JREEC
JOURNAL RENEWABLE ENERGY ELECTRONICS AND CONTROL
homepage URL : https://ejurnal.itats.ac.id/jreec

Pengendali Keseimbangan dengan Logika Fuzzy untuk *Self-Balancing Two-Wheel Electric Scooter*

Andik Yulianto[1], Rizki Kasmuda[2]

Prodi Teknik Elektro, Universitas Internasional Batam, Jalan Gajah Mada, Baloi Sei Ladi, Batam

INFORMASI ARTIKEL

Jurnal JREEC – Volume 2
Nomer 02, Oktober 2022

Halaman:
66 – 73
Tanggal Terbit :
30 Oktober 2022

DOI:
10.31284/j.JREEC.2022.v2i1
.3845

EMAIL

andik@uib.ac.id

PENERBIT

Jurusan Teknik Elektro-ITATS
Alamat:
Jl. Arief Rachman Hakim
No.100,Surabaya 60117,
Telp/Fax: 031-5997244

Jurnal JREEC by Department of Elecreical Engineering is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

ABSTRACT

This paper presents the design of self-balancing electric scooters, especially those that use two wheels. Scooter with two wheels cannot stand in balance without a control of speed and direction on both wheels. Two-wheel scooter balance is also a non-linear problem which is quite difficult to solve. For this reason, the Fuzzy Logic Controller (FLC) is designed to control the balance of the two-wheeled scooter. As an input parameter for the FLC control, an accelerometer sensor is used which can detect the elevation angle of the scooter to the ground. FLC is designed using twenty-five rules. The test results show that the scooter can maintain its balance between elevation angles of -30° to 30°.

Keywords: *Self-balancing, Two-wheels electric scooter, Balancing Control, Fuzzy Logic Controller*

ABSTRAK

Paper ini menyajikan perancangan kendali keseimbangan kendaraan elektrik mandiri (*Self-balancing Electric Scooter*) khususnya yang menggunakan dua roda. *Scooter* dengan dua roda tidak bisa berdiri seimbang tanpa sebuah pengendalian kecepatan dan arah pada kedua rodanya. Keseimbangan *scooter* dua roda juga merupakan permasalahan *non-linier* yang cukup sulit untuk dipecahkan. Untuk itu Fuzzy Logic Controller (FLC) dirancang untuk mengendalikan keseimbangan *scooter* dua roda tersebut. Sebagai parameter masukan kendali FLC digunakan sensor *accelerometer* yang dapat mendeteksi sudut elevasi *scooter* terhadap bumi. FLC yang dirancang menggunakan dua puluh lima aturan. Hasil pengujian didapatkan *scooter* dapat mempertahankan keseimbangannya diantara sudut elevasi -30° hingga 30°.

Kata kunci: *Self-balancing, Two-wheels electric scooter, kendali keseimbangan, Fuzzy Logic Controller*

PENDAHULUAN

Populasi alat transportasi semakin meningkat setiap tahun, hampir semua alat transportasi menggunakan bahan bakar minyak sebagai sumber tenaga. Penggunaan bahan bakar minyak yang terus meningkat mengakibatkan pencemaran yang berdampak terhadap terjadinya kerusakan pada lingkungan, maka dari itu untuk mencegah atau mengurangi dampak tersebut alat transportasi sudah seharusnya mengunakan *energy* alternatif yang menerapkan konsep ramah lingkungan, murah, dan fleksibel. Beberapa tahun terakhir ini banyak peneliti telah menerapkan konsep yang menggunakan energy listrik sebagai sumber tenaga pada alat transportasi, umumnya alat transportasi yang menggunakan roda empat dan roda dua disisi depan dan belakang, penerapan pada kendaraan roda empat dan roda dua disisi depan dan belakang telah dilakukan pengembangan, karena dalam

pergerakan kedua kendaraan ini dalam hal bermanuver masih sangat kaku dan juga bentuk nya kurang fleksibel.

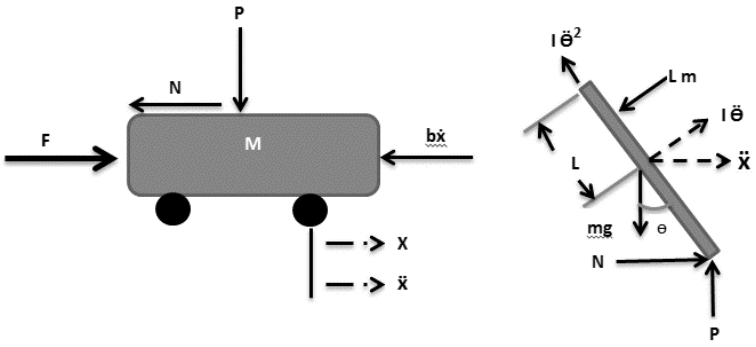
Saat ini perkembangan kendaraan elektrik cukup pesat, tidak terkecuali kendaraan elektrik basis roda dua dengan konsep penyeimbang mandiri (*self-balancing*). Penelitian tentang pengendalian keseimbangan kendaraan *self-balancing two-wheels electric vehicle* menjadi permasalahan yang sangat menarik. Banyak penelitian yang dilakukan para peneliti untuk menghasilkan sebuah kendali pada kendaraan *scooter* ini. Pada penelitian [1] sebuah kendali dengan jaringan syaraf tiruan adaptif telah dikembangkan untuk mengendalikan keseimbangan dan pergerakan terhadap sumbu yaw pada sebuah *scooter* elektrik. Pengendali *Proportional Integral Derivative* (PID) juga digunakan untuk pengendalian keseimbangan pada *two-wheels self-balancing robot* dengan baik[2]. Sebuah kendali juga dikembangkan untuk pengendalian keseimbangan prototipe robot self-balancing menggunakan identifikasi visual [3]. Pada penelitian ini dikembangkan sebuah pengendali keseimbangan *two-wheels self-balancing vehicle* menggunakan *Fuzzy Logic Controller* (FLC).

TINJAUAN PUSTAKA

Pemodelan Pendulum Terbalik

Self balancing vehicle merupakan suatu kendaraan yang memiliki dua buah roda di sisi kanan dan kiri, yang tidak akan seimbang apabila tanpa adanya kontroler. *Balancing vehicle* ini merupakan pengembangan dari model pendulum terbalik (*inverted pendulum*) yang diletakkan di atas kereta beroda. Penyeimbangan kendaraan beroda dua memerlukan suatu kombinasi hardware yang baik dan metode kontrol yang handal untuk mempertahankan posisi kendaraan dalam keadaan tegak lurus terhadap permukaan bumi.

Sistem *inverted pendulum* terdiri dari batang *pendulum* yang diletakkan terbalik yang memiliki massa (m) dan berengsel dengan sudut (θ) antara sumbu vertikal dengan *cart* yang memiliki massa (*M*), dengan pergerakan (*x*) seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 1. Sebuah gaya (*F*) digunakan untuk mendorong *cart* secara horisontal. Untuk menurunkan persamaan model matematika dari sebuah sistem *inverted pendulum* berdasarkan pada Gambar 1.



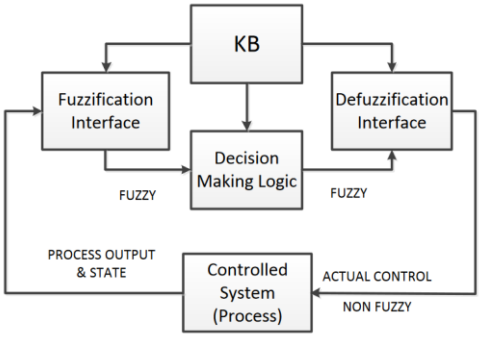
Gambar 1. Pemodelan Inverted Pendulum

Fuzzy Logic Controller

Fuzzy Logic Controller (FLC) merupakan pengendali yang cukup populer. FLC menggunakan prinsip pengambilan keputusan menggunakan logika fuzzy (*Fuzzy Inference System*) . Logika fuzzy yang dikenalkan oleh Lotfi Zadeh, berbeda dengan logika tegas pada umumnya, di mana logika ini didasarkan pada ketidakpastian atau kekaburan. Logika fuzzy menggunakan nilai yang terdiri dari 0 hingga 1. Karena kemudahan perancangan dan implementasi, FLC dapat digunakan pada banyak bidang. Beberapa implementasi FLC pada bidang robotik misalnya pada [4]–[6]pertanian misalnya pada [7], [8]

Fuzzy Inference System (FIS) dapat dikatakan sebagai metode untuk memetakan anggota himpunan dalam ruang masukan ke ruang keluaran. FIS juga melibatkan basis aturan yang

merupakan sebuah pengetahuan (*knowledge*) yang didapatkan berdasarkan pengalaman seorang ahli. Konfigurasi dasar sebuah FLC ditunjukkan pada Gambar 1 terdiri dari empat komponen utama antara lain Fuzzifikasi (*Fuzzification*), pengambilan keputusan (*Decision Making Logic*), Defuzifikasi (*Defuzzification*) dan basis pengetahuan (*Knowledge Base*)[9]. Bagian fuzzifikasi mengubah masukan berupa nilai *crisp* ke dalam nilai fuzzy. Setelah itu bagian pengambilan keputusanmengolah data masukan fuzzy tersebut untuk di berdasarkan model penalaran basis aturan dalam logika fuzzy. Setelah didapatkan keputusan tersebut dipetakan kembali rentang nilai keluaran ke dalam semesta pembicaraan yang bersesuaian, dan proses ini menghasilkan nilai aksi kontrol *non-fuzzy*.

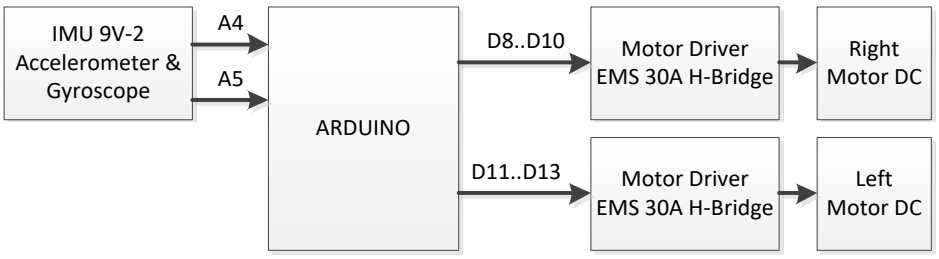


Gambar 2. Konfigurasi Dasar *Fuzzy Logic Controller* (FLC)[9]

METODE

Desain Perangkat Keras *Scooter*

Secara umum diagram perangkat keras elektronik yang digunakan dalam sistem pengendali keseimbangan *scooter* dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem terdiri dari beberapa bagian yaitu modul sensor IMU 9-V2 Sensor Accelerometer, Arduino UNO, driver motor DC EMS 30A H-Bridge dan Motor DC 24v. Dapat dilihat bahwa masukan dari sistem adalah sensor *accelerometer* yang mendeteksi percepatan sudut terhadap gravitasi bumi, dan hasil dari pembacaan tersebut dijadikan parameter masukan yang akan diproses pada mikrokontroller Arduino UNO, selanjutnya data yang diperoleh menjadi sinyal kendali kecepatan dan arah dua motor DC (kanan dan kiri) masing-masing melalui sebuah *driver* motor H-Bridge.



Gambar 3. Blok Diagram Perangkat Keras Sistem Pengendali Keseimbangan Scooter

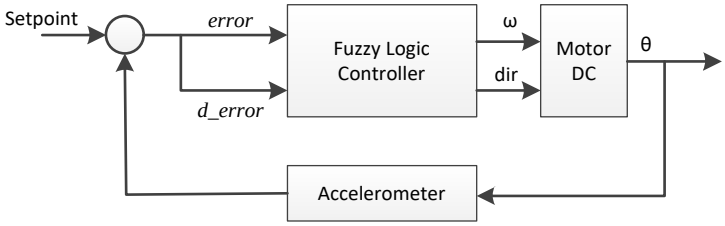
Sistem mekanik dalam pembuatan *Electric Self Balancing Vehicle* ini sangat berpengaruh dalam proses seimbangnya kendaraan, desain mekanik kendaraan ini diusahakan dapat seimbang pada titik pusat masanya. Kendaraan *Electric Self Balancing Vehicle* ini menggunakan dua buah roda dengan diameter 17cm, lebar plat tempat pijakan kaki sebesar 50cm x 50cm, panjang tuas pengendali 20cm dan panjang tiang 1,3 meter seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Desain Mekanik *Self-balancing Two Wheel Electric Vehicle* (*Scooter*)

Desain *Fuzzy Logic Controller*

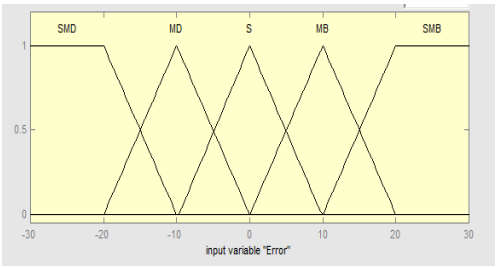
Gambar 5 merupakan perancangan sistem *control Electric Self Balancing Two Wheels Vehicle*, dapat dilihat sistem *control* yang digunakan yaitu menggunakan aturan logika fuzzy, nilai keluaran fuzzy digunakan untuk mengontrol kecepatan dan juga arah perputaran motor. Masukan dari sistem ini adalah kemiringan terhadap gaya gravitasi bumi yang didapatkan dari pembacaan data analog dari sensor *accelerometer*, dari data tersebut diajadikan nilai masukan aturan fuzzy untuk menentukan kecepatan dan arah pergerakan. Nilai error dan delta error didapatkan dari nilai kemiringan. Perubahan kecepatan dan arah putaran tergantung dari data kemiringan yang terbaca oleh sensor *accelerometer.*



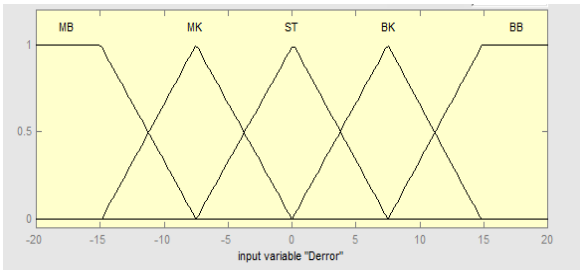
Gambar 5. Sistem FLC untuk Electric Self Balancing Two Wheels Vehicle

Pada penelitian ini digunakan dua pengendali FLC untuk mengendalikan keseimbangan roda kanan dan kiri dari scooter. Masing-masing memiliki desain fungsi keanggotaan masukan dan keluaran yang sama, namun memiliki basis aturan fuzzy yang berbeda.

Masukan kendali keseimbangan pada sistem ini menggunakan sensor *gyro* untuk mendapatkan data kemiringan *scooter*. Output dari sensor *gyro* yaitu besaran koordinat X. Besaran koordinat X masuk ke kontroler kemudian diolah dan menghasilkan keluaran berupa frekwensi yang nantinya diubah menjadi tegangan untuk mengontrol kecepatan motor. Masukan dari logika fuzzy adalah masukan *error* dan masukan Δ*error* koordinat X. Kedua masukan ini akan dilanjutkan ke proses fuzzifikasi sehingga menghasilkan keluaran berupa frekwensi untuk selanjutnya diubah menjadi tegangan pada rangkaian frequency to voltage yang akan diteruskan ke driver motor. Dari masukan yang dihasilkan oleh gyro, akan dibentuk dua buah fungsi keanggotan yaitu membership function kemiringan kendaraan yang datanya diperoleh secara langsung dari nilai x pada *gyroscope* dan *membership function* selisih kemiringan yang datanya diperoleh dari nilai set point dikurangi dengan nilai x pada saat ini yang dirumuskan sebagai berikut:



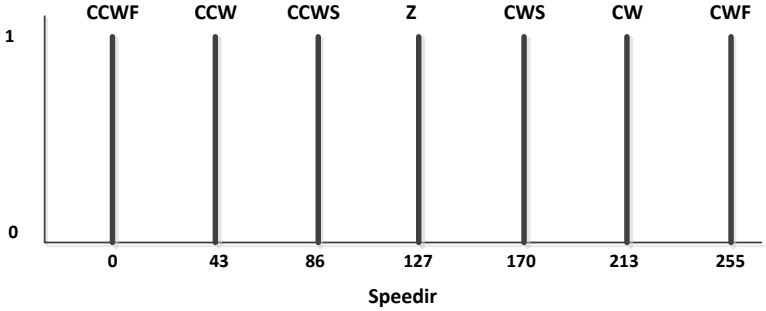
(a)



(b)

Gambar 6. Rancangan Fungsi Keanggotaan masukan FLC (a) Variabel Error (b) Variabel d_error

Gambar 7.



Gambar 8. Fungsi Keanggotaan Keluaran Speedir

Gambar 6 diatas adalah *membership Function* dari masukan sistem ini. Gambar 6a adalah fungsi keanggotan dari *error***,** Gambar 6b adalah *membership function* dari d_error yang merupakan selisih antara *error* saat ini dengan *error* sebelumnya. Masing- masing dari fungsi keanggotaan ini dibagi menjadi lima buah anggota himpunan yaitu SMD (Sangat Miring Depan), MD (Miring Depan), S (Seimbang), MB (Miring Belakang), SMB (Sangat Miring Belakang). Sedangkan fungsi keanggotan untuk *d_error* diberikan notasi MB (Maju Besar), M (Maju), ST (Stabil), B (Belakang), dan BB (Belakang Besar). Untuk fungsi keanggotan keluaran dibagi menjadi tujuh himpunan tipe *singleton* yaitu CCWF (Counterclockwise Fast), CCW (Counterclockwise), CCWS (Counterclockwise Slow), Z (Zero), CWS (Clockwise Slow), CW (Clockwise) dan CWF (Clockwise Fast) dengan rentang nilai 0-255 seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Pada keluaran ini diimplementasikan dalam bentuk pengaturan nilai PWM motor DC sekaligus dengan arah putar dari motor DC tersebut. Agar dapat memberikan arah pengendalian motor DC yang benar, maka urutan anggota himpunan fungsi keanggotaan tersebut dibuat terbalik satu sama lain.

Basis aturan yang dirancang pada penelitian terdiri dari dua puluh lima aturan seperti yang tertera pada Tabel 1. Operator logika yang digunakan pada aturan ini adalah operator AND.

Tabel 1. Basis Aturan FLC untuk *Self Balancing Two-wheels Electric Scooter*

error / ***derror***	**SMD**	**MD**	**S**	**MB**	**SMB**
MB	CCWF	CCWF	CCW	CCWS	Z
M	CCWF	CCW	CCWS	Z	CWS
S	CCW	CCWS	Z	CWS	CW
B	CCWS	Z	CWS	CW	CWF
BB	Z	CWS	CW	CWF	CWF

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Pendeteksi Kemiringan

Sebelum melakukan pengujian keseimbangan scooter, terlebih dahulu kami menguji pendeteksi kemiringan *scooter* secara independen. Pada pengujian ini scooter tidak dibebani dengan tubuh manusia dan *scooter* dalam keadaan diam ditempat kemudian dimiringkan membentuk sudut tertentu kemudian dibaca sudut terukurnya. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui seberapa besar nilai *error* pengukuran kemiringan yang terbaca oleh sensor accelerometer IMU-9V2 dibandingkan dengan pembacaan sudut aktual menggunakan busur derajat, sehingga sudut yang terbaca dapat dijadikan data masukan ke FLC. *Scooter* membutuhkan pembacaan sudut kemiringan sekitar -30° sampai 30°, maka pengujian dilakukan pada jangkauan -70° sampai 70° dengan kelipatan 10°. Tabel 2 merupakan hasil pengujian didapatkan rata-rata *error* antara sudut aktual dan hasil pembacaan sensor sebesar 0.34°.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Sudut Kemiringan dengan Accelerometer

Sudut aktual (°)	Sudut sensor Accelerometer (°)	*Error* (°)
-70	-69,7	0,3
-60	-59,6	0,4
-50	-49,6	0,4
-40	-40,1	0,1
-30	-29,9	0,1
-20	-19,8	0,2
-10	-10,3	0,3
0	0,2	0,2
10	9,4	0,6
20	20,5	0,5
30	29,4	0,6
40	40,4	0,4
50	49,2	0,2
60	60,3	0,3
70	70,4	0,4

Pengujian FLC tanpa Beban

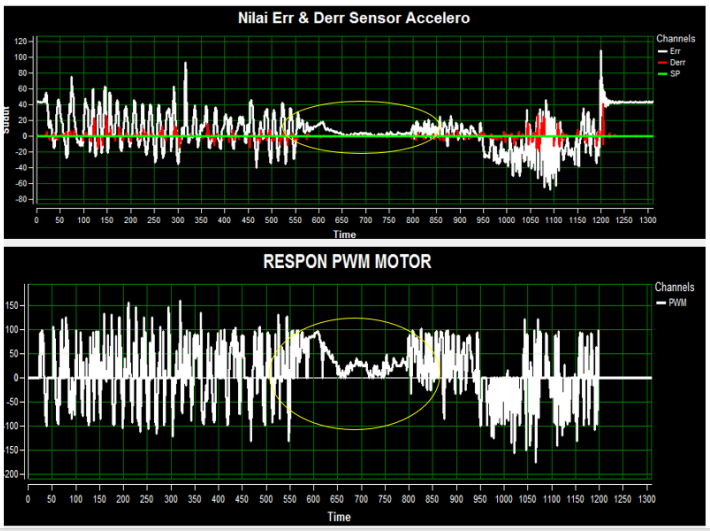
Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui nilai PWM yang dihasilkan oleh FLC ketika *scooter* dimiringkan dengan sudut tertentu. Pada pengujian ini scooter dimiringkan pada keadaan diam ditempat sejauh -30° hingga 30° kemudian diukur nilai error dan d_error, serta nilai PWM yang dihasilkan. Nilai sudut negatif artinya *scooter* dimiringkan ke arah belakang, demikian sebaliknya jika nilai sudut positif maka scooter dimiringkan ke arah depan. Tabel 3 merupakan hasil dari pembacaan ketiga nilai tersebut dari salah satu motor DC. Tampak bahwa ketika *scooter* miringkan dengan sudut yang semakin besar ke arah depan ataupun belakang, maka nilai PWM semakin besar. Dengan demikian dengan nilai PWM yang besar artinya motor DC memberikan respon yang cepat untuk menyeimbangkan *scooter*.

Pengujian FLC dengan Beban

Pengujian kendali FLC dilakuakan dengan mengendarai scooter kemudian dilakukan pengukuran nilai *error* dan *d_error* serta nilai PWM yang dihasilkan oleh FLC. Hasil pengukuran pada Gambar 9 menunjukkan bahwa sistem kendaraan beroda dua dapat seimbang dan mampu mempertahankan posisi berdiri dalam range sekitar -30^0 sampai 30^0 dari posisi tegak yaitu 0^0. Namun demikian pergerakannya masih terasa kasar sehingga menyebabkan *scooter* bergetar. Hasil pembacaan sensor accelerometer juga masih terlalu banyak noise disebabkan getaran yang dihasilkan oleh *scooter*.

Tabel 3. Hasil Pengujian FLC pada Scooter Tanpa Beban

Kemiringan	Masukan		Keluaran
	Error	D_Error	PWM
-30	246	6	200
-20	239	3	200
-10	195	3	175
0	180	7	0
10	172	7	138
20	160	6	130
30	155	3	125



Gambar 9. (a) Hasil Pembacaan Sensor Accelerometer saat Scooter dikendarai dan (b) Nilai PWM yang dihasilkan oleh FLC

KESIMPULAN

Perancangan FLC untuk kendali keseimbangan *self-balancing two-wheels electric scooter* telah disampaikan pada paper ini. Dengan menggunakan 2 buah masukan pada proses *fuzzifikasi* dan menggunakan 25 rules masih terdapat osilasi yang cukup signifikan pada output *defuzzifikasi*. Dari proses pengambilan data sensor terdapat noise yang diakibatkan oleh besarnya getaran motor yang langsung berakibat ke pembacaan kemiringan dan kontrol PWM motor. Untuk pengembangan selanjutnya penggunaan filter untuk memperbaiki hasil pembacaan sensor dapat dilakukan mengingat noise yang dihasilkan mempengaruhi respon kendali secara signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] C. C. Tsai, H. C. Huang, and S. C. Lin, "Adaptive neural network control of a self-balancing two-wheeled scooter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 4, pp. 1420–1428, Apr. 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2039452.

[2] A. Y. Zimit, H. J. Yap, M. F. Hamza, I. Siradjuddin, B. Hendrik, and T. Herawan, "Modelling and experimental analysis two-wheeled self balance robot using PID controller," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture*

Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2018, vol. 10961 LNCS, pp. 683–698. doi: 10.1007/978-3-319-95165-2_48.

[3] B. Zhang and G. Wu, "Design of two-wheel self-balancing vehicle based on visual identification," *EURASIP J Image Video Process*, vol. 2019, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1186/s13640-019-0434-7.

[4] H. Shi, X. Li, K. S. Hwang, W. Pan, and G. Xu, "Decoupled Visual Servoing with Fuzzy Q-Learning," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 14, no. 1, pp. 241–252, 2018, doi: 10.1109/TII.2016.2617464.

[5] J. Hong, K. Tang, and C. Chen, "Obstacle avoidance of hexapod robots using fuzzy Q-learning," *2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, SSCI 2017 - Proceedings*, vol. 2018-Janua, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/SSCI.2017.8280907.

[6] A. Yulianto and R. H. Sufrianto, "Implementasi Fuzzy Logic Controller untuk Meredam Ayunan pada Prototipe Gantry Crane," Institut Teknologi Adhi Tama, Surabaya, Surabaya, 2017. [Online]. Available: http://conference.itats.ac.id/index.php/sntekpan/2017/paper/view/125

[7] D. Pancawati and A. Yulianto, "Implementasi Fuzzy Logic Controller untuk Mengatur Ph Nutrisi pada Sistem Hidroponik Nutrient Film Technique (NFT)," *JURNAL NASIONAL TEKNIK ELEKTRO*, vol. 5, no. 2, Jul. 2016, doi: 10.20449/jnte.v5i2.284.

[8] A. Jaelani, J. T. Elektro, T. Adhi, and T. Surabaya, "CONTROL OF TEMPERATURE AND HUMIDITY STABILITY USING FUZZY IN TOMATO AND CHILI PLANT AREAS WITH INTERCROPPING SYSTEM," *JREEC : Journal of Renewable Energy, Electronics and Control*, vol. 1, no. 1, pp. 36–42, Jun. 2021, Accessed: Dec. 27, 2022. [Online]. Available: http://ejurnal.itats.ac.id/jreec/article/view/1707

[9] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller—Part I," *IEEE Trans Syst Man Cybern*, vol. 20, no. 2, pp. 404–418, 1990, doi: 10.1109/21.52551.