai berikut:

Tabel 5. Tabel Respon Kecepatan

Data	Byte ADC Loadcell Depan	Fungsi Input Kecepatan	Fuzzy Output Kecepatan	Fungsi Output Kecepatan Matlab	Selisih	Error (%)
1.	41,99	0	0	0	0	-
2.	183,83	0	0	0	0	-
3.	350,83	0,03	11,77	276	264,23	2244,78%
4.	470,48	0,08	10,63	243	232,37	2186,17%
5.	526,57	0,10	10,21	238	227,79	2231,63%
6.	603,61	0,12	9,82	229	219,18	2231,49%
7.	694,43	0,16	9,13	212	202,87	2221,02%
8.	777,04	0,19	8,72	202	193,28	2215,60%
9.	862,31	0,22	8,44	195	186,56	2210,76%
10.	1058,12	0,26	136,49	324	187,51	137,40%
11.	1258,25	0,29	303,66	558	254,34	83,74%
12.	1367,46	0,36	548,95	767	218,05	39,73%
13.	1617,12	0,4	655,09	827	171,91	26,24%
14.	1763,13	0,49	849,75	899	49,25	5,79%
15.	1830,97	0,55	1101,03	1123	21,97	2,00%
16.	1920,66	0,57	1146,18	1210,3	64,12	5,59%
17.	2112,65	0,60	1298,46	1403,3	104,84	8,07%
18.	2571,52	0,67	1415,54	1903	487,46	34,43%
19.	3036,40	0,84	2117,31	2280,3	162,99	7,70%
20.	3446,71	1.00	2500,00	2280,3	219,7	8,79%



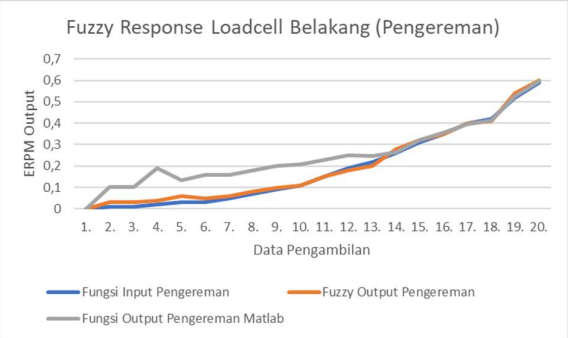
Gambar 18. *Fuzzy* respon kecepatan

Pada Respon 1, terlihat bahwa nilai *Fuzzy* Output Kecepatan yang dihasilkan oleh sistem *Fuzzy* dan Matlab menunjukkan variasi yang signifikan pada data 3 hingga data 9. Persentase error pada rentang data ini sangat tinggi, mencapai lebih dari 2000%. Hal ini menunjukkan bahwa pada nilai input yang lebih rendah, terdapat perbedaan yang sangat besar antara output yang dihasilkan oleh sistem *Fuzzy* dan Matlab. Namun, pada data 10 hingga data 20, persentase error mulai menurun secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem *Fuzzy* dan Matlab mulai menghasilkan output yang lebih mendekati satu sama lain. Khususnya pada data 14 hingga 20, persentase error sangat rendah, berada di bawah 10%. Ini menunjukkan kesesuaian yang lebih baik antara output *Fuzzy* dan Matlab pada nilai input yang lebih tinggi. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa sistem *Fuzzy* dan Matlab lebih konsisten dalam menghasilkan output yang sesuai pada nilai input kecepatan yang lebih tinggi.

Untuk Tabel Respon dari Pengereman berdasarkan pembacaan dari *Loadcell* Belakang Sebagai Berikut:

Tabel 6. Tabel Respon Pengereman

Data	Byte ADC Loadcell Belakang	Fungsi Input Pengereman	Fuzzy Output Pengereman	Fungsi Output Pengereman Matlab	Selisih	Error (%)
1.	269,37	0	0	0	0	0
2.	318,79	0,01	0,03	0,101	0,071	236,6%
3.	375,94	0,01	0,03	0,101	0,071	236,6%
4.	427,31	0,02	0,04	0,191	0,151	377,5%
5.	456,86	0,03	0,06	0,135	0,075	125%
6.	507,49	0,03	0,05	0,16	0,11	219%
7.	621,27	0,05	0,06	0,16	0,1	166,6%
8.	738,97	0,07	0,08	0,18	0,09	124%
9.	873,77	0,09	0,10	0,797	0,697	697%
10.	1041,70	0,11	0,11	0,209	0,098	89,9%
11.	1293,14	0,15	0,15	0,229	0,079	52,6%
12.	1551,44	0,19	0,18	0,249	0,069	38,3%
13.	1783,67	0,22	0,20	0,248	0,047	23,9%
14.	2054,04	0,26	0,28	0,264	0,016	5,71%
15.	2374,33	0,31	0,32	0,32	0	0%
16.	2629,75	0,35	0,35	0,355	0,005	1,4%
17.	3003.04	0,40	0,40	0,395	0,005	1,25%
18.	3141,54	0,42	0,41	0,412	0,002	0,487%
19.	3821,65	0,52	0,54	0,527	0,013	2,47%
20.	4270,86	0,59	0,6	0,597	0,003	0,5%7



Gambar 19. *Fuzzy* respon pengereman

Pada Respon 2, nilai *Fuzzy* Output Pengereman yang dihasilkan oleh sistem *Fuzzy* dan Matlab juga menunjukkan variasi yang tinggi pada data 2 hingga data 9, dengan persentase error yang sangat tinggi, mencapai hingga 697%. Seperti pada *Loadcell* Depan, hal ini menunjukkan bahwa pada nilai input yang lebih rendah, terdapat perbedaan besar antara output yang dihasilkan oleh sistem *Fuzzy* dan Matlab. Namun, pada data 10 hingga data 20, persentase error mulai menurun secara signifikan. Pada data 14 hingga 20, persentase error sangat rendah, berada di bawah 10%, dan pada beberapa data bahkan mendekati 0%. Ini menunjukkan bahwa sistem *Fuzzy* dan Matlab menghasilkan output pengereman yang lebih konsisten dan mendekati satu sama lain pada nilai input pengereman yang lebih tinggi.

Dari analisis kedua bagan, dapat disimpulkan bahwa perbedaan pengaturan pada driver *VESC* di Matlab menyebabkan variasi yang signifikan antara output yang dihasilkan oleh sistem *Fuzzy* dan Matlab, terutama pada nilai input yang lebih rendah. Namun, pada nilai input yang lebih tinggi, output yang dihasilkan oleh kedua sistem cenderung lebih konsisten dan mendekati satu sama lain. Hal ini menunjukkan bahwa sistem *Fuzzy* dan Matlab dapat lebih diandalkan untuk menghasilkan output yang sesuai pada kondisi operasi dengan nilai input yang lebih tinggi. Dari Hasil Respon waktu bahwa nilai *Fuzzy* Output Kecepatan dan Pengereman tetap konsisten dengan nilai selisih dan persentase error yang rendah.

Respon time yang cepat (dengan delay 50ms dan pembacaan aktual setiap 93ms) menunjukkan bahwa sistem *Fuzzy* dan Matlab dapat menghasilkan output yang stabil dan dapat diandalkan bahkan pada interval waktu yang pendek. Hal ini penting untuk aplikasi yang memerlukan respons cepat, seperti dalam pengaturan driver *VESC*, di mana perubahan kecepatan dan pengereman perlu direspon secara cepat dan akurat. Data tambahan ini menunjukkan bahwa meskipun ada perbedaan pengaturan pada Matlab, sistem *Fuzzy* tetap mampu memberikan output yang konsisten dalam waktu respons yang cepat. Sehingga pergerakan *Skateboard* menjadi stabil.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil penelitian dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem kendali kecepatan pada *Skateboard* menggunakan metode *Fuzzy Logic Control* Mamdani bekerja dengan baik. Sistem ini mampu mengatur kecepatan motor *BLDC* secara otomatis berdasarkan beban yang terdeteksi oleh sensor *loadcell*. Sistem kendali *fuzzy* berhasil mengatur kecepatan dan pengereman dengan respons yang cepat dan akurat, sesuai dengan masukan dari sensor *loadcell* depan dan belakang. Dengan pengendalian yang halus dan tidak tiba-tiba, sistem ini mampu mengurangi risiko kecelakaan serta meningkatkan kenyamanan pengguna saat menggunakan *Skateboard* listrik di berbagai kondisi jalan. Penggunaan metode *Fuzzy Logic Control* Mamdani mampu mengatasi nilai input yang non-linear dan memberikan hasil yang konsisten dengan waktu respons yang cepat, sehingga pergerakan *Skateboard* menjadi lebih stabil. Implementasi *Mikrokontroler ESP32* dan ESC FSESP 4.20 dalam sistem ini berhasil mendukung kinerja sensor *loadcell* dan motor *BLDC* dengan baik, menjadikan sistem ini layak untuk digunakan dalam aplikasi nyata.

REFERENSI

[1] T. H. Soesilo, "KONTROL LOGIKA FUZZY SEBAGAI FEED FORWARD CONTROLLER UNTUK MENGATUR KECEPATAN MOTOR *BLDC* PADA *ELECTRIC SKATEBOARD,*" Universitas Brawijaya, 2021.

[2] R. Hamdani, H. Puspita, and D. R. Wildan, "Pembuatan Sistem Pengamanan Kendaraan Bermotor Berbasis Radio Frequency Identification (Rfid)," *Indept*, vol. 8, no. 2, pp. 56–63, 2019.

[3] Y. C. WIBOWO, "ANALISA PEMBEBANAN PADA MOTOR BRUSHLESS DC (*BLDC*)," UNIKA SOEGIJAPRANATA SEMARANG, 2019.

[4] R. I. S. and H. Hartono, "Rancang Bangun Pulse Width Modulation (PWM) Sebagai Pengatur Kecepatan Motor DC Berbasis Mikrokontroler Arduino," *Jurnal Penelitian*, vol. 3, no. 1, pp. 50–58, 2018, doi: 10.46491/jp.v3e1.31.50-58.

[5] D. Kartika, R. Sovia, and H. M. Sandawa, "Penerapan Metode Fuzzy Mamdani untuk Memprediksi Angka Penjualan Token Berdasarkan Persediaan dan Jumlah Permintaan pada PT. PLN (Persero) Padang Berbasis WEB," *Jurnal KomtekInfo*, vol. 5, no. 1, pp. 81–95, 2018, doi: 10.35134/komtekinfo.v5i1.8.

[6] M. Fikri, B. Prasetio, and R. Maulana, "Perancangan Dan Implementasi Real Segway Pada *Skateboard* Roda Satu Menggunakan Gyroscope Dan Accelerometer," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer (J-PTIIK) Universitas Brawijaya*, vol. 1, no. 1, pp. 1–9, 2017.

[7] Edison, "PEMBUATAN DAN PENGUJIAN *SKATEBOARD* ELECTRIC," *Rang Teknik Journal*, vol. 21, no. 1, pp. 1–9, 2020.

[8] M. A. Pradhana, "PENGISI DAYA BATERAI LiFePO4 SEBAGAI SUMBER ENERGI PADA SEPEDA LISTRIK," *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 11, no. 2, pp. 70–74, 2022, doi: 10.14710/transient.v11i2.70-74.

[9] D. Karyaningsih and R. Rizky, "Implementation of Fuzzy Mamdani Method for Traffic Lights Smart City in Rangkasbitung, Lebak Regency, Banten Province (Case Study of the Traffic Light T-junction, Cibadak, By Pas Sukarno Hatta Street)," *Jurnal KomtekInfo*, vol. 7, no. 3, pp. 176–185, 2020, doi: 10.35134/komtekinfo.v7i3.78.

[10] S. I. Putri, "PERANCANGAN LOGIKA FUZZY METODE MAMDANI SINGELTON PADA PANEL SURYA OTOMATIS," *Jurnal Sosial dan Teknologi*, vol. 2, no. 6, pp. 560–566, 2022.